



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL
Licenciatura en Ciencias Ambientales



**Análisis de dispersión anual para los
contaminantes criterio de la Red
Automática de Monitoreo Atmosférico de la
Zona Metropolitana del Valle de Toluca
(RAMA-ZMVT), 2017.**

Tesis

Que para obtener el título de:
Licenciado en Ciencias Ambientales

Presenta:

Enrique López Vera

Directora de Tesis:

Dra. Ana Marcela Gómez Hinojos

Toluca, Estado de México

Septiembre 2020

Índice

Índice de Imágenes.....	10
Índice de Tablas.....	11
Índice de Mapas	12
Glosario de palabras clave.....	13
Resumen.....	16
Abstract	17
Introducción	18
Esquema de la investigación	20
a) Justificación	20
b) Contribución de la propuesta.....	22
c) Objetivo general	22
d) Objetivos particulares	23
e) Hipótesis.....	23
f) Planteamiento del problema	23
g) Pregunta de investigación	24
h) Metodología.....	25
h.1 Alcance de la Investigación	25
h.1.1 Exploratoria	25
h.1.2 Descriptiva.....	25
h.1.3 Correlacional	25
h.2 Diseño de la investigación	25
h.3) Diagrama de la investigación	27
h.4) Población de estudio.....	28
h.5) Instrumento de medición.....	30
h.5.1) Material Particulado	30
h.5.1.1) PM ₁₀	30
h.5.1.2) PM _{2.5}	30
h.5.2) Ozono	30
h.5.3) Monóxido de Carbono	30
h.5.4) Dióxido de Azufre	31

h.5.5) Dióxido de Nitrógeno	31
h.6) Recolección de datos	31
h.7) Análisis estadístico	33
Capítulo 1. Antecedentes	34
1.1 Internacional	34
1.1.1 América	34
1.1.1.1 Brasil.....	34
1.1.1.2 Chile.....	35
1.1.1.3 Colombia	35
1.1.1.3 Ecuador.....	36
1.1.1.5 Perú	36
1.1.2 Europa	37
1.2 Nacional.....	39
1.2.1 RAMA-ZMVG (RAMAG)	39
1.2.1.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la RAMA-ZMVG (RAMAG).	41
1.2.2 RAMA-ZMVM	42
1.2.2.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la RAMA-ZMVM	47
1.2.3 SIMA-AMM.....	48
1.2.3.1 Trabajos realizados en el SIMA-AMM	50
1.3 Local: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT) (RAMAT).	51
1.3.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la ZMVT	52
Capítulo 2. Marco Conceptual	54
2.1 Contaminación Atmosférica	54
2.2 Conceptos básicos	54
2.2.1 Medición.....	54
2.2.2 Métodos de medición de la calidad del aire.	54
2.2.2.1 Muestreo pasivo.....	55
2.2.2.1.1 Ventajas del muestreo pasivo	55
2.2.2.1.2 Desventajas del muestreo pasivo.....	56
2.2.2.2 Muestreo con bioindicadores.....	56

2.2.2.2.1 Ventajas del muestreo con bioindicadores	57
2.2.2.2.2 Desventajas del muestreo con bioindicadores	57
2.2.2.3 Muestreo activo	57
2.2.2.3.1 Ventajas de los muestreadores activos:.....	58
2.2.2.3.2 Desventajas de los muestreadores activos	58
2.2.2.4 Método automático	58
2.2.2.4.1 Ventajas de los métodos automáticos.	59
2.2.2.4.2 Desventajas de los métodos automáticos.....	60
2.2.2.5 Método óptico de percepción remota.	60
2.2.2.5.1 Ventajas de los métodos ópticos de percepción remota.	61
2.2.2.5.2 Desventajas de los métodos ópticos de percepción remota.	61
2.2.3 Análisis de muestras.....	61
2.2.3.1 Métodos volumétricos	62
2.2.3.2 Titulación y valoración.....	63
2.2.3.3 Métodos gravimétricos.	64
2.2.4 Monitoreo atmosférico	64
2.2.4.1 Estaciones de Monitoreo.....	65
2.2.4.2 Redes de monitoreo	66
2.2.4.3 Redes de medición	66
2.2.4.3.1 Estaciones de medición fijas.....	66
2.2.4.3.2 Estaciones de medición semi-fijas.....	67
2.2.4.3.3 Estaciones de medición móviles.....	67
2.2.5 Criterios a considerarse para la instalación de una Red de Monitoreo Atmosférico	68
2.2.5.1 Actividades económicas y culturales en la Zona.	68
2.2.5.2 Información meteorológica.....	68
2.2.5.3 Información topográfica.....	70
2.3 Contaminantes.	72
2.3.1 Clasificación de los contaminantes de la Atmósfera.	73
2.3.1.1 Contaminantes criterio.....	73
2.3.1.1.1 Partículas Suspendidas Totales (PST), menores a 10 Micras (PM ₁₀) y menores a 2.5 Micras (PM _{2.5}). 74	
2.3.1.1.2 Ozono (O ₃).	76

2.3.1.1.3 Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	77
2.3.1.1.4 Dióxido de Azufre (SO ₂).....	77
2.3.1.1.5 Monóxido de Carbono (CO).....	78
2.4 Indicadores de desarrollo sustentable	78
2.5 Población sensible	79
2.6 Sistemas de información geográfica.	79
2.6.1 Ráster.	80
2.6.2 Métodos de interpolación.....	80
2.6.2.1 Kriging.....	80
2.6.2.2 Vecino natural	80
2.6.2.3 Spline	81
2.6.2.4 Spline con barreras.....	81
2.6.2.5 De topo a ráster.....	81
2.6.2.6 Tendencia.	81
2.6.2.7 IDW.....	81
2.7 Climatología.....	82
2.7.1 Instrumentos Meteorológicos.....	82
2.7.1.1 Anemómetro	82
2.7.1.2 Barómetro	83
2.7.1.3 Pluviómetro	83
2.7.1.4 Termómetro	83
2.7.1.5 Veleta.	83
2.7.2 Elementos del clima	83
2.7.2.1 Temperatura.....	83
2.7.2.2 Humedad	83
2.7.2.3 Viento	84
2.7.2.4 Presión atmosférica.....	84
2.7.2.5 Precipitación.....	84
2.7.3 Factores del clima.....	85
2.8 Términos operativos en México	86
Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).....	86
Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).....	86

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)	87
Red de Depósito Atmosférico (REDDA).....	87
Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA).....	87
Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA).....	87
Capítulo 3. Marco contextual	89
3.1 Localización y conformación de la ciudad de Toluca.....	89
3.2 Orografía y Relieve.	95
3.3 Clima.....	98
3.3.1 Meteorología.....	100
3.4. Dinámica de Vientos.....	107
3.4.1. Vientos dominantes.....	108
3.5 Suelos.	109
3.5.1 Tipos de suelos	109
3.5.2 Uso de suelos.....	110
3.6 Aspectos socioeconómicos de la ZMVT.....	111
3.6.1 Dinámica poblacional	111
3.6.2 Población sensible	112
3.6.3 Actividades económicas.	114
3.6.3.1 Actividades del sector primario.....	115
3.6.3.2 Actividades del sector secundario.....	115
3.6.3.3 Actividades del sector terciario.....	115
3.7. Vías de comunicación.....	116
Capítulo 4. Marco normativo	118
4.1 Internacional	118
4.2 Nacional.....	118
4.3 Normas Oficiales Mexicanas	120
Capítulo 5. Resultados	126
5.1 Vientos en la ZMVT.....	128
5.1.1 Oxtotitlán (OX).....	129
5.1.2 Centro (CE).	130
5.1.3 Metepec (MT).....	131
5.1.4 Ceboruco (CB).....	132

5.1.5 San Mateo Atenco (SM).....	133
5.1.6 San Cristóbal (SC).....	134
5.1.7 Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).....	135
5.2 Análisis de dispersión	138
5.2.1 Ozono (O ₃).	139
5.2.1.1 Correlación de interpolación del O ₃ con los vientos.	141
5.2.2 Monóxido de carbono (CO).	143
5.2.2.1 Correlación de interpolación del Monóxido de Carbono con los vientos.	146
5.2.3 Dióxido de Azufre (SO ₂)	148
5.2.3.1 Correlación de la interpolación de Dióxido de azufre con los vientos.	151
5.2.4 Dióxido de nitrógeno (NO ₂).	153
5.2.4.1 Correlación de Dióxido de nitrógeno con los vientos.....	155
5.2.5 Material Particulado PM ₁₀	157
5.2.5.1 Correlación de la interpolación de las PM ₁₀ con los vientos.	159
5.2.6 Material Particulado PM _{2.5}	161
5.2.6.1 Correlación de las PM ₁₀ y PM _{2.5} con los vientos en la ZMVT, 2017.....	163
Conclusiones.....	166
Recomendaciones	168
Bibliografía	169

Índice de Imágenes

IMAGEN 1: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE LA RAMA-ZMG	40
IMAGEN 2: UNIDAD MÓVIL DE LA RAMAG.....	40
IMAGEN 3: DELIMITACIÓN DE LA ZMVM	43
IMAGEN 4: LOCALIZACIÓN EMA'S ZMVM.....	44
IMAGEN 5: ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY	50
IMAGEN 6: CENTRO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA RAMA-ZMVT	52
IMAGEN 7: TUBOS DE DIFUSIÓN.....	56
IMAGEN 8: EQUIPO PARA EL MUESTREO ACTIVO DE UN CONTAMINANTE EN UNA SOLUCIÓN ABSORBENTE	58
IMAGEN 9: EQUIPOS DE MEDICIÓN AUTOMÁTICOS.....	59
IMAGEN 10: SOFTWARE UTILIZADO POR LAS ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO.....	60
IMAGEN 11: REPRESENTACIÓN DE LOS MÉTODOS VOLUMÉTRICOS	62
IMAGEN 12: PASOS PARA TITULAR UN ÁCIDO CON UNA BASE.....	63
IMAGEN 13: ESQUEMA DE PROCEDIMIENTO EN UNA GRAVIMETRÍA POR PRECIPITACIÓN.....	64
IMAGEN 14: ESTACIÓN FIJA PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	67
IMAGEN 15: ESTACIÓN DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (UNIDAD MÓVIL) DE LA RAMA-ZMVT	68
IMAGEN 16: SENSORES DE DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DE VIENTO.....	70
IMAGEN 17: CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	73
IMAGEN 18: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS.....	75
IMAGEN 19: DIÓXIDO DE AZUFRE	78
IMAGEN 20: LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TOLUCA.....	90
IMAGEN 21: DIRECCIÓN DE LOS VIENTOS	108
IMAGEN 22: VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	117
IMAGEN 23: IMECA	125
IMAGEN 24: ROSA DE LOS VIENTOS 01 ESTACIÓN OXTOTILÁN.....	129
IMAGEN 25: ROSA DE LOS VIENTOS 02 ESTACIÓN CENTRO	130
IMAGEN 26: ROSA DE LOS VIENTOS 03 METEPEC	131
IMAGEN 27: ROSA DE LOS VIENTOS 04 CEBORUCO.....	132
IMAGEN 28: ROSA DE LOS VIENTOS 05 SAN MATEO ATENCO.....	133
IMAGEN 29: ROSA DE LOS VIENTOS 06 SAN CRISTÓBAL	134
IMAGEN 30: ROSA DE LOS VIENTOS 07 GENERAL DE LA ZMVT.....	135

Índice de Tablas

TABLA 1: ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA ZMVM.....	44
TABLA 2: ACCIONES Y METAS PARA REDUCIR NIVELES ANUALES DE CONTAMINANTES.....	49
TABLA 3: COMPONENTES DE UNA ESTACIÓN FIJA PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS METEREOLÓGICOS	69
TABLA 4: CONDICIONES TOPOGRÁFICAS A CONSIDERARSE	71
TABLA 5: EFECTO DE CONTAMINANTES CRITERIO SOBRE LA SALUD	74
TABLA 6: DIFERENCIA ENTRE CAPA DE OZONO Y OZONO COMO CONTAMINANTE	77
TABLA 7: SUBSISTEMAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	86
TABLA 8: MUNICIPIOS QUE CONFORMAN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA.....	92
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MUNICIPIOS QUE CONFORMAN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA	94
TABLA 10: ELEVACIONES QUE PREDOMINAN EN LA ZMVT	96
TABLA 11: ÉPOCAS CLIMATOLÓGICAS EN LA ZMVT	100
TABLA 12: ZONAS DE LA ZMVT	101
TABLA 13: TIPOS DE SUELOS DE LA ZMVT.....	110
TABLA 14: USOS DE SUELO EN LA ZMVT.....	111
TABLA 15: POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD Y POBLACIÓN SENSIBLE.....	113
TABLA 16: VALORES PARA LAS CONCENTRACIONES DE OZONO EN EL AIRE AMBIENTE DE ACUERDO CON LAS NOM'S.....	121
TABLA 17: VALORES PARA LAS CONCENTRACIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO EN EL AIRE AMBIENTE DE ACUERDO CON LAS NOM'S	122
TABLA 18: VALORES PARA LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN EL AIRE AMBIENTE DE ACUERDO CON LAS NOM'S.....	122
TABLA 19: VALORES PARA LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN EL AIRE AMBIENTE DE ACUERDO CON LAS NOM'S	123
TABLA 20: VALORES PARA LAS CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PM ₁₀ Y PM _{2.5}) EN EL AIRE AMBIENTE DE ACUERDO CON LAS NOM'S.....	124
TABLA 21: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW OZONO, 2017	139
TABLA 22: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW MONÓXIDO DE CARBONO, 2017.....	144
TABLA 23: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW DIÓXIDO DE AZUFRE, 2017	148
TABLA 24: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW DIÓXIDO DE NITRÓGENO, 2017.....	153
TABLA 25: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW PM ₁₀ , 2017.	157
TABLA 26: INTERVALOS DE LA INTERPOLACIÓN IDW PM _{2.5} , 2017.....	161

Índice de Mapas

MAPA 1: LOCALIZACIÓN DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA (ZMVT).....	29
MAPA 2: LOCALIZACIÓN DE LAS EMA'S.....	32
MAPA 3: CIUDAD DE TOLUCA.....	91
MAPA 4: MUNICIPIOS QUE CONFORMAN LA ZMVT	93
MAPA 5: ELEVACIONES EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA	97
MAPA 6: TIPOS DE CLIMA DE LA ZMVT, IDENTIFICANDO LOS MUNICIPIOS INFLUENCIADOS POR LA RAMA-ZMVT.....	99
MAPA 7: LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO.....	102
MAPA 8: SITUACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO.....	104
MAPA 9: COBERTURA DE LAS EMA'S	106
MAPA 10: COBERTURA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	127
MAPA 11: DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO.....	137
MAPA 12: DISPERSIÓN DE OZONO EN LA ZMVT, 2017.	140
MAPA 13: CORRELACIÓN DE VIENTOS Y OZONO EN LA ZMVT, 2017.	142
MAPA 14: DISPERSIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO EN LA ZMVT, 2017	145
MAPA 15: CORRELACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO CON LOS VIENTOS EN LA ZMVT, 2017.....	147
MAPA 16: DISPERSIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN LA ZMVT, 2017.	150
MAPA 17: CORRELACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE CON LOS VIENTOS EN LA ZMVT, 2017.	152
MAPA 18: DISPERSIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA ZMVT, 2017.....	154
MAPA 19: CORRELACIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO CON LOS VIENTOS EN LA ZMVT, 2017	156
MAPA 20: DISPERSIÓN DE PM ₁₀ EN LA ZMVT, 2017	158
MAPA 21: CORRELACIÓN DE PM ₁₀ CON LOS VIENTOS EN LA ZMVT, 2017.....	160
MAPA 22: DISPERSIÓN DE PM _{2.5} EN LA ZMVT, 2017.....	162
MAPA 23: CORRELACIÓN DE PM _{2.5} CON LOS VIENTOS EN LA ZMVT, 2017	164

Glosario de palabras clave

Abreviatura	Significado
AP	Aeropuerto
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
CA	Centro América
CB	Ceboruco
CE	Centro
CC	Cambio Climático
cc	Contaminantes criterio
CDMX	Ciudad de México
CICA	Centro de Información de la Calidad del Aire
CeMCAQ	El Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CORENA	Comisión de Recursos Naturales
DA	Diámetro Aerodinámico
DF	Distrito Federal
EMA's	Estaciones de Monitoreo Atmosférico

EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
ERNT	Enfermedades Respiratorias Crónicas No Transmisibles
FECYT	Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICA	Índices de Calidad del Aire
IDW	Ponderación de Distancia Inversa (Inverse Distance Weighting)
IRA	Infecciones respiratorias agudas
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
INE	Instituto Nacional de Ecología
IPOMEX	Información Pública de Oficio Mexiquense
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
MP	Material particulado
MT	Metepéc
Msnm	metros sobre el nivel del mar
NADF	Norma Ambiental para el Distrito Federal
NOM	Norma Oficial Mexicana
OMS	Organización Mundial de la Salud
OX	Oxtotitlán
Ppb	Partes por billón

PST	Partículas Suspendidas Totales
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
RAMAG	Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Guadalajara
RAMAT	Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
SEMADES	Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIMA	Sistema Integral de Monitoreo Ambiental
SINAIS	Sistema Nacional de Información en Salud
SC	San Cristóbal
SM	San Mateo
SMCA	Sistemas de Medición de la Calidad del Aire
UE	Unión Europea
ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Resumen

La contaminación atmosférica es un factor importante para la prevención de enfermedades respiratorias. Además de realizar las mediciones adecuadas para el monitoreo de la calidad del aire, es importante obtener una representación visual que pueda servir como apoyo al momento de mantener informada a la población de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y les permita a las autoridades tomar medidas de prevención.

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la interpolación de IDW, del promedio anual obtenido durante el año 2017 para cada uno de los contaminantes criterio medidos en la Red Automática de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT) y su relación con la velocidad y dirección del viento.

Con ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG) se establece la relación de los contaminantes con la dirección del viento, y factores antropogénicos como lo son las vías de comunicación y usos de suelos, con la transferencia de contaminantes criterio que modifican los niveles de concentración.

Abstract

Air pollution is an important factor in the prevention of respiratory diseases. In addition to making the appropriate measurements for the monitoring of air quality, it is important to obtain a visual representation that can serve as a support when keeping the population of the Metropolitan Area of the Toluca Valley informed and allow the authorities to take measures. prevention.

In this research work, the interpolation of IDW was carried out, of the annual average obtained during 2017 for each of the criteria pollutants measured in the Automatic Monitoring Network of the Metropolitan Area of the Toluca Valley (RAMA-ZMVT) and its relationship with wind speed and direction.

With the help of geographic information systems (GIS) the relationship of pollutants with wind direction is established, and anthropogenic factors such as communication routes and land uses, with the transfer of criteria pollutants that modify the levels of concentration.

Introducción

Siendo la contaminación ambiental la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, resulta primordial identificar el movimiento en la atmósfera de los contaminantes atmosféricos o contaminantes criterio (cc) los cuales son: ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), las partículas en suspensión cuyo diámetro es menor a 10 micras (PM_{10}), partículas en suspensión con diámetro menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y el plomo (Pb). con la finalidad de prevenir el bienestar de la población y de la vida vegetal o animal (SMA, 2018).

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo el análisis de la dispersión de los seis contaminantes criterio medidos por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) O_3 , CO, SO_2 , NO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el año 2017 mediante el método de interpolación IDW, y su relación con la dirección y velocidad del viento.

La contaminación del aire es uno de los principales problemas con el cual se enfrenta la sociedad, sin distinguir entre países desarrollados o países en desarrollo Salazar-Ávila (2008). Este problema no sólo se ve reflejado a nivel mundial, también se observa en un contexto nacional y regional; siendo ocasionado por actividades antropogénicas, o bien, por la dinámica natural del planeta. En este sentido, las consecuencias que han derivado de la contaminación atmosférica se han visto reflejadas en diversos problemas de salud en todo el mundo.

La ZMVT es una metrópoli, categorizada como de las principales zonas con mala calidad del aire a nivel nacional, el área no sólo ha sufrido un rápido desarrollo de las zonas Industriales de la ciudad también es una de las entidades federativas con un crecimiento poblacional importante, mediante el saldo neto migratorio, ubicado entre los más elevados de México (SMA, 2018) (INAFRED, 2010).

La ciudad de Toluca es una opción en cuanto a comunicación vial entre la zona Norte del país con la capital de la República Mexicana lo que crea una considerable afluencia vehicular que repercute sobre la calidad del aire de la ZMVT.

De igual manera, el aumento en el parque vehicular de la zona, resalta como uno de los principales factores que van la calidad del aire. Los niveles de contaminación atmosférica y el movimiento de las masas de aire se prevé contribuyen al incremento en los niveles de contaminación (SMA, 2018).

Las características climatológicas y orográficas del área son de relevancia debido a la presencia de un valle abierto en la ZMVT, la transferencia de contaminantes es beneficiada al disminuir un estancamiento de estos.

En el año 2002 en el Inventario de emisiones publicado por la Dirección General de Estadística e Información Ambiental estimo que todas las emisiones de contaminantes que se generan en un área determinada pueden ser emitidas por fuentes fijas (industrias, automóviles) y de fuentes naturales como el suelo desprovisto de vegetación; caso del uso de suelo de agricultura los cuales predominan en la localidad de San Cristóbal Huichochitlán en el Municipio de Toluca y el Municipio de San Mateo Atenco, ambas pertenecientes a la ZMVT, de acuerdo al compendio el suelo desprovisto de vegetación genero el 80% de las partículas suspendidas totales (PM₁₀ y PM_{2.5}) (Dirección General de Estadística e Información Ambiental, 2002).

El establecimiento de Sistemas de Medición de la Calidad del Aire (SMCA), han permitido que las autoridades ambientales de la mayoría de las grandes ciudades en el mundo enfrenten con éxito la problemática urbana de la contaminación atmosférica. (INE-SINAICA b, 2010).

Esquema de la investigación.

a) Justificación

El propósito más importante del monitoreo de la calidad del aire es generar y proporcionar la información necesaria a los tomadores de decisiones de los distintos sectores políticos, privados y sociales para que se elijan las decisiones a favor de la gestión y mejora del medio ambiente. El monitoreo juega un papel regulador en este proceso proporcionando la base científica para el desarrollo de las políticas y estrategias, en el establecimiento de objetivos durante la evaluación del cumplimiento de las metas y en la ejecución de las acciones (INE-SINAICA a, 2010).

En el presente trabajo de investigación se ha seleccionado el año 2017, después de analizar diferentes años y observar que la continuidad de los datos generados por la RAMA-ZMVT para cada una de las seis Estaciones de Monitoreo Atmosférico (EMA's); si bien en años anteriores se contaba con siete EMA's, en 2015 la estación de Aeropuerto (Ap) detuvo sus operaciones debido a que dejó de cumplir con los parámetros estipulados para su establecimiento y operación.

Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Se miden de manera continua los contaminantes criterio (cc): ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), las partículas en suspensión (PM_{10} y $PM_{2.5}$) (COFEPRIS c, 2017).

La importancia de obtener una representación visual respecto al comportamiento de los contaminantes permitirá mantener informada de una manera más oportuna a la población que vive en la zona de estudio. El desarrollo y mejoramiento de las tecnologías de medición e interpretación permite obtener imágenes que facilitarán el monitoreo del comportamiento de los cc en la extensión territorial de la ZMVT.

En el presente estudio se empleó la herramienta de Distancia Inversa Ponderada (IDW) del software ArcGis, asumiendo que los valores más cercanos están más

relacionados que otros con su función, se empleó esta técnica ya que cuando se le dan valores conocidos, la interpolación estima valores desconocidos.

La exposición del ser humano a los denominados cc, puede generar daños adversos a la salud de la población, principalmente a la población vulnerable quienes, de acuerdo con INEGI en 2014, son aquellos ciudadanos cuya edad es menor a 12 años y mayores de 60 años.

El suelo desprovisto de vegetación es el principal generador de PST (PM_{10} y $PM_{2.5}$) con un 80% de las mismas, lo cual es de considerarse ya que este uso de suelo se encuentra al Norte y al Este de la zona de estudio en las estaciones SC y SM respectivamente.

En el año 2017 se observan en los datos de la RAMA-ZMVT para cada una de las estaciones, expresados en zonas Norte, Centro y Sur, que al contar con una mayor cantidad de datos disponibles se puede obtener un análisis con un elevado índice de confianza.

El Cambio Climático (CC) es un problema de la sociedad que repercute en muchos aspectos de nuestra vida cotidiana, el incremento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), en la atmósfera afecta la salud de millones de personas (Sánchez-López, Cruz-Gutiérrez, Posada-Zamora, Torrijos M., & Osorio Lama, 2016).

Una de las funciones de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y del Instituto Nacional de Ecología (INE) es la generación de información científica y técnica sobre problemas ambientales, para informar a la sociedad, apoyar la toma de decisiones, impulsar la protección ambiental y promover el uso sustentable de los recursos naturales (INE-SINAICA a, 2010).

Actualmente el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC), es el organismo encargado del monitoreo atmosférico para la obtención de mediciones acerca de la contaminación atmosférica con el uso de las Redes Automáticas de Monitoreo Atmosférico en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT), esta zona metropolitana se encuentra conformada por 22 municipios aledaños a este municipio (COESPO, 2014).

El Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico (PNMA), tiene como objetivo: garantizar el diagnóstico y la vigilancia del estado de la calidad del aire a nivel nacional, para generar información real, válida y comparable entre los diferentes sitios y redes del país, y para ser un instrumento fundamental en el establecimiento de políticas ambientales de protección a la salud de la población y de los ecosistemas (INE-SINAICA a, 2010).

La adecuada medición de estos datos representa gran importancia al momento de su lectura ya que de no realizarse adecuadamente implicaría una interpretación errónea de los mismos, debido a los costos de estas “Estaciones de Monitoreo” se busca que la distribución de estos sea en puntos estratégicos para lograr de manera más eficiente su implementación.

Debido al tipo de información que generan los Sistemas de Medición de la Calidad del Aire (SMCA), éstos podrán intercambiar información con los sistemas de vigilancia epidemiológica que opere el Sector Salud a nivel local y/o nacional (INE-SINAICA b, 2010) y de esa manera ofrecer información oportuna sobre la calidad del aire que se tiene en la zona para que la población pueda tomar medidas preventivas hacia la salud.

b) Contribución de la propuesta

Con este estudio se pretende brindar una mejor interpretación visual de la calidad del aire, más representativa y con mayor incertidumbre sobre los denominados contaminantes criterio que fueron medidos en la ZMVT durante el año 2017 mediante los SIG empleando el método de interpolación IDW para así obtener una representación visual de mayor entendibilidad.

c) Objetivo general

Analizar la dispersión anual de los contaminantes criterio PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , SO_2 y CO , dentro de los valores máximos, mínimos y promedios anuales para la RAMA-ZMVT durante el año 2017, empleando la técnica de interpolación de IDW.

d) Objetivos particulares

- Revisar, ajustar y limpiar las bases de datos con base en las NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-022-SSA1-2010, NOM-023-SSA1-1993 y la NOM-025-SSA1-2014, respectivamente para cada contaminante.
- Integrar los valores estadísticamente válidos para calcular los procesos de interpolación de dispersión.
- Obtener las Rosas de los Vientos para las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT.
- Generar representaciones cartográficas de valores promedio anuales de cada uno de los contaminantes, así como los parámetros atmosféricos de velocidad y dirección del viento durante la prioridad anual del 2017.
- Relacionar las representaciones obtenidas por cada contaminante con la información vectorial de dirección y velocidad del viento.

e) Hipótesis

Se espera identificar con el análisis de la dispersión que las zonas con mayor afectación de los contaminantes sean las estaciones de monitoreo San Cristóbal localizada en la localidad de San Cristóbal Huichochitlán perteneciente a la ciudad de Toluca y la estación San Mateo la cual se localiza en el Municipio de San Mateo Atenco, debido a los tipos de usos de suelo que se presentan en la región y la zona en que se encuentra.

f) Planteamiento del problema

La contaminación atmosférica repercute directamente en la salud humana mientras lleva a cabo actividades al aire libre, deportivas, de recreación, en la vida cotidiana de cada poblador de la ZMVT; el diseño de esta investigación pretende mostrar de manera visual a la población mediante la elaboración de mapas como es que se están comportando los contaminantes criterio dentro del área de estudio. La Organización Mundial de la Salud (OMS), estima que la contaminación atmosférica en 2012, produjo 3.7 millones de muertes a causa de fuentes urbanas y rurales en todo el mundo (COFEPRIS a, 2017).

La contaminación del aire es uno de los principales problemas ambientales y de salud pública de México y del mundo. Es un fenómeno inherente al estado económico, poblacional y tecnológico de nuestro país, que tiene sus expresiones más graves en las grandes ciudades y las zonas fronterizas e industriales del territorio nacional. A su vez, la contaminación atmosférica es uno de los problemas más difíciles de comprender, evaluar, normar y controlar, entre otras causas, por la gran cantidad y variedad de las fuentes emisoras, la dilución y/o transformación de los contaminantes en la atmósfera y los efectos que tienen los contaminantes sobre la salud humana y los ecosistemas. Para medir y evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población y los recursos naturales, es indispensable contar con sistemas, redes y programas adecuados de medición de la calidad del aire bajo esquemas uniformes de operación y aseguramiento de calidad (INE-SINAICA a, 2010)..

Los contaminantes del aire, pueden 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 (INE-SINAICA b, 2010).

Debido a que los contaminantes criterio son significativamente riesgosos para la salud de la población es necesario que se tenga información clara y precisa sobre ellos, para esto, las Estaciones de Monitoreo Atmosférico (EMA's) se deben ubicar estratégicamente para obtener la situación más precisa al respecto, es por esto que se deberá buscar sitios óptimos de acuerdo al radio de influencia de 5 km que estas comprenden.

g) Pregunta de investigación

¿Al haber un informe visualmente entendible para la población en general, permitirá que las autoridades y la población de la ZMVT identifiquen con mayor facilidad la dispersión de los contaminantes?

h) Metodología

h.1 Alcance de la Investigación

Para determinar el alcance de la investigación se realizó predominantemente de manera cuantitativa para lograr determinar mediante representaciones cartográficas elaboradas mediante los SIG con la información de la RAMA-ZMVT, para eso se clasificaron los tipos de investigación; los cuales pueden ser exploratorios, descriptivos o correlacionales (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, & Pilar-Baptista, 2010).

Se pretende que la presente investigación sea:

h.1.1 Exploratoria

Puesto que el estudio realizado en esta investigación difiere de otros estudios realizados, esto la ubica dentro como una problemática particular y crear un antecedente para nuevos estudios.

Así mismo se pretende que la propuesta del presente trabajo sirva de complemento con las ya existentes redes se logre una mejora en la medición de los datos y de esta manera lograr una interpretación con mayor precisión de los cc a fin de prevenir daños a la salud humana.

h.1.2 Descriptiva

Debido a que se llevó a cabo la recolección datos y análisis de las condiciones físicas del área de estudio de las EMA's.

h.1.3 Correlacional

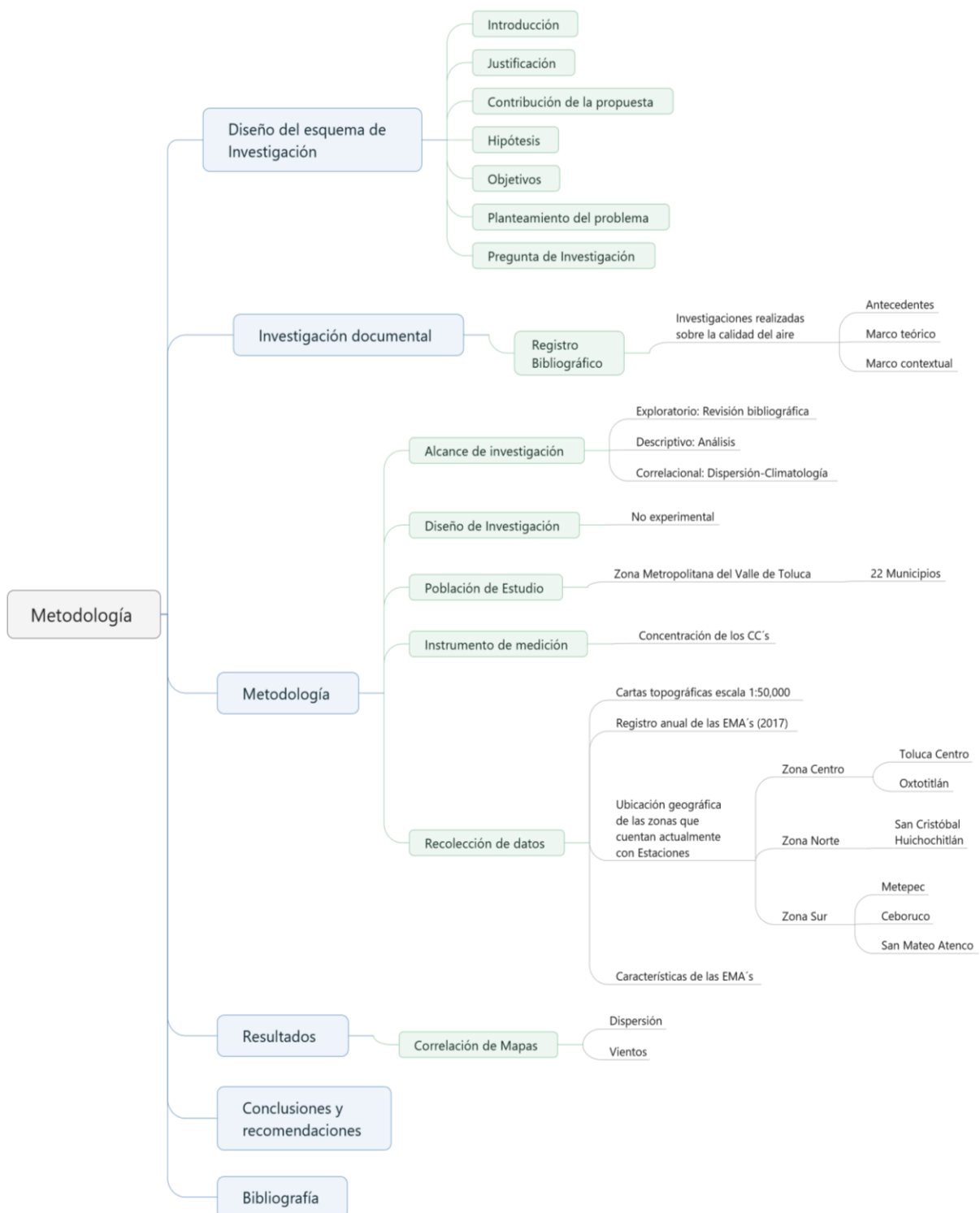
En vista de que se analizará el manejo, utilización, características e información generada de las EMA's así se buscará con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), correlacionar los niveles de concentración de los Contaminantes Criterio con el parámetro atmosférico de la dirección del viento.

h.2 Diseño de la investigación

Esta investigación se considera **no experimental** ya que no se tomarán en cuenta el manejo de las variables necesarias para llevarla a cabo; para esto se requerirá la

recopilación de datos de población en la zona de estudio, así como datos topográficos, y de relieve.

h.3) Diagrama de la investigación.

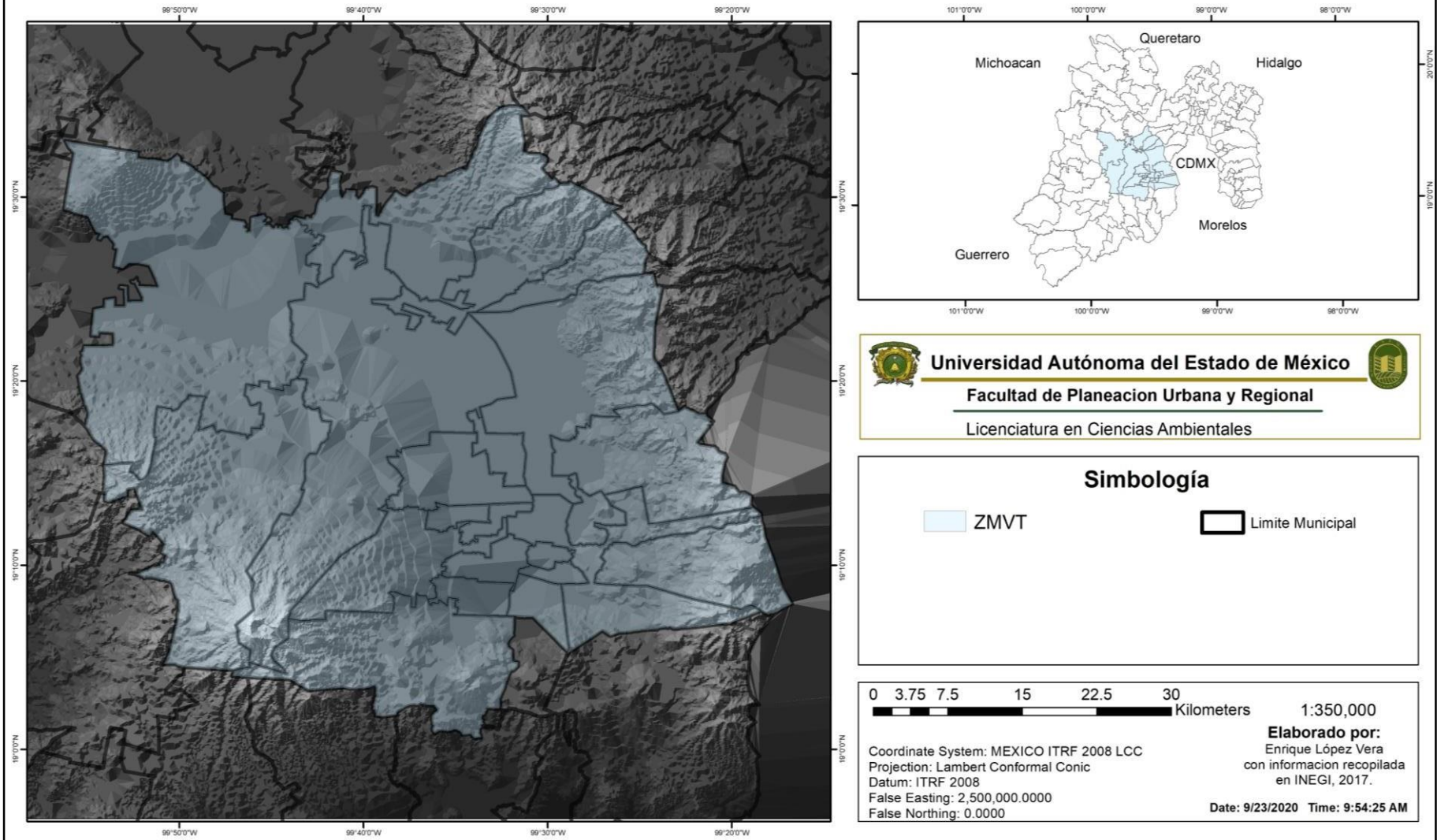


h.4) Población de estudio

La población de estudio corresponde a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) la cual está conformada por 22 municipios sin embargo únicamente son 3 los municipios en los cuales se encuentran distribuidas las Estaciones de Monitoreo Atmosférico (EMA's) y de éstos gracias al radio de afluencia que es de 5km a la redonda son 7 los municipios que cuentan con monitoreo atmosférico de la ZMVT (COESPO, 2014). Ver Mapa 1.

Mapa 1: Localización de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Localización de la Zona Metropolitana del Valle De Toluca (ZMVT)



h.5) Instrumento de medición

Debemos considerar que estos contaminantes ya se encuentran normados por las autoridades de la federación bajo las Normas Oficiales Mexicanas, este estudio se apegara a estas NOM's ya que en ellas se detallan los límites máximos permisibles las cuales dependiendo el contaminante datan desde 1993 hasta el año 2014.

h.5.1) Material Particulado

La NOM que se encarga de regular los límites permisibles del material particulado fue modificada en el año 2014, son las NOM-025-SSA1-2014 en la que cambiaron los valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas en el aire ambiente donde se modifican de los valores límite de las Partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), para efecto de la protección a la salud de la población más susceptible, quedando de la siguiente forma:

h.5.1.1) PM_{10}

Para el caso de las partículas suspendidas: las partículas menores a 10 micras (PM_{10}), su límite para el promedio de 24 horas cambia de 120 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramos por metro cúbico) y el promedio anual pasa de 50 a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

h.5.1.2) $PM_{2.5}$

Para las partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), el límite para el promedio de 24 horas pasa de 65 a 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el límite anual cambia de 15 a 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

h.5.2) Ozono

La NOM-020-SSA1-2014 que establecen los valores límites permisibles para la concentración de ozono en donde los cambios para la concentración horaria de ozono, el límite cambia de 110 partes por billón (Ppb) a 95 Ppb; para el promedio móvil de 8 horas de ozono el cambio es de 80 a 70 Ppb.

h.5.3) Monóxido de Carbono

Regulado bajo la NOM-021-SSA1-1993 fija el límite máximo permisible en 11 ppm y 12.595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio móvil en periodos de 8 hrs.

h.5.4) Dióxido de Azufre

Vigente en el año 2017 se encontraba la NOM-022-SSA1-2010 en la cual se fijaba el límite máximo permisible en 0.11 ppm y 288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en intervalos de medición de 24hrs de los cuales se debe cumplir al menos 18 hrs ya que es necesario tener el 75% de datos válidos.

h.5.5) Dióxido de Nitrógeno

Sin haber sufrido modificaciones desde su primera elaboración la NOM-023-SSA1-1993 es la que refleja los límites máximos permisibles de este contaminante los cuales son 0.21 ppm y 395 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en intervalos de medición de 1hr.

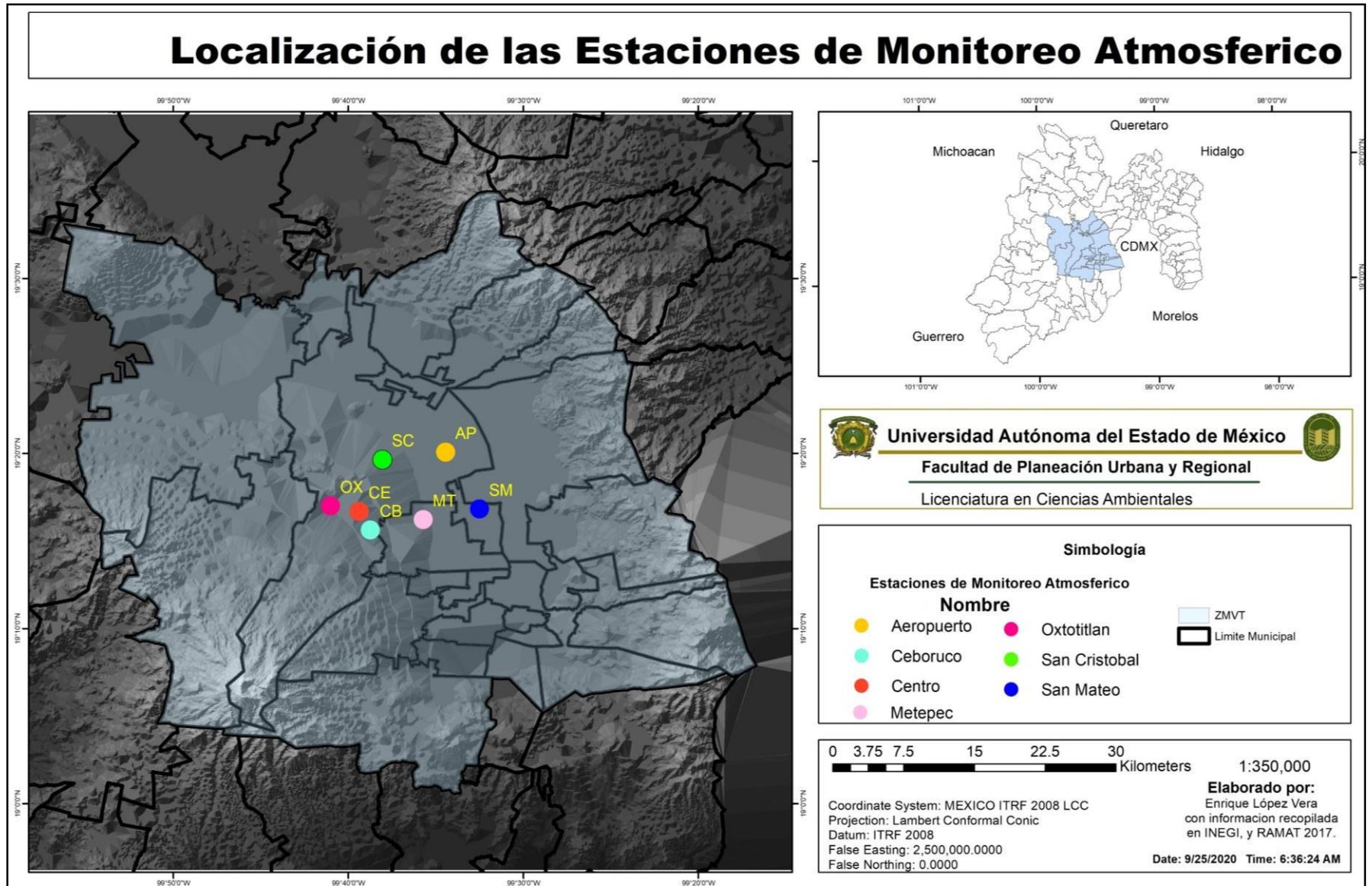
h.6) Recolección de datos

Se considera la información de ubicación geográfica de los municipios en los que se encuentran las EMA's; los cuales se dividen en 3 zonas:

Ver mapa 2.

1. Zona Centro: Toluca Centro y Oxtotitlán
2. Zona Norte: Aeropuerto y San Cristóbal Huichochitlán
3. Zona Sur: Metepec, Ceboruco y San Mateo Atenco

Mapa 2: Localización de las EMA's



h.7) Análisis estadístico

El análisis realizado se llevará a cabo con la recopilación y generación de información de los Sistemas de Información Geográfica modelándolos con el Programa ArcGis 10.4.2 a escala 1: 50,000 para así obtener información al respecto de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Capítulo 1. Antecedentes

Una evaluación de 2013 realizada por la Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS determinó que la contaminación del aire exterior es carcinógena para el ser humano, y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer, especialmente el cáncer de pulmón. También se ha observado una relación entre la contaminación del aire exterior y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga (COFEPRIS a, 2017).

En este capítulo se presentarán antecedentes históricos sobre las RAMA's, así como la importancia que tiene el estudio de la calidad del aire, y el uso de éstas para identificar los contaminantes de forma cuantitativa y cualitativa para la prevención de daños a la salud humana con la finalidad de identificar otros estudios realizados a fin de la Calidad Atmosférica.

1.1 Internacional

1.1.1 América

El primer apartado se centra en el continente americano para identificar qué estudios o análisis han sido elaborados referentes a la contaminación atmosférica, es importante mencionar que éstos fueron clasificados de acuerdo al país donde fueron publicados.

1.1.1.1 Brasil

En el año 2005 Bickel, realizó un estudio en la ciudad de Sao Paulo, Brasil donde tomó como punto de partida el año 1992, en el que ninguna ciudad de Centroamérica (CA), monitoreaba la calidad del aire; por medio de la recolección de datos identificó que a las fuentes móviles se les atribuye gran parte de la contaminación del aire de las áreas urbanas, pues los vehículos que utilizan tecnología obsoleta representan gran parte del total de la flota, estos problemas se incrementan por las condiciones climáticas y la topología local, por lo que en el año 2005, que fue presentado su trabajo identifica

que actualmente las capitales de CA, cuentan con un sistema base de monitoreo y poca importancia en las agendas políticas de los países analizados.

1.1.1.2 Chile

Carrasco en 2012, conjuntamente con Los Anales del Instituto de la Patagonia de la ciudad de Chile, elaboraron modelos de simulación climática en las latitudes polares del hemisferio Sur, particularmente en las zonas costeras del continente antártico, aquí se presencié un incremento en la temperatura del aire, finalmente mencionó la necesidad mantener en funcionamiento las Estaciones Antárticas para el Monitoreo de las modificaciones en el cambio climático es evidente para los estudios, no sólo de la variabilidad y el cambio climático, sino también para la predicción diaria y estacional.

Se analizaron las relaciones existentes entre temperaturas urbanas y concentraciones de material particulado a una escala que representa la totalidad de la ciudad de Santiago, destacando su división en dos zonas bien delimitadas, que ubicadas al oriente y poniente de la misma, durante los días de ocurrencia de las peores condiciones de contaminación atmosférica. A escala más detallada, que representa a tipos característicos de morfología urbana, se correlacionan los usos y coberturas de suelos con los niveles de vegetación y las temperaturas de las llamadas “sub zonas climáticas”, identificaron que es necesario mejorar la legislación en su país (Romero, Irrarázaval, Opazo, Salgado, & Smith, 2010).

1.1.1.3 Colombia

Se analizaron los registros contenidos en la red de monitoreo de la calidad del aire de el país de Colombia con lo que elaboraron una base de datos la cual se concentró para cuantificar calidad del aire en Bogotá, Colombia facilitando la observación de la información para concluir cómo la contaminación atmosférica de esta ciudad ha ido en aumento con el avance de los años (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007).

La Universidad Nacional de Colombia en convenio con el área metropolitana del Valle de Aburrá realizaron el estudio correlacional de SIG con el objetivo de fortalecer la manera de monitoreo de la calidad del aire del Valle de Aburrá, con el uso de 15 muestreadores pasivos de los contaminantes atmosféricos, fueron analizados durante 1 año, los cuales trabajaron con los activos ya instalados, gracias al uso de estos se

detectó la ineficacia de los medidores de Ozono debido a que éste no registraba correctamente los niveles del mismo (Zapata-Sánchez, Quijano-Hurtado, Molina-Vásquez, Rubiano-Hernández, & Londoño-Gaviria, 2008).

1.1.1.3 Ecuador

El material particulado con más recurrencia excede el límite permitido fijado en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, con el uso de gráficas se midieron los niveles de estos contaminantes ya que la compleja topografía añadida con la altura a la que se encuentra la ciudad de Quito, Ecuador una ciudad a 2800msnm, interfieren con una adecuada combustión de hidrocarburos provocando que los vehículos automotores realicen un mayor esfuerzo para vencer las pronunciadas cuestas, al finalizar el trabajo se consiguió medir los contaminantes en la ciudad (Díaz-Suárez & Páez-Pérez, 2006).

En el año 2011 Espinoza-Molina, realizó una investigación para la elaboración y diseño de un sistema de información geográfica para la Red de Monitoreo Ambiental de la ciudad de Cuenca, Ecuador con la recolección e integración del sistema de adquisición de datos y la elaboración de mapas determinó que durante ese año la Estación Automática con la que se cuenta, requiere la adquisición de los servidores y realizar el enlace para la transmisión de los datos, esto permitirá obtener los resultados en tiempo real.

1.1.1.5 Perú

En el año 1999, los asesores en contaminación del aire Marcelo Korc junto con Rodolfo Sáenz publicaron para el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente en Lima Perú, un informe en el que resumieron los esfuerzos realizados por varios países de América Latina en el monitoreo de la calidad del aire, concluyendo que éste es la única forma de conocer con certeza la existencia, de los problemas de contaminación del aire y la medición de sus contaminantes. En América Latina, sólo Brasil, Chile y México tienen ciudades con adecuadas capacidades de monitoreo. Sin embargo, dentro de estos mismos países existe una gran diferencia en la capacidad de monitoreo entre una ciudad y otra.

En 2016 Huamán-González y Pérez-Carpio, realizaron una investigación para identificar la calidad de aire en el sector Cercado y Los Jardines de la ciudad de

Tarapoto para identificar la evaluación de los gases de combustión de acuerdo a los Índices de Calidad del Aire (ICA), con la utilización de equipo y materiales de laboratorio en la Universidad Peruana Unión con el cual se obtuvieron muestras que posteriormente fueron enviadas al Servicios Analíticos Generales en la ciudad de Lima para su análisis, cuyos resultados arrojaron que la calidad del aire son aceptables de acuerdo con los valores Índice Nacional de Calidad de Aire sin presentar un riesgo para la salud humana.

En la ciudad de Lima, Perú se buscó determinar el método más apropiado para la medición de concentración de material particulado, mediante análisis geo estadístico de tres métodos: IDW, Spline y Kriging utilizando el Software ArcGIS, con el objetivo de identificar puntos de mayor concentración en la zona de estudio, después de realizar pruebas con estos métodos de análisis determinaron que el que resulta más adecuado en la evaluación de concentraciones de PM10 es el IDW (Interpolación lineal con la ponderación de la distancia inversa) la cercanía con los resultados reales de este parámetro y en cuanto a la percepción didáctica mostrada en los mapas elaborados con el programa, permitiendo evidenciar con mayor facilidad zonas de mayor y menor concentración de PM10 (Ramírez-Cando, Armijos, Crespo, Pino-Casignia, & Álvarez-Mendoza, 2018).

1.1.2 Europa

En un informe publicado en 2013 por la Agencia Europea de Medio Ambiente incluyeron una descripción general y un análisis de la calidad del aire en Europa, desde alrededor de 2002 hasta 2011. La calidad del aire sigue siendo una cuestión importante para la salud pública y el medio ambiente. Exponerse a la contaminación atmosférica supone, por lo general, la exposición a múltiples contaminantes, y la mala calidad del aire tiene graves consecuencias para la salud, pues contribuye a las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, a través de la recopilación de información identificaron que la mala calidad del aire también repercute en la economía, debido a los costes médicos y la pérdida de productividad, y en el medio ambiente, ya sea afectando directamente a la salud de los ecosistemas o influyendo en la calidad del agua y del suelo (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2013).

La Unión Europea lidera la acción medioambiental global desde hace unos cuarenta años. Se estudiaron y sintetizaron los resultados de cuatro décadas de aplicación de la agenda política ambiciosa y bien definida de la UE. Se trata tan solo de la punta del iceberg del conocimiento acumulado por la AEMA y su red, Eionet se identificó que las comunidades pequeñas basadas en una economía circular y en ecosistemas resilientes. El empeño por hacer realidad esta predicción puede colocar a Europa en la frontera de la ciencia y la tecnología, pero requiere un mayor sentido de urgencia y medidas más valientes. (AEMA, 2015)

Analizando la política ambiental implementada en la Unión Europea (UE) se logró ubicar que la calidad del aire ha mejorado en la UE a lo largo de las últimas décadas, gracias a los esfuerzos conjuntos de la UE y las autoridades nacionales, regionales y locales. Así el PIB de la UE ha crecido un 32 %, mientras que las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos han disminuido del 10 % al 70 % según la sustancia considerada, por lo que se piensa continuar implementando y optimizando las políticas de manera federal, estatal y local (Cómision Europea, 2018).

1.2 Nacional

Fue en el año de 1958 cuando la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) comenzó a realizar las primeras mediciones de la calidad del aire y sería 38 años después (1996) que se iniciaría formalmente con las investigaciones acerca de la contaminación atmosférica con la implementación de cuatro estaciones de monitoreo en Ciudad de México (SEMARNAT, 2018).

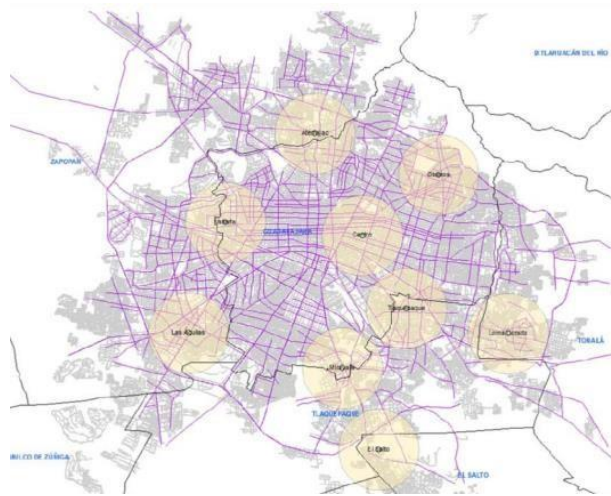
En 1973 se crea la "Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México" que disponía de 48 equipos de monitoreo (22 instalados en la Ciudad de México y el resto en otros estados del país), pero que ante el bajo presupuesto asignado, dejó de operar en 1978 (SEMARNAT, 2018).

1.2.1 RAMA-ZMVG (RAMAG)

De acuerdo con un informe oficial por parte de SEMDES elaborado en 2011 se describió que fue instalada 1993 la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), y a partir de noviembre de 1995 se cuenta con información ininterrumpida de calidad del aire y meteorología. Como se puede observar en la Figura 1.3 la RAMAG, como se le conoce a la red de monitoreo, cuenta con nueve estaciones fijas de monitoreo y una unidad móvil, ubicadas en los Municipios de:

Guadalajara (4), Tlaquepaque (1), Tonalá (1), Zapopan (2). Además, cuenta con seis pantallas informativas, localizadas en lugares de alto flujo vehicular y de población: Guadalajara (3), Tonalá (1), y Zapopan (2). Ver imagen 1.

Imagen 1: Ubicación de las Estaciones de Monitoreo de la RAMA-ZMG.



Fuente: (SEMADES, 2011).

Para su funcionamiento, la red cuenta con un centro de control, donde se recibe y concentra la información de los analizadores y sensores ubicados en cada estación de monitoreo, desde donde se emiten los reportes de calidad del aire dirigidos a la población, medios de comunicación e instituciones gubernamentales (SEMADES, 2011).

Imagen 2: Unidad Móvil de la RAMAG



Fuente: (SEMADES, 2011).

1.2.1.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la RAMA-ZMVG (RAMAG).

Con la elaboración de una modelación matemática para medir el intenso crecimiento industrial y demográfico, sin una planeación integral han dado lugar a un desarrollo ambientalmente desequilibrado y, como consecuencia, a índices inadecuados de calidad del aire, se obtuvo que existe una variación de manera no satisfactoria a mala casi 7 de cada 10 días al año lo cual causa una señal de alarma al ser Guadalajara la segunda ciudad más grande de México (Davydova-Belitskaya, Nickolaevich-Skiba, N. Bulgajov, & Martínez, 1999).

Debido a que el comportamiento del ozono urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) está influenciado por sistemas anticiclónicos que producen estabilidad atmosférica e intensa radiación solar Nájera-Cedillo, Márquez, Sanchez-Gomez & Corona en 2005 utilizaron los sistemas de información geográfica, aunados a las características geográficas y meteorológicas de la ciudad propician una atmósfera altamente foto-reactiva por lo que demostraron que se favorece la concentración de niveles altos de contaminantes atmosféricos en general y de ozono en particular que, con frecuencia, sobrepasa las normas de calidad del aire.

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) ha presentado problemas de contaminación ambiental y, en particular, la presencia de lluvias ácidas a raíz de un intenso desarrollo urbano e industrial. Por lo que se realizó un estudio para determinar la concentración de contaminantes depositados por agua de lluvia y para tal efecto, de esta forma se implementó una red pluviométrica con 17 estaciones distribuidas en la ZMG (García G., y otros, 2006).

Con el objetivo de demostrar el incremento de los contaminantes en la ZMG debido a que ha presentado un acelerado incremento Industrial-Urbano se analizó la concentración de dióxido de azufre (SO_2) y de nitrógeno (NO_2) en el aire, así como, los iones hidrógeno (H^+), sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-) durante la temporada de lluvias del año 2005 mediante el análisis de datos donde se observó que la tendencia ácida se debe a la contaminación atmosférica en la ZMG que modifica la composición natural de la lluvia. Las condiciones meteorológicas son variables de un temporal a otro, lo

cual justifica los valores diferentes de pH entre los temporales, así como los lugares donde ocurren las máximas concentraciones de acidez (García G., y otros, 2013).

En el año 2014 se buscó identificar el comportamiento de vientos y su influencia en la acumulación de contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de Guadalajara en el periodo 2001-2010. Se analizó la información del viento (magnitud y dirección) y de contaminantes atmosféricos (partículas menores a 10 micras, ozono, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y bióxido de azufre) de las ocho estaciones de monitoreo atmosférico del Gobierno de Jalisco. Los vientos dominantes se les determina vientos calma, que, vinculados al crecimiento urbano y al consumo de combustibles fósiles, influyen la calidad del aire generando ambientes nocivos para la población (García, y otros, 2014).

1.2.2 RAMA-ZMVM

Para el año de 1986, con la necesidad de vigilar la calidad del aire se crea la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico) que constaba de 25 estaciones para el monitoreo de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), óxido de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas y la medición de PM₁₀, a partir de 1998, así como incorporando en 1991 la instalación de 3 estaciones más de monitoreo en la periferia de la Ciudad de México y en 4 municipios del Estado de México (SEMARNAT, 2018).

El monitoreo que se realiza en la zona megalopolitana del Valle de México, abarca las 16 delegaciones de la Ciudad de México, así como 12 municipios conurbados del Estado de México, que son: Acolman, Atizapán de Zaragoza, Chalco, Coacalco de Berriozábal, Ecatepec de Morelos, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, Ocoyoacac, Tepotzotlán, Texcoco, Tlalnepantla de Baz y Tultitlán (SEMARNAT, 2018). Ver imagen 3.

Imagen 3: Delimitación de la ZMVM

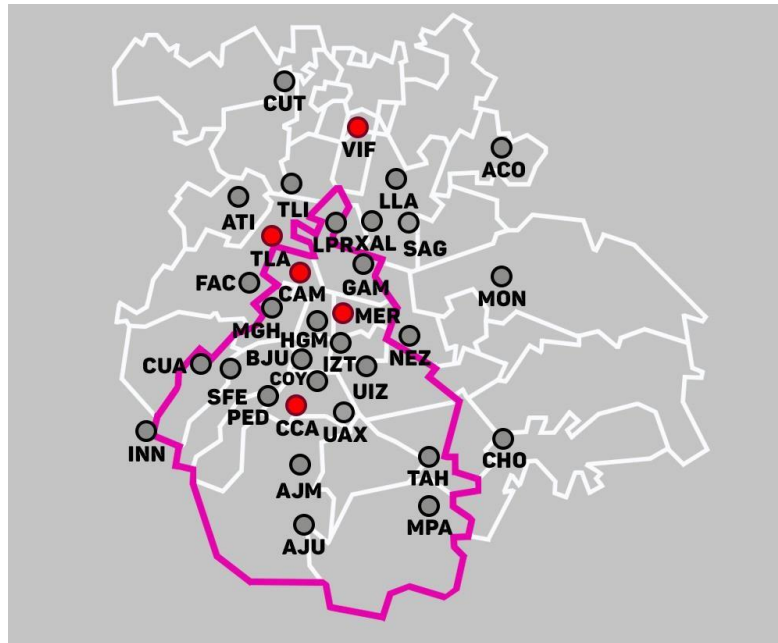


Fuente: (Vilerta, 2009).

La red de monitoreo atmosférico del Valle de México cuenta actualmente con 35 estaciones. De acuerdo a los datos obtenidos por Alto Nivel, los índices de contaminación más altos se encuentran en las estaciones de monitoreo de Camarones (CAM), Villa de las Flores (VIF), Tlalnepantla (TLA), Merced (MER) y Centro de Ciencias Atmosféricas (CCA). Por contaminante, éstas son las más afectadas (Molina, 2016).

En la imagen 4 se muestra la localización de las 35 Estaciones de Monitoreo Atmosférico de la ZMVM (tabla 1) y las que registran los más altos niveles de contaminantes (marcadas en rojo).

Imagen 4: Localización EMA's ZMVM



Fuente: (Molina, 2016)

Estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la ZMVM

Tabla 1: Estaciones de Monitoreo Atmosférico de la ZMVM

Clave	Nombre	Alcaldía o municipio	Entidad
ACO	Acolman	Acolman	Estado de México
AJU	Ajusco	Tlalpan	CDMX
AJM	Ajusco Medio	Tlalpan	CDMX
ATI	Atizapán	Atizapán de Zaragoza	Estado de México
BJU	Benito Juárez	Benito Juárez	CDMX
CAM	Camarones	Azcapotzalco	CDMX
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera	Coyoacán	CDMX

TEC	Cerro del Tepeyac	Gustavo A. Madero	CDMX
CHO	Chalco	Chalco	Estado de México
COR	CORENA	Xochimilco	CDMX
CUA	Cuajimalpa	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
CUT	Cuautitlán	Tepotzotlán	Estado de México
DIC	Diconsa	Tlalpan	CDMX
EAJ	Eco guardas Ajusco	Tlalpan	CDMX
EDL	Ex Convento Desierto de los Leones	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
FAC	FES Acatlán	Naucalpan de Juárez	Estado de México
FAR	FES Aragón	Nezahualcóyotl	Estado de México
GAM	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	CDMX
HGM	Hospital General de México	Cuauhtémoc	CDMX
INN	Investigaciones Nucleares	Ocoyoacac	Estado de México
IZT	Iztacalco	Iztacalco	CDMX
LPR	La Presa	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental	Gustavo A. Madero	CDMX
IBM	Legaría	Miguel Hidalgo	CDMX
LOM	Lomas	Miguel Hidalgo	CDMX
LLA	Los Laureles	Ecatepec de Morelos	Estado de México
MER	Merced	Venustiano Carranza	CDMX

MGH	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	CDMX
MPA	Milpa Alta	Milpa Alta	CDMX
MON	Montecillo	Texcoco	Estado de México
MCM	Museo de la Ciudad de México	Cuauhtémoc	CDMX
NEZ	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	Estado de México
PED	Pedregal	Álvaro Obregón	CDMX
SAG	San Agustín	Ecatepec de Morelos	Estado de México
SNT	San Nicolás Totolapan	La Magdalena Contreras	CDMX
SFE	Santa Fe	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
SAC	Santiago Acahualtepec	Iztapalapa	CDMX
SHA	Secretaría de Hacienda	Miguel Hidalgo	CDMX
TAH	Tláhuac	Xochimilco	CDMX
TLA	Tlalnepantla	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
TLI	Tultitlán	Tultitlán	Estado de México
UIZ	UAM Iztapalapa	Iztapalapa	CDMX
UAX	UAM Xochimilco	Coyoacán	CDMX
VIF	Villa de las Flores	Coacalco de Berriozábal	Estado de México
XAL	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	Estado de México

Fuente: Elaboración propia con datos de (Gobierno CDMX, 2019).

1.2.2.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la RAMA-ZMVM

Ezcurra en el año 1991, escribió un artículo en la Revista de Ciencias de la UNAM donde realizaba una descripción informativa del índice de calidad del aire el cual es la medida que se usa en la Ciudad de México para informar a la población acerca de los niveles de contaminación atmosférica; conocido como IMECA, el cual se basa en una metodología básica de cálculo, a partir de dos “puntos de quiebre”. Los puntos de quiebre son valores estadísticamente conocidos, por encima de los cuales ocurren alteraciones significativas en la fisiología de las poblaciones humanas.

Se analizó en la CDMX el comportamiento categóricamente: horario, estacional además de las tendencias anuales de la calidad del aire, mediante la interpretación de datos tomando como criterios las excedencias a las normas y los reportes del IMECA, para así identificar las tendencias y variaciones que permiten establecer los avances del tratamiento, las tendencias anuales que indican el deterioro de la calidad del aire, ésta es considerada según el número de días con exceso a las normas que se ha establecido entre 1988 y 1990 manteniéndose en aproximadamente un 80% de los días del año, se concluyó que de acuerdo a los reporte de la RAMA, se destaca un problema muy serio de partículas en las Zonas Noreste y Sureste de esta ciudad. (Sánchez, Quadri, Martínez, & Pérez, 1991).

Se estima que anualmente, la Ciudad de México expide a la atmósfera cerca de 5 millones de toneladas de contaminantes de los cuales destacan el bióxido de azufre (SO_2), el bióxido de nitrógeno (NO_2), los hidrocarburos aromáticos como el benceno, estos dos últimos precursores del ozono (O_3) los cuales son factibles de ser respirados y depositados en las vías aéreas (Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias, 2003).

Se propone el estudio del análisis de componentes principales en los datos de las mediciones de los contaminantes de la Ciudad de México con el objetivo de conseguir una representación más compacta de estos datos, para posteriormente aplicar técnicas de agrupamiento y con esto obtener factores que permitan la emisión de una

alerta sobre pre contingencia y contingencia (Sánchez-López, Cruz-Gutiérrez, Posada-Zamora, Torrijos M., & Osorio Lama, 2016).

Por parte de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios donde se explica cómo los contaminantes del aire cuentan con distinto potencial para generar daños sobre la salud humana, de acuerdo con el tipo de contaminante, sus propiedades físicas, químicas al igual que sus componentes, frecuencia, duración de exposición y su concentración, entre diversos factores más (COFEPRIS a, 2017).

1.2.3 SIMA-AMM.

El crecimiento del sector secundario en el estado de Nuevo León en la década de los cuarenta trajo consigo la concentración de la planta industrial en la ciudad de Monterrey. El mayor crecimiento de este sector se dio en la década de los sesenta debido, entre otros factores, a las estrategias de fomento industrial tales como precios bajos de energéticos, de energía eléctrica y de bienes y servicios. A la par de este dinamismo económico, hubo un intenso proceso de urbanización que trajo como resultado la consolidación del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) conformada por diez municipios. A finales de la década de los noventa estos municipios concentraron el 83% de la población estatal (SEMARNAT, 2012).

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) inició su operación a partir del 20 de noviembre de 1992 con la finalidad de contar con información continua y fidedigna de los niveles de contaminación ambiental en el Área Metropolitana de Monterrey. Así, desde esta fecha la población es informada todos los días del año de la calidad del aire que respiramos en el área metropolitana de Monterrey (SIMA, 2015).

En este proceso de desarrollo se observó un deterioro gradual de la calidad del aire, en el periodo comprendido de 1993 a 1996 las partículas menores de 10 micrómetros (PM_{10}) y el ozono (O_3) registraron frecuentes rebases a la norma de calidad del aire ambiente, hasta 15% de los días del año en el caso de las PM_{10} y de 7%, en el caso del O_3 (SEMARNAT, 2012).

En este contexto, el Plan Estatal de Medio Ambiente 1995-2020 estableció las directrices para desarrollar el Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 1997-2000. En dicho programa se establecieron 31

acciones con la meta de reducir una cantidad de 381 mil toneladas anuales de contaminantes (SEMARNAT, 2012).

Dentro de las acciones planteadas estaban: Ver tabla 2.

Tabla 2: Acciones y metas para reducir niveles anuales de contaminantes

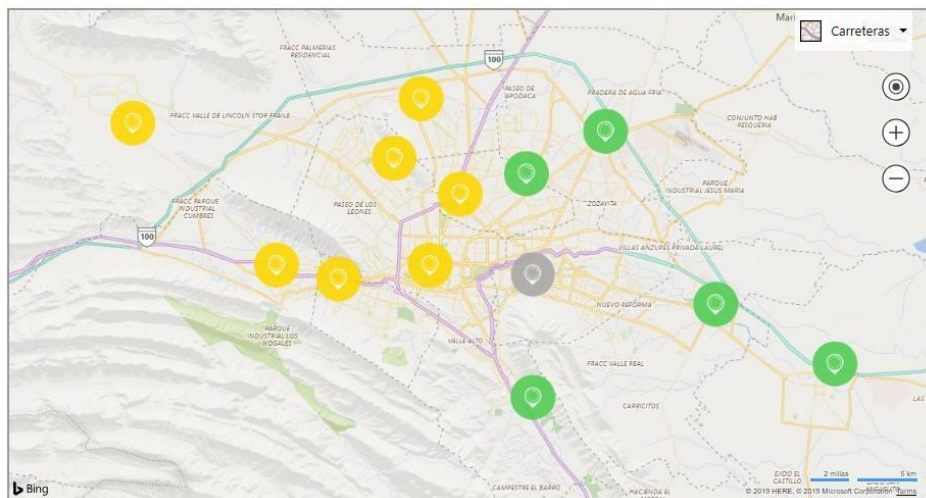
Establecimiento de convenios con las pedreras para controlar y reducir las emisiones de partículas.
Establecimiento de convenios con el sector industrial para controlar y reducir las emisiones de precursores de O ₃ , así como de partículas y óxidos de azufre.
Renovación de la flota vehicular de transporte público y conversión de unidades a gas natural.
Intensificación del programa de reforestación, pavimentación de calles y avenidas.
Diseño e implementación de un programa de respuesta a episodios de contingencia ambiental atmosférica.
Introducción de combustibles limpios para uso industrial y vehicular.

Fuente: Elaboración propia con información recolectada en (SEMARNAT, 2012)

El objetivo a cumplir en el año 2000 era alcanzar una reducción del 31% de las emisiones de partículas, del 76%, de dióxido de azufre (SO₂); del 30%, de NO₂; de 7% de hidrocarburos (HC) y de 6% de CO. Con estas reducciones respecto al año base se estimaba que el porcentaje de días que se rebasaba alguna de las normas de calidad del aire bajaría de 18% a 10% (SEMARNAT, 2012).

Actualmente se cuenta con 12 EMA's en la AMM. Ver imagen 5.

Imagen 5: Estaciones de Monitoreo Atmosférico en el Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: (SIMA, 2015).

1.2.3.1 Trabajos realizados en el SIMA-AMM

En el año 2002 Guajardo-Quiroga y Arrambide-Olvera analizaron los Índices de intensidad de contaminación atmosférica en el Área Metropolitana de Monterrey donde estimaron los índices de intensidad de generación para seis contaminantes del aire: partículas suspendidas totales (PST), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y plomo (Pb) en donde construyeron un modelo de insumo-producto que incorpora la interdependencia de la estructura económica y la generación de contaminación. Los resultados indican que los índices de intensidad de generación de contaminación derivados de los modelos de insumo-producto son una herramienta útil en la cuantificación del impacto de políticas ambientales reguladoras sobre los sectores económicos, tales como estándares y cargos por contaminar, así como el impacto de metas económicas sobre la generación de contaminación.

Para el 2015, la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental realizó una evaluación de Partículas Suspendidas $\text{PM}_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey donde eligieron tres sitios de la red de monitoreo del SIMA: Santa Catarina,

San Bernabé y San Nicolás, de acuerdo a los datos históricos de concentración de partículas de 2000 a 2009, que muestran que estos sitios frecuentemente presentan concentraciones elevadas de partículas suspendidas. Además, se buscó representatividad geográfica, ya que estos sitios se encuentran ubicados al Suroeste, Noroeste y Noreste, respectivamente.

Se identificaron las masas de la composición química, de los muestreos obtenidos con bajo volumen, resalta la mayor contribución del material cristal en las zonas de Santa Catarina y San Bernabé, sitios próximos a las colinas en donde se realizan actividades extractivas. Así mismo los sitios San Bernabé, San Nicolás y Ciudad Universitaria tienen mayor influencia directa de las emisiones de procesos de la industria metalúrgica que se ve reflejado en la mayor proporción de elementos traza.

1.3 Local: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT) (RAMAT).

En 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), misma que inició operaciones en 1993 y desde entonces es administrada por la Secretaría de Medio Ambiente del gobierno del estado.

A principios del año 2010, la RAMA de la ZMVT fue renovada en su totalidad. Además, 1 estación de monitoreo fue reubicada (Toluca-Centro) y se instaló una nueva estación: Ceboruco.

La red de monitoreo atmosférico Surge como un programa de vigilancia atmosférica vinculado con los siguientes objetivos:

1. Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire.
2. Crear las medidas necesarias para controlar la contaminación.
3. Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.
4. Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.

5. Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte.
6. Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
7. Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos.
8. Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

Imagen 6: Centro de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

1.3.1 Trabajos de investigación realizados con base en los datos de la ZMVT

Por medio de la investigación documental y cálculos de proyecciones se identificó que el gas contaminante con mayor distribución y concentración en Toluca y su área metropolitana es el monóxido de carbono, que al igual que el dióxido de azufre y el dióxido de carbono, es generado por la combustión automotriz y por el sector industrial en su mayoría (Hernández-Romero, Madrigal Uribe, & Morales Méndez, 2004).

Las partículas suspendidas en la atmósfera afectan el sistema respiratorio humano, además presentan un riesgo potencial cancerígeno debido a la gran cantidad de hidrocarburos que se quema en la atmósfera esto por la información proporcionada

por la Red Automática Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT) (Flores-Ruiz, y otros, 2009).

Considerando los procesos ambientales y el uso de las tecnologías de aerosoles, se estudió la caracterización de los bioaerosoles en la ZMVT, ya que por su fácil penetración al cuerpo humano a través de las vías respiratorias y por sus propiedades biológicas, pueden depositarse y causar infecciones o reacciones alérgicas a la salud, efectos tóxicos agudos, asma, enfermedades inflamatorias de pulmón y cáncer, con estudios de laboratorio se demostró que los bioaerosoles presentes en la ZMVT fueron de cinco tipos principalmente: microorganismos, polen, esporas, fragmentos y diatomeas, los cuales fueron aerotransportados y depositados por diferentes mecanismos para su análisis. Cabe señalar que los tamaños aerodinámicos de los bioaerosoles están por debajo de los 5 μm , en su mayoría, con efectos potencialmente adversos a la salud. (Gutiérrez-Reyes, Romero Guzmán, Reyes Gutiérrez, Sandoval Pérez, & Aguirre Campuzano, 2018).

Estos antecedentes sirvieron de referencia para conocer acerca de trabajos realizados previamente sobre contaminación atmosférica, contaminantes criterio y problemas hacia la salud de los pobladores, estos fueron investigados en los niveles internacionales, nacionales y locales. Sin embargo no se encontraron trabajos o alguna metodología sobre interpolaciones IDW que facilitara mediante representaciones visuales a identificar niveles y distribución de los cc en una determinada zona de estudio.

Capítulo 2. Marco Conceptual

En este capítulo se abordarán los conceptos que serán empleados en el presente trabajo, así como las relaciones que puedan tener entre sí.

2.1 Contaminación Atmosférica

El nombre de contaminación atmosférica se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perjudiciales sobre la salud de los seres vivos y los elementos materiales. La contaminación del aire, se puede definir como la presencia en la atmósfera de uno o más elementos, en cantidad suficiente, con ciertas características y una permanencia determinada, que pueda causar efectos indeseables tanto en el ser humano, la vegetación, los animales, las construcciones y los monumentos. Estos elementos pueden ser polvo, olores, humos o vapor (SMA, 2018).

2.2 Conceptos básicos

2.2.1 Medición

Medir es contar, comparar una unidad con otra, dar una valoración numérica, asignar un valor, asignar números a los objetos. Todo lo que existe está en una cierta cantidad y se puede medir. Estos números no se asignan de forma arbitraria, sino que se rigen por ciertas reglas, se establece un sistema empírico y éste da lugar a un sistema formal. La necesidad de medir es evidente en la mayor parte de las actividades técnicas o científicas. Sin embargo, es importante no sólo contar con medidas sino también saber si dichas medidas son válidas. Para ello se debe recordar la definición de medición como “el proceso por el cual se asignan números o símbolos a atributos de entidades del mundo real de tal forma que los describa de acuerdo con reglas claramente especificadas” (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2 Métodos de medición de la calidad del aire.

La medición de contaminantes atmosféricos se puede lograr a través de diversos métodos que se agrupan de acuerdo a sus principios de medición en:

- Muestreo pasivo.
- Muestreo con bioindicadores.

- Muestreo activo.
- Método automático.
- Método óptico de percepción remota.

(INE-SINAICA a, 2010)

2.2.2.1 Muestreo pasivo.

Este método de muestreo colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos (INE-SINAICA a, 2010).

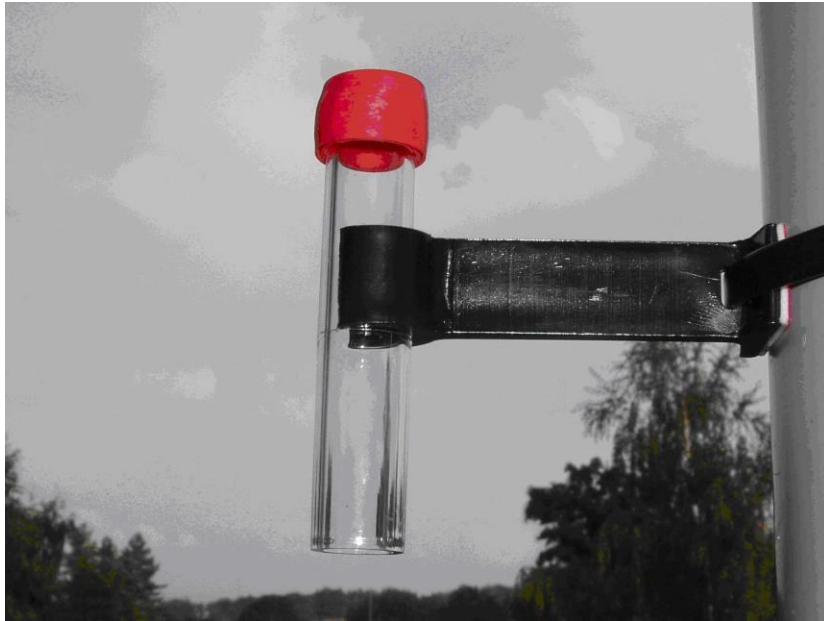
Son métodos de calidad aire confiables y costo efectivo. Son buenos indicadores de la concentración promedio de contaminación en periodos de semanas a meses. Se denomina muestro pasivo porque los equipos de muestreo no tienen sistema de bombeo alguno. (UDG, 2019).

2.2.2.1.1 Ventajas del muestreo pasivo.

Simplicidad en la operación y bajo costo (no requiere energía eléctrica) (INE-SINAICA a, 2010).

El mejor ejemplo de esta técnica son los tubos de difusión (ver imagen 7) que con un diseño simple emplean varias formulaciones de absorbentes apropiadas para un amplio rango de aplicaciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos (UDG, 2019).

Imagen 7: Tubos de difusión.



Fuente: (Icon Argentina, 2012).

2.2.2.1.2 Desventajas del muestreo pasivo.

No desarrollados para todos los contaminantes, sólo proporcionan valores promedios con resoluciones típicas semanales o mensuales; no tienen gran exactitud (sirven sólo como valor referencial), en general requieren de análisis de laboratorio (INE-SINAICA a, 2010).

2.1.2.2 Muestreo con bioindicadores.

Este método implica el uso de especies vivas generalmente vegetales, como árboles y plantas, donde su superficie funge como receptora de contaminantes. Sin embargo, a pesar de que se han desarrollado guías sobre estas metodologías, todavía quedan problemas no resueltos en cuanto a la estandarización y armonización de estas técnicas (INE-SINAICA a, 2010).

La técnica de los bioindicadores se basa en la sensibilidad que presentan algunas especies de plantas a ciertos contaminantes atmosféricos que permite identificar si se

cuenta con la presencia de estos elementos y así realizar un seguimiento a la contaminación atmosférica (Palacios, 2009).

Se ha mostrado gran interés en el uso de bioindicadores para estimar algunos factores ambientales entre los que se incluye la calidad del aire, particularmente en la investigación de sus efectos. Tal es el caso del uso de la capacidad de la planta para acumular contaminantes o la estimación de los efectos de los contaminantes en el metabolismo de la planta, o en la apariencia de la misma, entre otros (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2.2.1 Ventajas del muestreo con bioindicadores.

Muy bajo costo, útiles para identificar la presencia y efectos de algunos contaminantes.

2.2.2.2.2 Desventajas del muestreo con bioindicadores

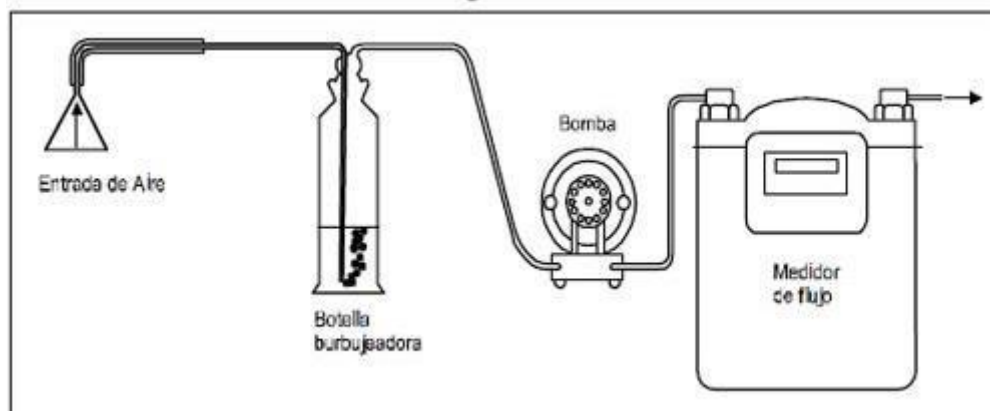
Problemas con la estandarización de las metodologías y procedimientos; algunos requieren análisis de laboratorio.

2.2.2.3 Muestreo activo

Requiere de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas) (INE-SINAICA a, 2010). Ver imagen 8.

Habitualmente cuentan con un colector el cual se remueve del sistema de bombeo y es más tarde analizado en el laboratorio. De manera general, el muestreo activo utiliza métodos físicos o químicos para coleccionar el aire contaminado (UDG, 2019).

Imagen 8: Equipo para el muestreo activo de un contaminante en una solución absorbente.



Fuente: (Martinez & Romien, 2011).

2.2.2.3.1 Ventajas de los muestreadores activos:

Fácil de operar, muy confiables y costo relativamente bajo (requieren energía eléctrica) (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2.3.2 Desventajas de los muestreadores activos

No se aprecian los valores mínimos y máximos durante el día, sólo promedios generalmente de 24 horas; requieren de análisis de laboratorio (INE-SINAICA a, 2010).

Para el buen funcionamiento de estos instrumentos se tienen que mantener limpios y libres de cualquier tipo de bloqueo, deberán ser calibrados antes de utilizarlos y de ahí en adelante ocasionalmente (Martinez & Romien, 2011).

2.2.2.4 Método automático.

Estos métodos son los mejores en términos de la alta resolución de sus mediciones, permitiendo llevar a cabo mediciones de forma continua para concentraciones horarias y menores. El espectro de contaminantes que se pueden determinar van desde los contaminantes criterio (PM_{10} - $PM_{2.5}$, CO , SO_2 , NO_2 , O_3) hasta tóxicos en el aire como mercurio y algunos compuestos orgánicos volátiles (INE-SINAICA a, 2010).

Imagen 9: Equipos de medición automáticos.



Fuente: (Fotografía propia tomada en trabajo de campo, 2019).

2.2.2.4.1 Ventajas de los métodos automáticos.

Valores en tiempo real con alta resolución dándonos concentraciones máximas y mínimas, permite por la detección de valores máximos en tiempo real establecer situaciones de alerta para implantar las respectivas medidas de contingencia (INE-SINAICA a, 2010).

Imagen 10: Software utilizado por las estaciones de monitoreo atmosférico.

Group	All Parameters	11:20 33 PST	11:19	11:15	10:00	11:15
Input Number	Parameter	Volts	Instantaneous Reading	1 Minute Average	5 Minute Average	Hour Average
01	O3 - PPM	0.565	0.056	0.057	0.056	0.047
02	PM10 - ug/m3	0.077	67	67	67	88
03	PM2.5 - ug/m3	0.036	25	25	25	41
04	NOx - ppm	0.220	0.022	0.022	0.023	0.032
05	NO - ppm	0.119	0.012	0.012	0.013	0.016
06	NO2 - ppm	0.108	0.011	0.011	0.011	0.017
07	SO2 - ppm	0.098	0.010	0.010	0.010	0.011
08	CO - ppm	0.043	0.430	0.429	0.459	0.595
09	TMPE - degC	14.848	23.2	23.0	23.1	21.2
10	HRE - %	9.888	39.4	41.2	41.0	47.2
11	VV - mts/s	0.035	1.75	1.21	1.86	1.50
12	DV - degA	0.584	210.2	262.4	290.7	193.1
13	PA - mmHg	1.554	567	567	567	567
14	TMPI - degC	8.376	27.3	27.3	27.1	26.9
15	HRI - %	9.080	31.8	31.7	31.5	31.9
16	PP - mm	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
17	RS - watts	0.517	913	911	909	766
Calc	WDV - DegC	0.000	210.2	263.8	287.0	186.9
Calc	WSV - DegC	0.000	1.8	1.0	1.3	0.8

Fuente: (Fotografía propia tomada en trabajo de campo, 2019).

2.2.2.4.2 Desventajas de los métodos automáticos.

Costo elevado de adquisición y operación; requieren personal capacitado para su manejo además de requerir mantenimiento y calibración constantes (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2.5 Método óptico de percepción remota.

La percepción remota (PR) ha sido definida de varias maneras. En general, la PR es un grupo de técnicas para recolectar información sobre un objeto o área si tener que estar en contacto físico con el objeto o área. Las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiados pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. Los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre aviones o sobre satélites (Von Martini, Bragachini, Bianchini, Martellotto, & Méndez, 2013).

Se basan en técnicas espectroscópicas. Transmiten un haz de luz de una cierta longitud de onda a la atmósfera y miden la energía absorbida. Con ellos es posible hacer mediciones, en tiempo real, de la concentración de diversos contaminantes. A diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto determinado en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m). Los equipos utilizados se conocen como sensores remotos (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2.5.1 Ventajas de los métodos ópticos de percepción remota.

Valores en tiempo real, alta resolución; útiles para mediciones de emisiones de fuentes específicas, de multicomponentes y para mediciones verticales en la atmósfera (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.2.5.2 Desventajas de los métodos ópticos de percepción remota.

Los sistemas de percepción remota tienen limitaciones relacionadas con su diseño, calibración y reparación. Los sensores deben ser calibrados previo a su uso. Se graba la respuesta de un sensor a un conjunto de radiaciones conocidas y se usa para interpretar la respuesta del sensor a las radiaciones medidas durante su uso (Von Martini, Bragachini, Bianchini, Martellotto, & Méndez, 2013).

Costo de adquisición muy elevado, requieren personal altamente capacitado para su operación y calibración, no son siempre comparables con los analizadores automáticos convencionales (INE-SINAICA a, 2010).

2.2.3 Análisis de muestras.

El análisis de las muestras es el método por el cual se determinan los componentes de una muestra, las concentraciones, y cualidades, de cada uno de ellos. Los métodos de medición que utilizan muestreadores, requieren por lo general que una vez que se ha muestreado el contaminante sea necesario analizarlo por alguno de los siguientes métodos:

- Métodos volumétricos
- Métodos gravimétricos.

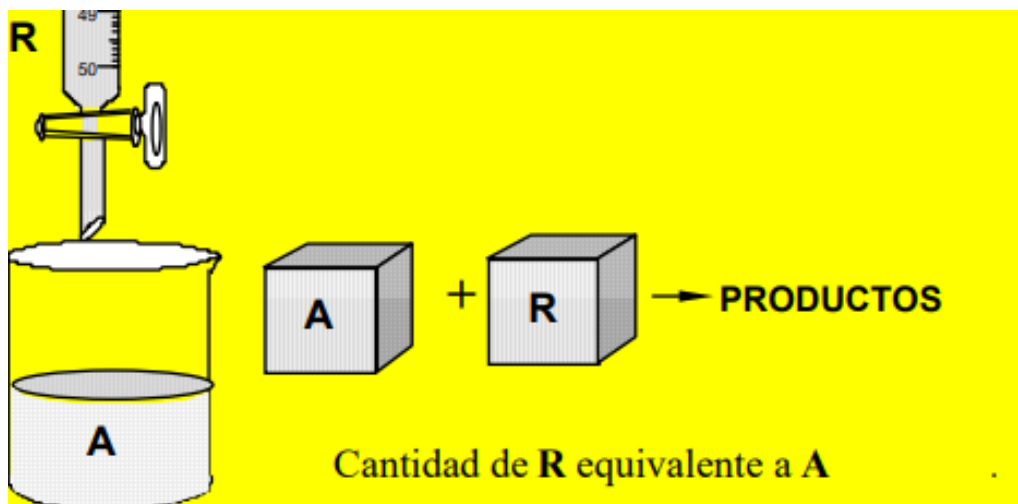
(INE-SINAICA a, 2010).

2.2.3.1 Métodos volumétricos

La cantidad del contaminante detectado se deduce del volumen de la solución que se ha consumido en una reacción. Estos métodos cuantifican muestras en solución mediante la valoración de las mismas por medio de técnicas como la titulación (INE-SINAICA a, 2010).

Para llevar a cabo una volumetría se añade un volumen, medido con gran exactitud, de una disolución cuya concentración se conoce (reactivo valorante), de modo que se produzca una reacción cuantitativa con el analito que se ajuste exactamente a una ecuación definida (González-Pérez , 2013). Ver imagen 11.

Imagen 11: Representación de los Métodos Volumétricos



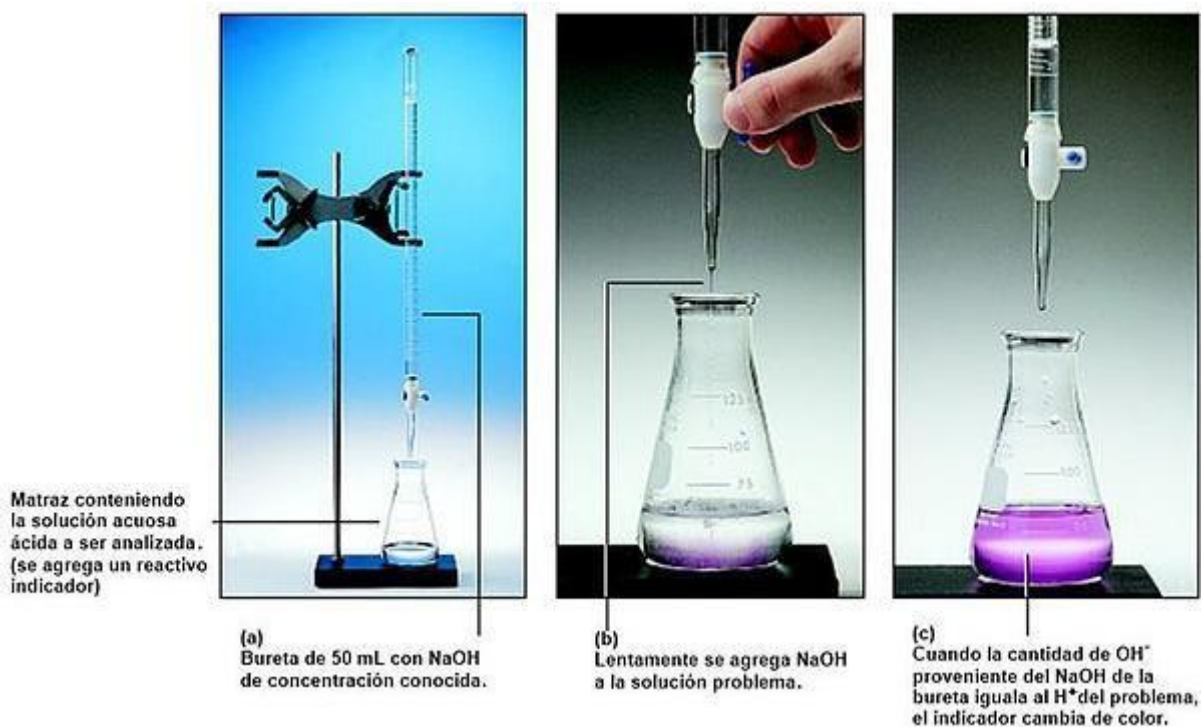
Fuente: (González-Pérez , 2013).

2.2.3.2 Titulación y valoración.

Es la técnica volumétrica que se utiliza para determinar la concentración de un soluto en un solvente, mediante la adición de un volumen de solución de concentración perfectamente conocida a la disolución. Es la acción y efecto de valorar o cuantificar una disolución. La valoración de una solución siempre será una titulación (INE-SINAICA a, 2010).

Valoración o titulación. Las valoraciones comprenden un grupo de métodos analíticos que se basan en determinar la cantidad de reactivo de concentración conocida que se necesita para reaccionar por completo con un volumen conocido de una solución de analito (González-Pérez , 2013). Ver imagen 12.

Imagen 12: Pasos para titular un ácido con una base



Fuente: (González-Pérez , 2013).

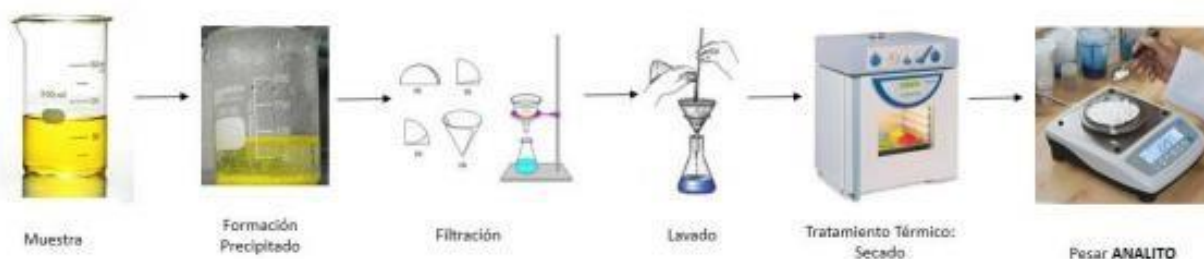
2.2.3.3 Métodos gravimétricos.

Son métodos cuantitativos que consisten en la determinación de la masa de un analito, presente en una muestra.

El analito se separa de la disolución de la muestra mediante la adición de un agente gravimétrico precipitante que reacciona de manera específica y selectivamente con el analito, para la formación de un precipitado insoluble de composición conocida. Este precipitado se filtra, se lava para garantizar la eliminación de impurezas solubles y por lo general se somete a tratamiento térmico adecuado para eliminar el solvente y otras especies químicas volátiles presentes. Posteriormente se pesa el producto final (Universidad de Santiago de Chile, 2016).

En los cuales las determinaciones de las sustancias se llevan a cabo por una diferencia de pesos, donde se determina la masa pesando el filtro, a temperatura y humedad relativa controladas, antes y después del muestreo. Existen métodos gravimétricos para conocer la concentración de una muestra en solución, en los que se llevan a cabo precipitaciones de las muestras por medio de la adición de un exceso de reactivo aprovechando el efecto del ion común (INE-SINAICA a, 2010). Ver imagen 13.

Imagen 13: Esquema de procedimiento en una gravimetría por precipitación.



Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2016).

2.2.4 Monitoreo atmosférico.

El monitoreo es una actividad consistente en observar una situación para detectar los cambios que ocurren con el tiempo. De esta forma, el monitoreo de la calidad del aire

se debe efectuar de una manera continua para poder observar los cambios en las concentraciones de los contaminantes con el tiempo, y se define como el conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire. Esto lo hace diferente al muestreo y análisis de contaminantes. Sin embargo, por lo común se confunden las dos actividades y casi siempre se habla sólo de monitoreo (INE-SINAICA a, 2010).

La actividad diaria de la ciudad genera una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural del aire. La quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía, tanto a nivel industrial como doméstico, produce miles de toneladas de contaminantes que diariamente son emitidos a la atmósfera. Los vehículos son la principal fuente de emisión, le siguen en importancia las fuentes de área, la industria, los hogares y las emisiones de fuentes naturales (biogénicas) (Aire CDMX, 2020).

2.2.4.1 Estaciones de Monitoreo.

Una estación de monitoreo consiste en una caseta que contiene, como se mencionó, diversos equipos, como 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. Los criterios de ubicación de las estaciones son diferentes según los objetivos de monitoreo que hayan sido establecidos en cualquier caso, es necesario que el lugar cuente con una fuente adecuada de energía, con seguridad y que esté debidamente protegido de los elementos climáticos (INE-SINAICA a, 2010).

En el monitoreo de los contaminantes criterio se utilizan equipos que cumplen con las características requeridas, para un método de referencia o método equivalente, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) y con las requeridas en la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante, en caso de que esté disponible. Esto asegura que se usen instrumentos capaces de

generar resultados reproducibles y trazables, con características técnicas evaluadas y aprobadas por una autoridad en el tema (Aire CDMX, 2020).

2.2.4.2 Redes de monitoreo.

Se denomina red de monitoreo al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo. Es común que las estaciones de monitoreo se encuentren agrupadas en redes que puedan cubrir grandes extensiones geográficas (INE-SINAICA b, 2010).

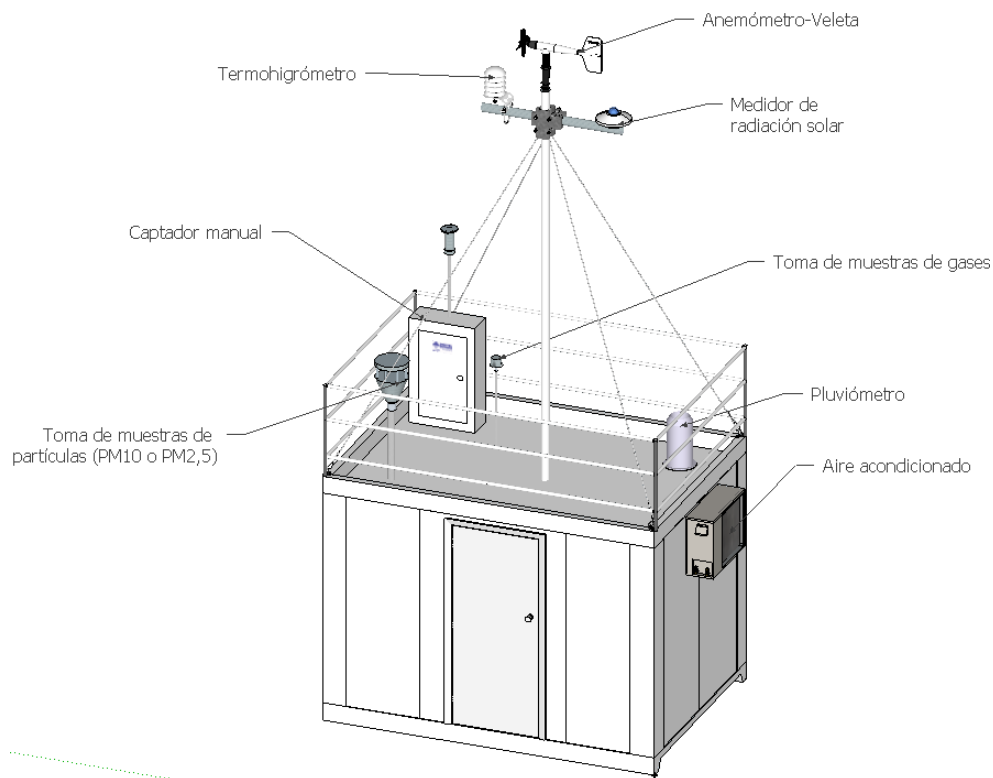
2.2.4.3 Redes de medición.

Una red de medición de la calidad del aire se conforma por el conjunto de dos o más estaciones de medición, las cuales pueden ser de monitoreo y/o muestreo. Para entender el comportamiento de los contaminantes y poder construir una base integral, correlacionada e histórica de datos, es recomendable que las estaciones estén complementadas con equipos de medición de parámetros meteorológicos. Por el tipo de instalación, las estaciones de medición de la calidad del aire y meteorológicas pueden ser fijas, semi-fijas o móviles (INE-SINAICA b, 2010).

2.2.4.3.1 Estaciones de medición fijas.

Se consideran fijas cuando los equipos de medición y/o muestreo son colocados en una edificación permanente (INE-SINAICA b, 2010). Ver imagen 14.

Imagen 14: Estación fija para la medición de la calidad del aire



Fuente: (Comunidad de Madrid, 2020).

2.2.4.3.2 Estaciones de medición semi-fijas.

Se refiere a cuando la estación de monitoreo consiste en una caseta prefabricada y es transportada al sitio de monitoreo, donde se ancla y conecta a la red de servicios y puede ser reubicada en caso de ser necesario (INE-SINAICA b, 2010).

2.2.4.3.3 Estaciones de medición móviles.

Por lo general motorizadas o remolcables, y se emplean sólo para campañas temporales, vinculadas a trabajos prospectivos o de investigación; a su vez, son auxiliares en caso de una falla en alguna estación fija o semi-fija; también pueden ser utilizadas cuando se presentan casos extraordinarios que afecten la calidad del aire, como pueden ser la erupción de un volcán, el accidente de una planta industrial, entre otros (INE-SINAICA b, 2010). Ver imagen 15.

Imagen 15: Estación de Monitoreo Atmosférico (Unidad móvil) de la RAMA-ZMVT.



Fuente: (Fotografía propia tomada en trabajo de campo, 2019).

2.2.5 Criterios a considerarse para la instalación de una Red de Monitoreo Atmosférico.

2.2.5.1 Actividades económicas y culturales en la Zona.

Las actividades en la zona pueden conocerse a partir de estadísticas y censos, tanto de población como industriales y, desde luego, mediante recorridos de campo. De las actividades en la zona depende básicamente el tipo de red que se debe instalar. Por ejemplo, si la actividad primordial es la industrial la medición se debe enfocar a este tipo de contaminantes; si es una zona puramente residencial se deben medir los contaminantes provenientes de emisiones vehiculares, de comercios y servicios (INE-SINAICA c, 2010).

2.2.5.2 Información meteorológica.

La información meteorológica es fundamental para establecer un diagnóstico de la calidad del aire en una localidad determinada, por lo que se recomienda establecer

contacto con los servicios meteorológicos de la zona de estudio (INE-SINAICA c, 2010).

Cada estación fija de calidad del aire consta exteriormente de:

Ver tabla 3.

Tabla 3: Componentes de una estación fija para la medición de parámetros meteorológicos.

Una torre meteorológica se encuentra dotada de los siguientes sensores:			
1	Dirección y velocidad del viento.	4	Humedad
2	Temperatura.	5	Radiación solar.
3	Presión barométrica.	6	Pluviómetro.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en (Comunidad de Madrid, 2020).

Es importante decir que los propósitos del servicio meteorológico pueden estar enfocados a otros que el de medir la calidad del aire, como: pronósticos del clima, apoyo al tráfico aéreo y servicios a la agricultura e hidrología. En este sentido, a pesar de que en algunos casos se pueda contar con información meteorológica, no siempre se podrá contar con información relacionada a la contaminación del aire (INE-SINAICA c, 2010).

Otros datos que se pudieran conseguir y serían útiles para un diagnóstico de la calidad del aire son la precipitación pluvial, períodos de insolación, humedad relativa y absoluta, así como la potencial formación de nieblas (INE-SINAICA c, 2010). Ver imagen 16.

Imagen 16: Sensores de dirección y velocidad de viento.



Fuente: (Casella: Monitoring and Measurement Equipment, 2020).

2.2.5.3 Información topográfica.

La topografía es un factor importante en la selección de los sitios de monitoreo por el efecto de ésta sobre los vientos locales y las condiciones de estabilidad. Hay muchos desarrollos urbanos y/o industriales que se han asentado en valles donde las condiciones favorecen la formación de inversiones térmicas, las cuales dificultan la dispersión de los contaminantes. Las ciudades construidas en terrenos accidentados presentan variaciones sustanciales de las concentraciones dentro del área urbana. En general, mientras más complejo sea el terreno se necesitarán más sitios de medición. Las montañas, los lagos y los océanos son otros aspectos geográficos que afectan la dispersión de los contaminantes (INE-SINAICA c, 2010).

Es indispensable mencionar que los contaminantes del aire se combinan con otros factores, como anomalías meteorológicas y la topografía para crear una atmósfera amenazante para la salud. A pesar de que el hombre es responsable del factor contaminación, la concurrencia de los otros factores es incontrolable (IDEAM, 2012).

De considerarse viento bajo (viento dominante) deberá ser por lo menos a 50 km viento abajo y 10 km viento arriba de fuentes como ciudades de más de 100,000 habitantes, rellenos sanitarios y tiraderos de basura de estas ciudades, fuentes de combustión industriales (hornos de cemento, fundidoras, plantas termoeléctricas, refinerías, entre otras) y pastizales (INE-SINAICA c, 2010). Ver tabla 4.

Tabla 4: Condiciones topográficas a considerarse.

1) Evitar condiciones topográficas y meteorológicas que no sean representativas de la zona.
2) Evitar su colocación a la orilla de un río, ya que se generan corrientes de aire descendentes.
3) Evitar su instalación en la cima de un monte, colado o valle, porque se producen vientos locales.
4) Que no haya edificios ni bardas alrededor de la estación, a fin de que el perímetro de la toma de muestra quede libre.
5) Seleccionar un sitio en el cual no existan corrientes de aire que propicien la acumulación de polvo y basura en el entorno de la estación.
6) Evitar la presencia de árboles ya que existe absorción de los contaminantes por las ramas u hojas.
7) Seleccionar un lugar donde las corrientes de aire características de la zona no sean afectadas por obstáculos, aún en el caso de un área urbana con edificios altos y medianos.
8) Que la estación no sea afectada de manera determinante por alguna fuente específica de emisión fija (incinerador, gasolinera, relleno sanitario, volcán, etc.).

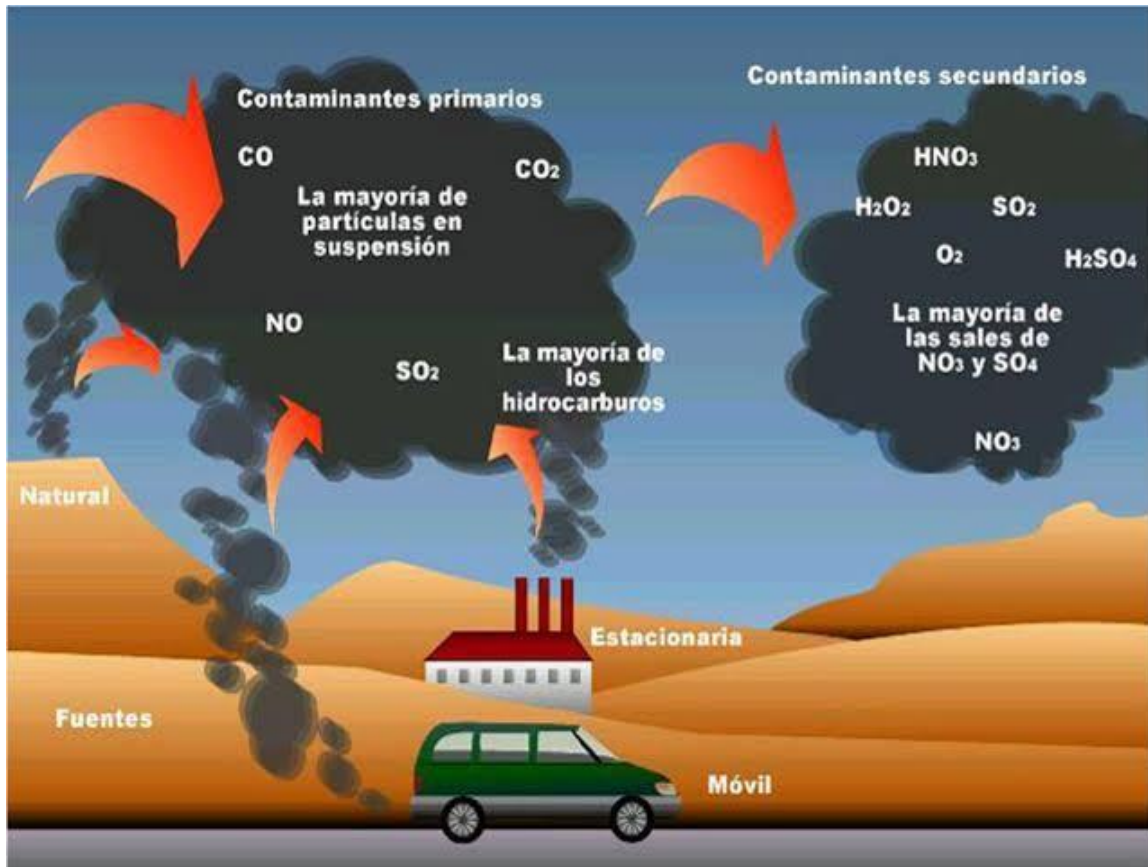
9) Será necesario guardar una determinada distancia a las calles, para evitar el impacto directo de las emisiones vehiculares.
10) Que sea mínima la dispersión de polvo fino proveniente de calles de grava o tierras de cultivo.
11) Que no sea afectada por la destrucción o inundación ocasionada por desastres naturales como huracanes o temblores.
12) Que el sitio donde se va a ubicar la estación de monitoreo cuente con buen drenaje,
13) Que no sea afectado por actos de vandalismo

Fuente: Elaboración propia con información recopilada en (INE-SINAICA c, 2010).

2.3 Contaminantes.

Los contaminantes pueden ser emitidos de manera natural, mediante los procesos de erosión del suelo, descomposición de materia orgánica, incendios forestales, y procesos volcánicos, entre otros. Los contaminantes emitidos por causa de las actividades del hombre son conocidos como contaminantes antropogénicos, y en su mayoría son resultado de la quema de combustibles fósiles. En este grupo de contaminantes están los que son producidos por: fuentes fijas (establecimientos industriales estacionarios), fuentes de área (conjunto de pequeños establecimientos industriales o comerciales), y fuentes móviles, vehículos automotores, que también incluyen aquellos que no circulan por carretera (INE-SINAICA a, 2010). Ver imagen 17.

Imagen 17: Contaminantes Atmosféricos.



Fuente: (Sin Autor, 2020) (<https://sites.google.com/site/problemayambiente/origen-y-tipos-de-contaminacion-atmosferica>),

2.3.1 Clasificación de los contaminantes de la Atmósfera.

2.3.1.1 Contaminantes criterio.

Los contaminantes del aire tienen distinto potencial para producir daños sobre la salud humana, dependiendo del tipo de contaminante, de las propiedades físicas y químicas de sus componentes, la frecuencia, duración de exposición y su concentración, entre otros factores. De manera genérica se establece que la capacidad de un contaminante para producir un efecto en la salud depende fundamentalmente de dos factores como lo son la magnitud de la exposición y la vulnerabilidad de las personas expuestas. La magnitud de la exposición está en función de la concentración del contaminante en la atmósfera, de la duración de la exposición y de su frecuencia. La vulnerabilidad de las

personas expuestas es significativamente diferente, algunos grupos de población son más sensibles o vulnerables que otros a la contaminación del aire, que obedece a factores intrínsecos, como la genética, etnia, género y edad; y a factores adquiridos como las condiciones médicas, acceso a los servicios de salud y nutrición. Los efectos en la salud pueden clasificarse en efectos agudos y, efectos crónicos sin la inclusión de cáncer y efectos cancerígenos (COFEPRIS a, 2017).

En la tabla 5 se muestran algunos de los efectos a la salud debidos a la exposición a los contaminantes criterio mencionados.

Tabla 5: Efecto de contaminantes criterio sobre la salud.

Contaminante	Efecto a la Salud
Ozono	Irritación ocular y en las vías respiratorias.
Monóxido de carbono	Formación de carboxihemoglobina ocasionando apnea.
Partículas suspendidas	Irritación en los tejidos respiratorios, fibrosis y asma.
Bióxido de azufre	Irritante (garganta y bronquios), bronco constricción, alteraciones en la función pulmonar.
Bióxido de nitrógeno	Disminución en la capacidad de difusión pulmonar

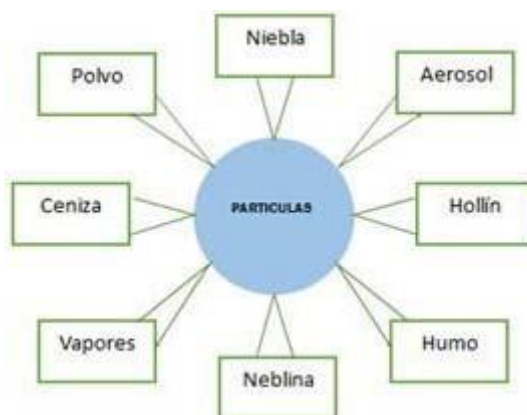
Fuente: Elaboración propia con información recuperada en (INE-SINAICA a, 2010).

2.3.1.1.1 Partículas Suspendidas Totales (PST), menores a 10 Micras (PM₁₀) y menores a 2.5 Micras (PM_{2.5}).

Las partículas más dañinas para la salud son las de 10 micrómetros de diámetro, o menos (\leq PM₁₀), que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los

pulmones. La exposición crónica a las partículas agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón (COFEPRIS b, 2017).

Imagen 18: Partículas suspendidas.



Fuente: (SMA, 2018).

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM_{10} por metro cúbico (m^3) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos (μ)/ m^3 . Cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se notifican también las concentraciones de partículas finas ($PM_{2.5}$ o más pequeñas) (COFEPRIS b, 2017).

Las partículas suspendidas forman una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. Su tamaño varía desde 0.005 hasta 100 μm de diámetro aerodinámico (da), esto es, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano. Las partículas de diámetro mayor a 100 μm no pueden mantenerse en suspensión (son partículas sedimentables), por lo que sólo se consideran como contaminantes del aire a las partículas menores a 100 μm . (SMA, 2018).

Las partículas pueden tener un origen antropogénico o natural. De forma natural provienen de erupciones volcánicas, tormentas de polvo (tolvaneras), incendios forestales o rocío marino. De forma antropogénica provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles. (Secretaría de Medio Ambiente, 2018).

Las partículas se han estratificado en función de su tamaño y en su habilidad de penetración y depósito en los pulmones. Las partículas con diámetros mayores de 10 μm se depositan casi exclusivamente en la nariz y garganta; las PM_{10} , también llamada fracción torácica o inhalable, puede penetrar y depositarse a lo largo del tracto respiratorio y las partículas finas $\text{PM}_{2.5}$ llegan a los bronquiolos respiratorios y región alveolar, por lo que se les conoce como partículas respirables. La fracción más gruesa se deposita por sedimentación, mientras que la fina, por difusión (SMA, 2018).

De acuerdo a lo mencionado en el 2018 por la Secretaria de Medio Ambiente (SMA) se considera que actualmente se considera que las partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ son un mejor indicador de calidad del aire que las partículas suspendidas totales (PST).

2.3.1.1.2 Ozono (O_3).

El ozono a nivel del suelo que no debe confundirse con la capa de ozono en la atmósfera superior es uno de los principales componentes de la niebla tóxica. Éste se forma por la reacción con la luz solar (fotoquímica) de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) procedentes de las emisiones de vehículos o la industria y los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por los vehículos, los disolventes y la industria. Los niveles de ozono más elevados se registran durante los períodos de tiempo soleado (COFEPRIS b, 2017).

Tabla 6: Diferencia entre Capa de Ozono y Ozono como contaminante.

CAPA DE OZONO	También llamada ozono estratosférico, es un cinturón de gas ozono natural que actúa de forma benéfica absorbiendo la dañina radiación UV proveniente del sol, para evitar que llegue a la superficie de la Tierra y dañen nuestra salud y la de los animales.
OZONO	Conocido como ozono troposférico por ubicarse en la tropósfera. Perjudica tanto a la salud humana y animal, como al medio ambiente.

Fuente: Elaboración propia con información recolectada en (Expansión, 2017).

2.3.1.1.3 Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Es importante mantener informada a la población sobre el Dióxido de Nitrógeno ya que este afecta los pulmones, inhibiendo algunas funciones de los mismos (Expansión, 2017).

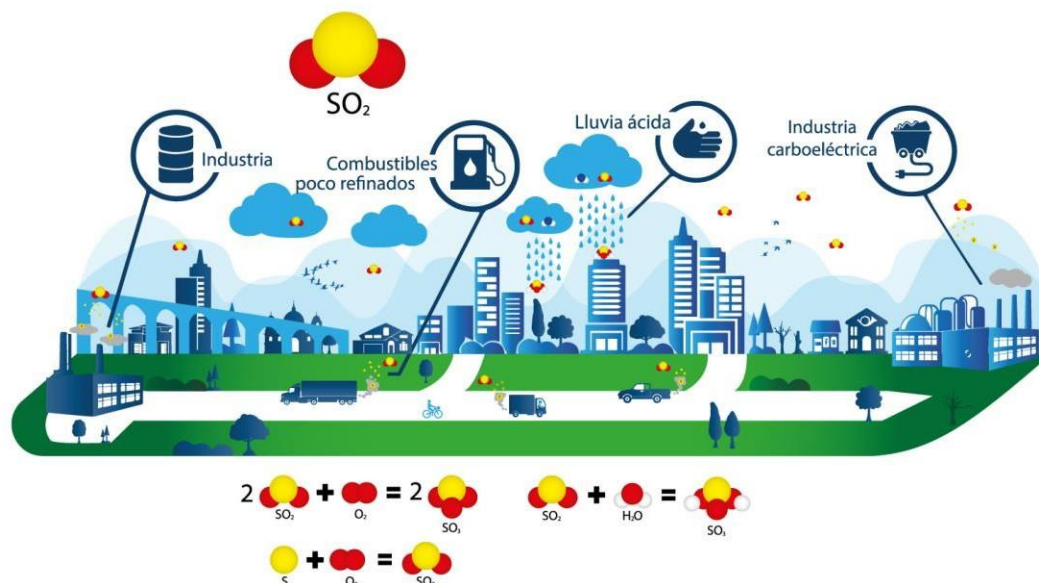
Como contaminante atmosférico, el NO₂ puede correlacionarse con varias actividades, dado que en concentraciones de corta duración superiores a 200 mg/m³, es un gas tóxico que causa una importante inflamación de las vías respiratorias así mismo es la fuente principal de los aerosoles de nitrato, que constituyen una parte importante de las PM_{2.5} y, en presencia de luz ultravioleta, del ozono. Las principales fuentes de emisiones antropogénicas de NO₂ son los procesos de combustión (calefacción, generación de electricidad y motores de vehículos y barcos) (COFEPRIS b, 2017).

2.3.1.1.4 Dióxido de Azufre (SO₂).

El Dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro e irritante contaminante del aire. Además del dióxido de azufre, el aire ambiental puede estar contaminado con otros óxidos de azufre, trióxido de azufre (SO₃) por ejemplo, pero el dióxido de azufre es el componente mayoritario y por lo tanto es la especie química que se usa como indicador del grupo de óxidos de azufre, referido comúnmente como SO_x. El dióxido de azufre no es

inflamable, ni explosivo, es muy soluble en agua y es más denso que el aire ambiental (CeMCAQ, 2017). Ver imagen 19.

Imagen 19: Dióxido de Azufre



Fuente: (CeMCAQ, 2017) ([http://www.cemcaq.mx/contaminación/Dióxido -de-azufre-so2](http://www.cemcaq.mx/contaminación/Dióxido-de-azufre-so2))

2.3.1.1.5 Monóxido de Carbono (CO).

El monóxido de carbono (CO), es un gas inodoro e incoloro que se produce por la combustión incompleta de compuestos de carbono, consecuentemente pueden verterlo al aire los vehículos automotores y la industria, aunque en menor escala; algunos procesos naturales son capaces de emitirlo, tales como los incendios forestales o su emisión de los procesos naturales que se llevan a cabo en los océanos. Mención especial debe hacerse de la acumulación intramuros por procesos domésticos y el hábito de fumar (Secretaría de Salud, 1994).

2.4 Indicadores de desarrollo sustentable

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Instituto Nacional de Ecología (INE)/SEMARNAP se congratulan en presentar los resultados

del trabajo conjunto sobre **Indicadores de Desarrollo Sustentable** en México, cuyos objetivos son, por un lado, proporcionar a los expertos y al público en general un conjunto de indicadores que contribuyan tanto al conocimiento de la problemática de sustentabilidad como a apoyar el diseño de las estrategias y políticas de desarrollo sustentable en nuestro país, y por otro, sentar las bases metodológicas que permitan continuar el trabajo de elaboración y actualización de dichos indicadores (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2000).

2.5 Población sensible.

La susceptibilidad a la exposición de contaminantes del aire varía entre un individuo y otro. Factores como el medio ambiente, los hábitos alimenticios y la carga genética pueden provocar vulnerabilidad hacia diversas patologías. En este sentido en personas de 0 a 13 años y de 65 y más, el riesgo es mayor a padecer enfermedades respiratorias a consecuencia de la contaminación atmosférica y por tanto se debe tener un especial interés en los programas de gestión de la calidad del aire por sus implicaciones en los sistemas de salud y seguridad social (GEM, 2012).

2.6 Sistemas de información geográfica.

Los sistema de información geográfica (SIG) un conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real (INEGI, 2014).

Por lo que son un conjunto de mapas, de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas (INEGI, 2014).

Los SIG se emplean describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas (ESRI, 2019).

Resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas, para obtener un mejor conocimiento de la zona de interés (INEGI, 2014).

2.6.1 Ráster.

En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados (Esri, 2016).

2.6.2 Métodos de interpolación.

La interpolación es la función matemática que consiste en poner determinados valores de manera secuencial para así lograr predecir valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Los usos más comunes en los que puede utilizarse llegar a utilizarse para prever valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico son:

- Elevación.
- Precipitaciones.
- Concentraciones químicas.
- Niveles de ruido.

(Esri, 2018).

2.6.2.1 Kriging.

Kriging es un procedimiento geo estadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z . Aún más que con otros métodos de interpolación, se debe realizar una investigación profunda del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida (Esri, 2018).

2.6.2.2 Vecino natural.

La interpolación de Vecino natural halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área" (Esri, 2018).

2.6.2.3 Spline.

La herramienta Spline utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (Esri, 2018).

2.6.2.4 Spline con barreras.

La herramienta Spline con barreras utiliza un método similar a la técnica usada en la herramienta Spline, pero la principal diferencia es que esta herramienta distingue las discontinuidades codificadas tanto en las barreras de entrada como en los datos del punto de entrada (Esri, 2018).

2.6.2.5 De topo a ráster.

Las herramientas De topo a ráster y De topo a ráster por un archivo utilizan una técnica de interpolación diseñada específicamente para crear una superficie que representa con mayor precisión una superficie de drenaje natural y preserva mejor los cordones montañosos y las redes de arroyos de los datos de curvas de nivel de entrada (Esri, 2018).

2.6.2.6 Tendencia.

Tendencia es una interpolación polinómica global que ajusta una superficie suave definida por una función matemática (polinómica) a los puntos de muestra de entrada. La superficie de tendencia cambia gradualmente y captura patrones de escala sin detallar en los datos (Esri, 2018).

2.6.2.7 IDW.

La herramienta IDW (Inverse Distance Weighting/ Ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio (Esri, 2018).

El IDW estima valores desconocidos al especificar la distancia de búsqueda, los puntos más cercanos, el ajuste, además utiliza la auto correlación espacial en sus matemáticas. Los valores más cercanos tienen más efecto, mientras que los más lejanos tienen menos efecto. El método de interpolación de ponderación de distancia inversa es muy flexible. Pero a diferencia del kriging que obtiene modelos más robustos (GIS Geography, 2017).

Otra ventaja sobre que tiene el IDW sobre el Kriging es que para lograr una adecuada estimación se debe tomar un gran número de puntos de medición lo cual representaría incrementar los costos de operación y mantenimiento (Murillo, Ortega, Carrillo, Pardo, & Rendón, 2012).

2.7 Climatología.

La dinámica e interacción entre la litosfera, la atmósfera y la hidrósfera influye directamente en los diferentes climas presentes en la Tierra. El tiempo atmosférico es el estado de la atmósfera en un lugar y en un momento determinado; mientras que el clima es el estado promedio de la atmósfera a lo largo de un período de tiempo mayor, generalmente registrado durante meses o años (Rodríguez-Jiménez, Benito-Capa, & Portela-Lozano, 2004).

La meteorología y la climatología se dedican al estudio del tiempo atmosférico y del clima, respectivamente, a través de la observación, del registro y del análisis de elementos como la temperatura, la humedad, la precipitación y la presión atmosférica. Sirven para conocer el estado del tiempo atmosférico y las condiciones climáticas de un lugar determinado (Rodríguez-Jiménez, Benito-Capa, & Portela-Lozano, 2004).

2.7.1 Instrumentos Meteorológicos.

De acuerdo con Rodríguez-Jiménez, Benito-Capa, & Pórtela-Lozano, 2004 los instrumentos que se suelen utilizar para la recolección de datos son:

2.7.1.1 Anemómetro.

Es un aparato que se utiliza para la predicción del tiempo y mide la velocidad del viento.

2.7.1.2 Barómetro.

Es el aparato con que se mide la presión atmosférica y son fundamentales para las predicciones atmosféricas.

2.7.1.3 Pluviómetro.

Con este instrumento se recogen y miden en las estaciones atmosféricas las precipitaciones caídas en forma de lluvia, nieve o granizo, durante un período de tiempo determinado.

2.7.1.4 Termómetro.

Permite conocer la temperatura que hay en un momento determinado. Se recoge en las estaciones meteorológicas al menos una vez al día y señala las temperaturas máximas y mínimas que se dan a lo largo del día. Con estas dos temperaturas, se puede calcular la temperatura media (Rodríguez-Jiménez, Benito-Capa, & Portela-Lozano, 2004).

2.7.1.5 Veleta.

Indica la dirección del viento. Se suele colocar en lugares elevados y dispone de una cruz horizontal con los puntos cardinales.

2.7.2 Elementos del clima.

Los elementos del clima son los fenómenos meteorológicos que se producen en la atmósfera y explican tanto el tiempo como el clima de un lugar, los cuales son descritos por (Rodríguez-Jiménez, Benito-Capa, & Portela-Lozano, 2004) de la siguiente manera

2.7.2.1 Temperatura.

Es el grado de calor que posee la atmósfera. Las escalas termo céntricas que son más utilizadas son los grados Celsius y los grados Fahrenheit. En los mapas climáticos, la temperatura se grafica mediante las isotermas.

2.7.2.2 Humedad.

Es la cantidad de vapor de agua que existe en la atmósfera. La superficie de los océanos es la fuente principal de la humedad del aire pues aquí se evapora el agua

en forma constante, contribuyendo también a su formación los ríos, lagos, nieve, glaciares.

Cuando hay mucha humedad, el vapor forma pequeñas gotas de agua que forman las nubes y la niebla.

La humedad relativa, es la que hace referencia a la proporción de vapor de agua en relación a la cantidad total de moléculas de aire, llegando a un punto de saturación en la cifra del 100%.

Los instrumentos que registran la humedad son el higrómetro y el psicrómetro.

2.7.2.3 Viento.

Es el aire de la atmósfera en movimiento. El aire se desplaza constantemente de forma horizontal en la atmósfera, arrastrando nubes e influyendo en la temperatura, pues también mueve masas. Los distintos tipos de viento se caracterizan por su dirección y su velocidad, estos se miden con anemómetro y veleta respectivamente.

2.7.2.4 Presión atmosférica.

Es la fuerza que ejerce el aire de la atmósfera sobre la superficie terrestre. La unidad que se utiliza para expresarla son los milibares.

2.7.2.5 Precipitación.

Es el agua que cae sobre la superficie terrestre en forma líquida o sólida y son el resultado de un proceso que es generado por el enfriamiento de masas de aire húmedo debido a la ascensión, y a la presencia de núcleos de condensación o de congelación, los que atraen moléculas de agua y originan las precipitaciones. Las precipitaciones se categorizan de acuerdo a la forma en que las masas de aire que las originó se elevaron en la atmósfera; por ello se clasifican en convectivas, ciclónicas, y orográficas.

La cantidad de precipitaciones caídas en el periodo de un año en un territorio determinado, da origen al índice de pluviosidad, el que se expresa en milímetros por metro cuadrado; para obtener este importante indicador se recurre al pluviómetro, y para su representación al pluviógrafo.

2.7.3 Factores del clima.

Los Factores del clima son las condiciones existentes en un lugar, que provocan el desarrollo de un clima con determinadas características. Estos factores son: la altitud, la latitud, la influencia del mar y el relieve, los cuales de acuerdo con (Meteorología y climatología de Navarra, 2019) son:

1. Latitud

La latitud es la distancia desde un punto determinado del planeta a cualquier punto del Ecuador.

La latitud también va a influir en la temperatura, cuanto más próximos nos encontremos al Ecuador, las temperaturas serán más altas, y conforme nos alejamos hacia los polos las temperaturas serán más bajas.

2. Altitud.

Es la distancia de un punto en relación al nivel del mar. Este factor influye sobre la temperatura y sobre la pluviosidad o lluvia. Al aumentar la altitud la temperatura disminuye aproximadamente en un grado cada 180 metros. Esto sucede porque en las zonas de menor altitud el aire es más denso y es capaz de retener el calor, mientras que, en las zonas más altas, esto no sucede y las temperaturas descienden.

3. Relieve.

El relieve va a influir en las zonas más montañosas, es decir, que están más elevadas, son más corrientes las precipitaciones en forma de lluvia, nieve o niebla.

Las masas de aire que chocan con los cordones cordilleranos se elevan, disminuyendo su temperatura con la altura. Si el aire va cargado de vapor de agua, se generan precipitaciones. Después de atravesar el cordón montañoso las masas de aire han perdido toda su humedad, generando climas más secos.

4. Influencia del mar.

El mar actúa como modelador de la temperatura, ya que se enfría lentamente suavizando el calor de las costas que baña. Las temperaturas varían menos entre el día y la noche.

Corrientes marinas Son corrientes que trasladan masas de agua a lo largo de los océanos y a grandes distancias. Las aguas que provienen de lugares muy lejanos enfrían o entibian el aire de las regiones que circundan, incidiendo en las presiones, en la humedad y en los seres vivos que habitan esas aguas.

5. Vegetación.

La vegetación actúa como un moderador térmico, evitando las grandes oscilaciones de temperatura. Contribuyen a generar mayor humedad en el aire y actúan como filtro de la radiación solar.

2.8 Términos operativos en México.

De acuerdo con el Gobierno de la Ciudad de México (2019), se mencionan los términos operativos para el Sistema de Monitoreo Atmosférico, el cual está conformado por cuatro subsistemas (RAMA, REDMA, REDMET y REDDA), un laboratorio para el análisis fisicoquímico de muestras (LAA) y un centro de procesamiento y difusión de datos (CICA), descritos a continuación: Ver tabla 7.

Tabla 7: Subsistemas que conforman el Sistema de Monitoreo Atmosférico.

<p>Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).</p>	<p>Utiliza equipos continuos para la medición de dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, PM₁₀ y PM_{2.5}, estos suelen estar acondicionados con una estación meteorológica y aire acondicionado para el adecuado funcionamiento de los equipos que mayormente se realiza de manera remota.</p>
<p>Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).</p>	<p>Es responsable de la recolección de muestras de partículas suspendidas para su análisis gravimétrico y la determinación de metales pesados, principalmente plomo. Esta red está integrada por 10 sitios y utiliza equipos manuales para el muestreo que se realiza una vez cada seis días.</p>

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET).	Está integrada por 26 sitios con equipos continuos para la medición de las principales variables meteorológicas de superficie: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, radiación solar y presión barométrica.
Red de Depósito Atmosférico (REDDA).	Utiliza equipos semiautomáticos para la recolección de muestras de depósito seco (polvo sedimentable) y depósito húmedo (lluvia, granizo, nieve, rocío) en los 16 sitios de muestreo. En las muestras de depósito húmedo se realiza un análisis fisicoquímico para conocer las características físicas de la precipitación, su composición iónica y acidez. El muestreo se realiza una vez cada siete días.
Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA).	Es el área responsable del análisis fisicoquímico de las muestras recolectadas por las diferentes redes de monitoreo. Cuenta con laboratorios para análisis elemental, cromatografía de gases, gravimetría y estudio de aerosoles.
Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA).	Es el repositorio de todos los datos generados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico, es responsable de la validación, procesamiento y difusión de la información generada por el programa de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia con información recolectada en (Gobierno CDMX, 2019).

El presente capítulo permitió orientar la búsqueda para identificar la metodología necesaria y el proceso que se llevara a cabo, de igual manera sirve de fundamento para construir criterios sobre la interpretación y comprensión del problema, en él se abordaron conceptos que se trataron a lo extenso del documento, así como la

descripción de los instrumentos de medición, los SIG, los tipos de medición que se llevan a cabo identificando sus ventajas y/o desventajas entre sí.

Capítulo 3. Marco contextual

En este capítulo se tratarán temas con respecto al entorno y medio físico de la zona de estudio que en este caso se trata de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

El capítulo se dividirá en diferentes apartados donde se abordarán: características a considerarse a la hora de instalar una Red Automática De Monitoreo Atmosférico (RAMA), localización y conformación de la ZMVT (Geográficos y Topográficos), aspectos Meteorológicos y por ultimo aspectos económicos de la zona.

3.1 Localización y conformación de la ciudad de Toluca

El municipio de Toluca se localiza en la zona central del Estado de México. Sus coordenadas extremas varían de los 18°59'02" a los 19°27'09" de latitud Norte, de los 99°31'43" a los 99°46'58" de longitud Oeste. La altura promedio es de 2,600 metros sobre el nivel del mar. Los municipios colindantes son al Norte Temoaya y Otzolotepec; al Noroeste con Almoloya de Juárez; al Sur con Villa Guerrero, Coatepec Harinas, Calimaya y Tenango del Valle; al Sureste con Metepec; al Este con Lerma y San Mateo Atenco y al Oeste con Zinacantepec. Es la capital del Estado de México y se encuentra a 72 kilómetros distancia de la capital del país (INAFRED, 2010). Ver imagen 20, Ver mapa 3.

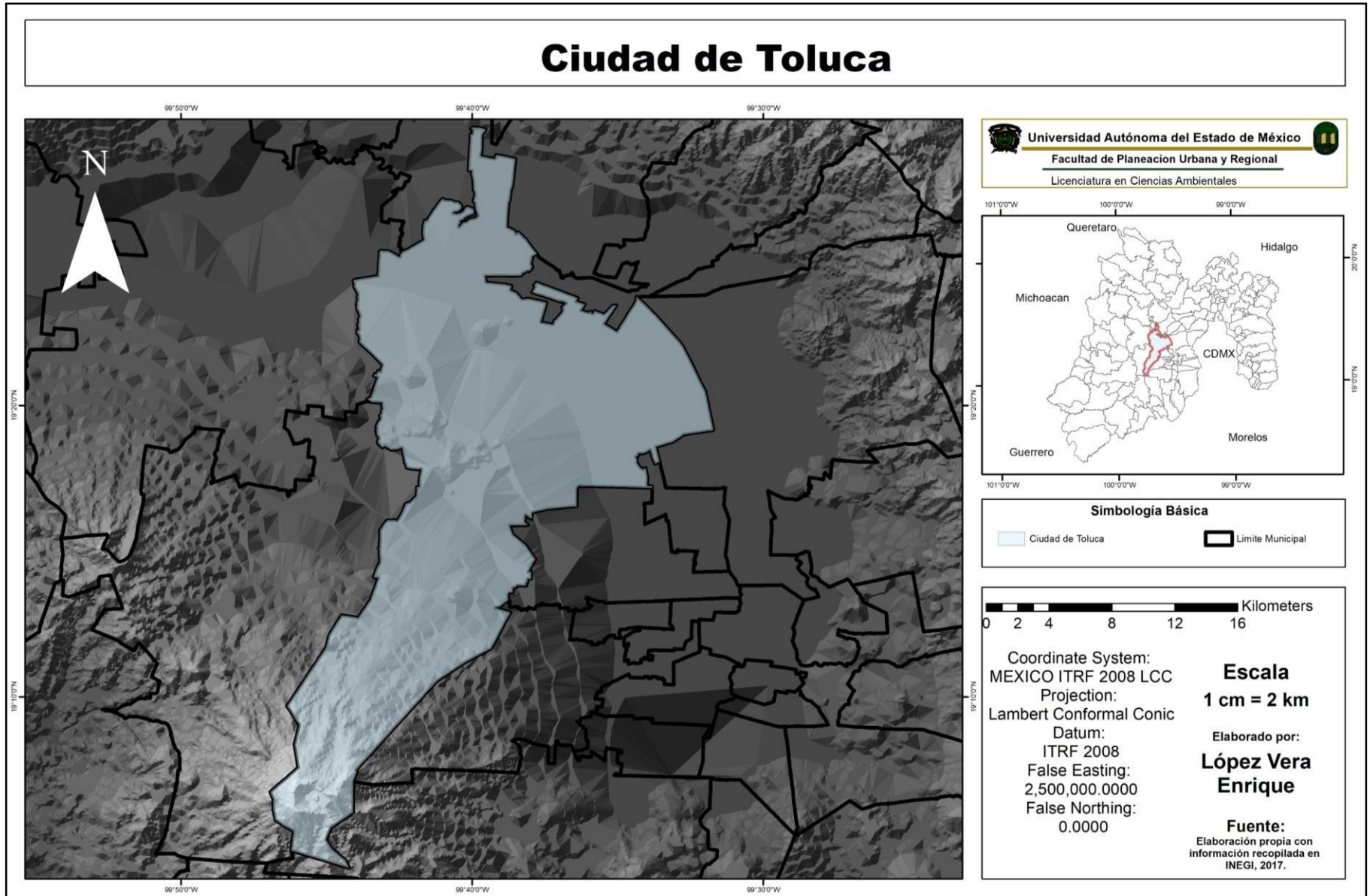
Imagen 20: Localización del municipio de Toluca



Fuente: (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016).

El clima del municipio está clasificado como templado sub-húmedo. La temperatura media anual es de 13.7°C. La precipitación media anual varía de 1,000 a 1,200 mm. Las heladas son de 80 a 140 días en la época fría (INAFRED, 2010).

Mapa 3: Ciudad de Toluca



La actual Zona Metropolitana del Valle de Toluca está conformada por 22 municipios (Tabla 8), los cuales comprenden una superficie de 2,669.6 km², que corresponde al 11.9% del territorio estatal. La altitud promedio de las cabeceras municipales es de 2,610 metros sobre el nivel del mar con un rango que va de 2,560 a 2,740 metros sobre el nivel del mar (GEM, 2012). Ver mapa 4.

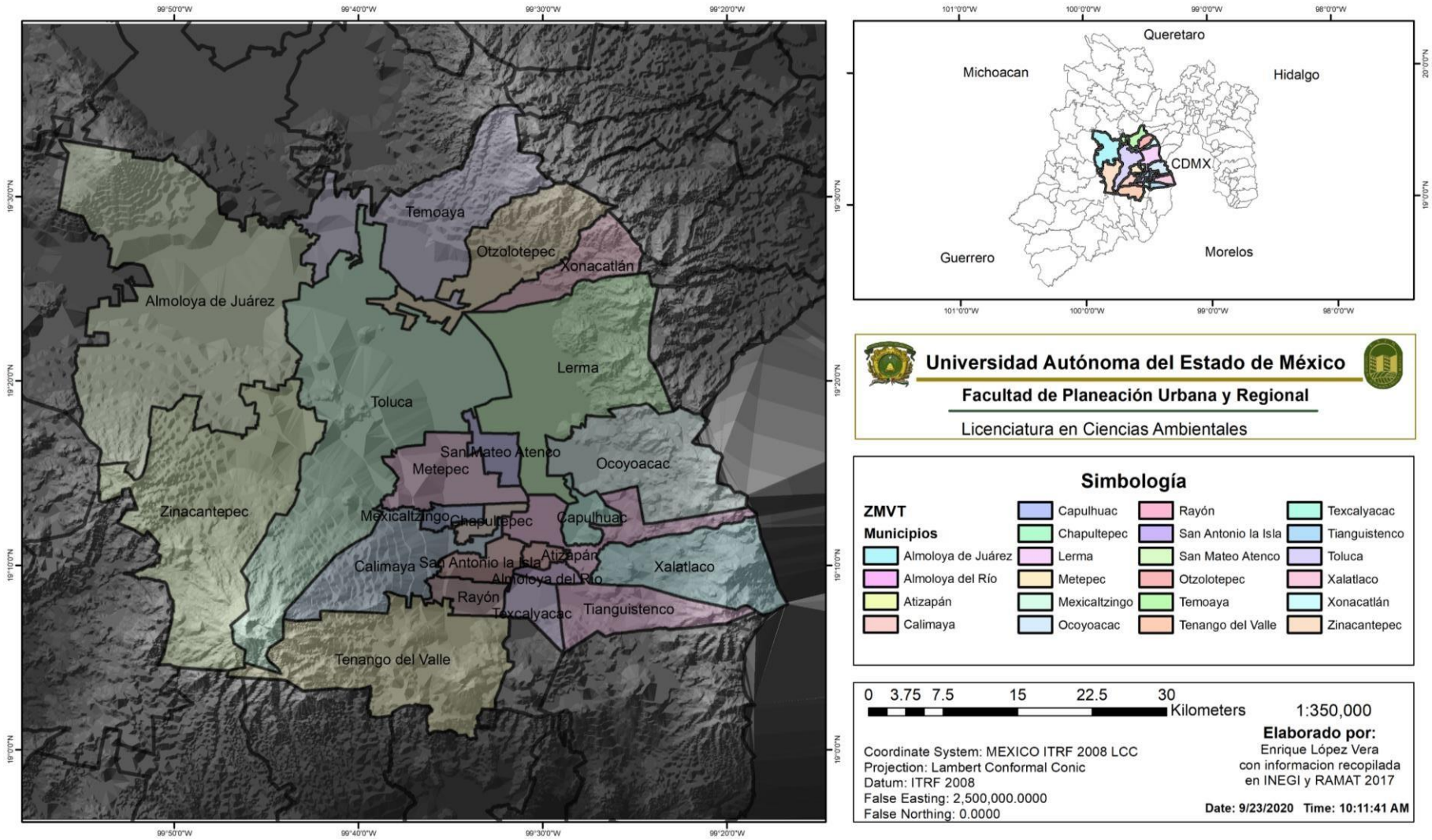
Tabla 8: Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Municipios			
1)	Almoloya de Juárez	12)	Rayón
2)	Almoloya del Río	13)	San Antonio la Isla
3)	Atizapán	14)	San Mateo Atenco
4)	Calimaya	15)	Temoaya
5)	Capulhuac	16)	Tenango del Valle
6)	Chapultepec	17)	Texcalyacac
7)	Lerma	18)	Tianguistenco
8)	Metepec	19)	Toluca
9)	Mexicaltzingo	20)	Xalatlaco
10)	Ocoyoacac	21)	Xonacatlán
11)	Otzolotepec	22)	Zinacantepec

Fuente: Elaboración propia con datos de (GEM, 2012).

Mapa 4: Municipios que conforman la ZMVT

Municipios que conforman la ZMVT



La Zona Metropolitana del Valle de Toluca se localiza en la parte centro del Estado de México; colinda al Norte con los municipios de San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jiquipilco Fabela, Jilotzingo, Naucalpan, Huixquilucan y con la CDMX.; al Sur con Ocuilan, Joquicingo, Tenancingo, Villa Guerrero y Coatepec Harinas y al Poniente con Temascaltepec, Amanalco y Villa Victoria. En la tabla de a continuación se muestran las características generales de los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (GEM, 2012). Ver tabla 9.

Tabla 9: Características generales de los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

No.	Municipios	Cabecera Municipal	Latitud (Max.)	Longitud (máx.)	Superficie (km ¹)	%
1	Almoloya de Juárez	Villa de Almoloya de Juárez	19° 22' N	99° 45' O	483.8	18.3
2	Almoloya del Río	Almoloya del Río	19° 10' N	99° 29' O	6.5	0.2
3	Atizapán	Santa Cruz Atizapán	19° IV N	99° 29' O	8.4	0.3
4	Calimaya	Calimaya de Díaz Gómez	19° 10' N	99° 37' O	103.1	3.9
5	Capulhuac	Capulhuac de Mirafuentes	19° 12' N	99° 28' O	21.5	0.8
6	Chapultepec	Chapultepec	19° 12- N	99° 34' O	11.9	0.5
7	Lerma	Lerma de Villada	19° 17' N	99° 31' O	228.6	8.5
8	Metepec	Metepec	19° 15' N	99° 36' O	70.5	2.7
9	Mexicaltzingo	San Mateo Mexicaltzingo	19° 13' N	99° 35' O	12.2	0.5
10	Ocoyoacac	Ocoyoacac	19° 16' N	19° 28' O	134.8	5
11	Otzolotepec	Villa Cuauhtémoc	19° 45' N	99° IV O	128	4.7
12	Rayón	Santa María Rayón	19° 09' N	99° 35' O	20.6	0.7
13	San Antonio la Isla	San Antonio la Isla	19° 10' N	99° 34' O	24.1	0.9
14	San Mateo Ateneo	San. Mateo Ateneo	19° 16' N	99° 32'0	12.6	0.4

15	Temoaya	Temoaya	19° 28' N	99° 36' O	199.7	7.8
16	Tenango del Valle	Tenango de Arista	19° 06- N	99° 35- O	208.9	0.6
17	Texcalyacac	San Mateo Texcalyacac	19° 08' N	99° 30- O	17.9	4.6
18	Tianguistenco	Santiago Tianguistenco de Galeana	19° 11' N	99° 28' O	121.6	7.5
19	Toluca	Toluca de Lerdo	19° IT N	99° 40' O	420.1	15.8
20	Xalatlaco	Xalatlaco	19° IV N	99° 25' O	93.2	3.5
21	Xonacatlán	Xonacatlán	19° 24' N	99° 32' O	32.9	1.3
22	Zinacantepec	San Miguel Zinacantepec	19° 17' N	99° 44' O	308.7	11.5
Total da la ZMVT					2669.6	100%

Fuente: Elaboración propia con datos de (GEM, 2012).

3.2 Orografía y Relieve.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca está rodeada por grandes sierras y aparatos volcánicos individuales, entre ellos se encuentra: al Suroeste, la Sierra Nevado de Toluca; al Este, la Sierra de las Cruces y Sierra de Ocoyotepec; 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 de Toluca (GEM, 2012).

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 de 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 (GEM, 2012).

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 (GEM, 2012).

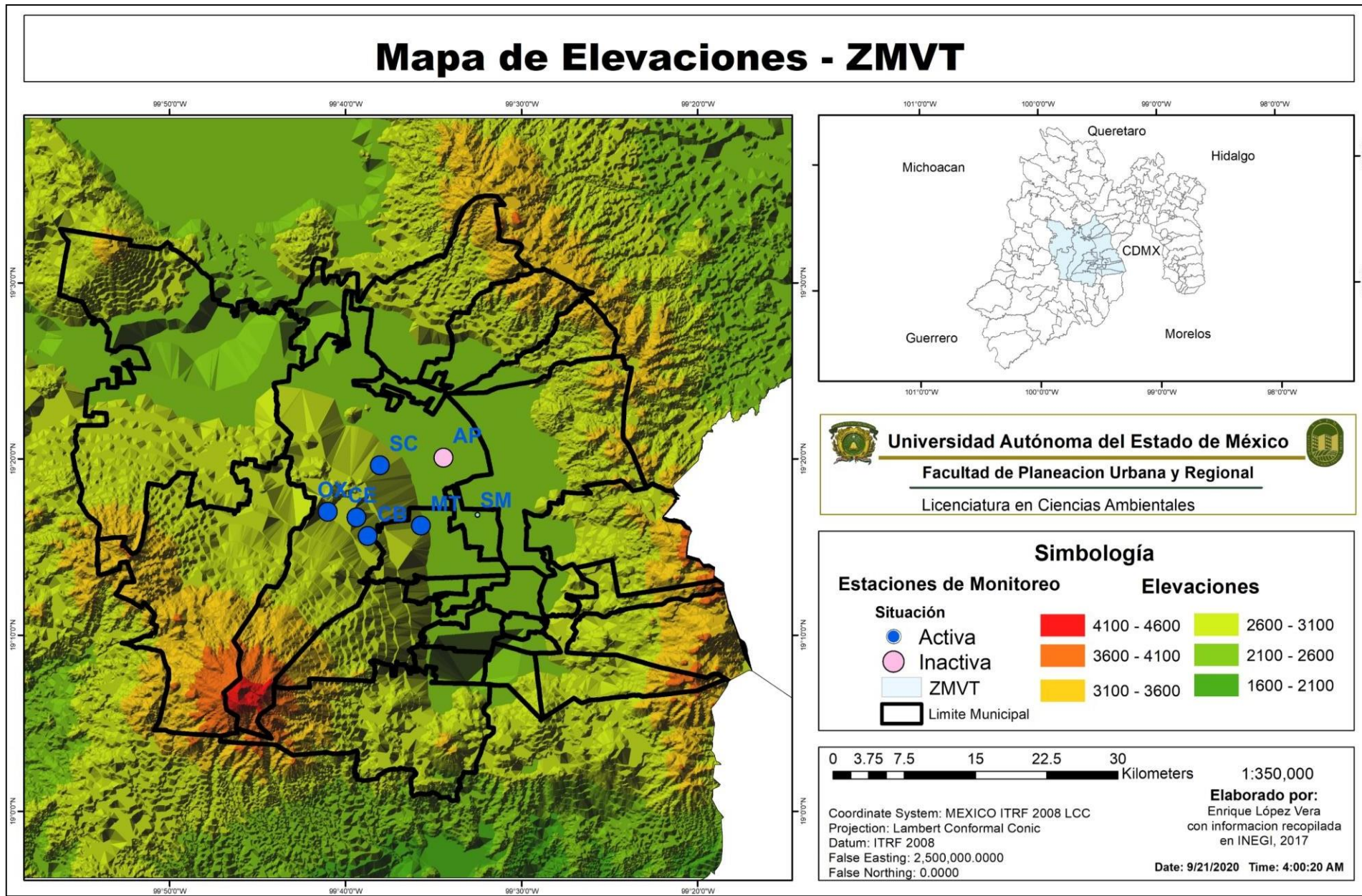
Estos datos es necesario conocerlos para así tomarlos en consideración con respecto a las corrientes de los vientos, en la Tabla 10 se muestran las elevaciones que predominan en la ZMVT, estas se encuentran reflejadas en Metros Sobre el Nivel del Mar (MSNM), de igual manera en el Mapa 5 se ve reflejada la relieve de la ZMVT.

Tabla 10: Elevaciones que predominan en la ZMVT.

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

Fuente: Elaboración propia con datos del (GEM, 2012).

Mapa 5: Elevaciones en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca



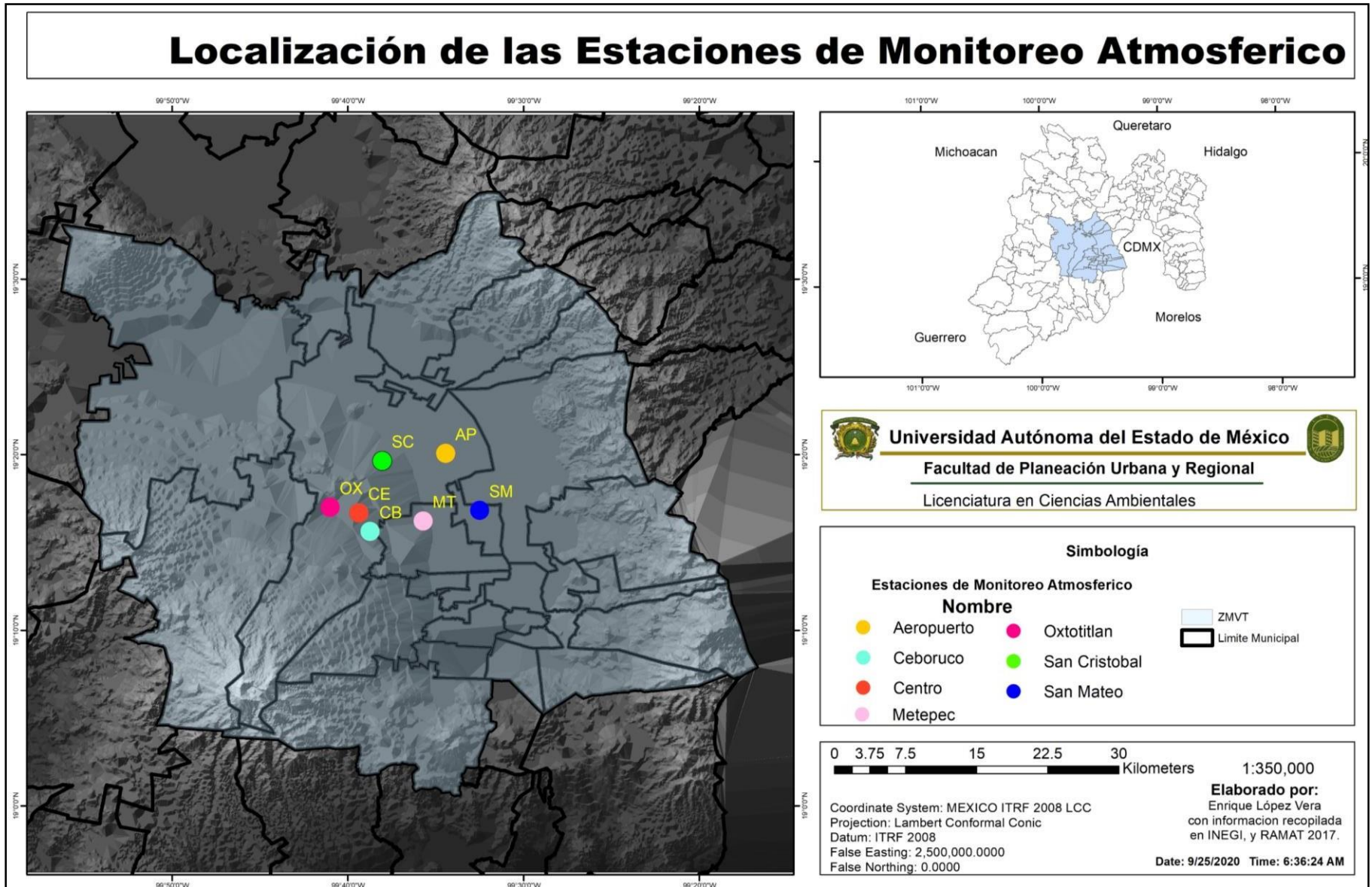
3.3 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por E, García en 2004, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se presentan tres tipos de clima: templado, semifrío y frío; sin embargo, el clima predominante para la zona de estudio es el templado subhúmedo.

- Clima templado húmedo [C(W2) (w)b(i)g]: El clima templado subhúmedo abarca la mayor parte de los municipios que corresponden a la ZMVT.
- Clima Semifrío [C(E)]: Por su parte, este clima presenta dos subtipos:
 - Semifrío subhúmedo [C(E)(W2) (w)b(i)g]: Clima característico de aquellas zonas con altitud considerable, como el Nevado de Toluca, la Sierra de Monte Alto y la Sierra de las Cruces.
 - Semifrío húmedo [C(E)(m)(w) b(i)g]: Únicamente existe una región semi-fría húmeda y se localiza en una porción del municipio de Xalatlaco.
- Clima frío [E(T)H]: Este tipo de clima es característico de zonas altas y se encuentra en lugares como el volcán Nevado de Toluca.

En la imagen se ejemplifican los climas con los que se cuenta en la ZMVT y el cómo se diversifican en los 22 municipios.

Mapa 6: Tipos de clima de la ZMVT, identificando los municipios influenciados por la RAMA-ZMVT



3.3.1 Meteorología

De acuerdo con el Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012-2017 (GEM, 2012) en la ZMVT se tienen únicamente 3 épocas climatológicas en la ZMVT las cuales son: Ver tabla 11.

Tabla 11: Épocas climatológicas en la ZMVT.

1.	Época seca-fría, expresa la temperatura promedio mensual más baja durante el año y comprende los meses de noviembre a febrero, con un rango de entre 9° y 11° C. Las heladas son un fenómeno meteorológico importante que se presenta en los alrededores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y que está relacionado con las bajas temperaturas, registradas periódicamente, y las nevadas, en forma ocasional por las temperaturas bajo cero registradas en esta época.
2.	Época seca-cálida, dentro de los meses de marzo a mayo se presenta un ascenso en la temperatura hasta llegar a los 15° C, siendo la temperatura media que se expresa como máxima en la zona a lo largo del año. Durante estas dos épocas, la precipitación pluvial es poco significativa con registros inferiores a los 40 mm de precipitación.
3.	Época de lluvia, definida por los meses de junio a octubre, se caracteriza por la presencia de precipitaciones que se desarrollan con un rango de entre 160 y 210 mm. En cuanto a la temperatura de esta época, se manifiesta un decremento para mantenerse entre los 11° y 13° C.

Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en (GEM, 2012).

3.4 Medición de la calidad del aire en la ZMVT

Si bien la ZMVT está integrada por 22 municipios para el año 2017, la medición de la calidad del aire consideraba únicamente siete municipios, divididos en Zona Centro, Norte y Sur, respectivamente.

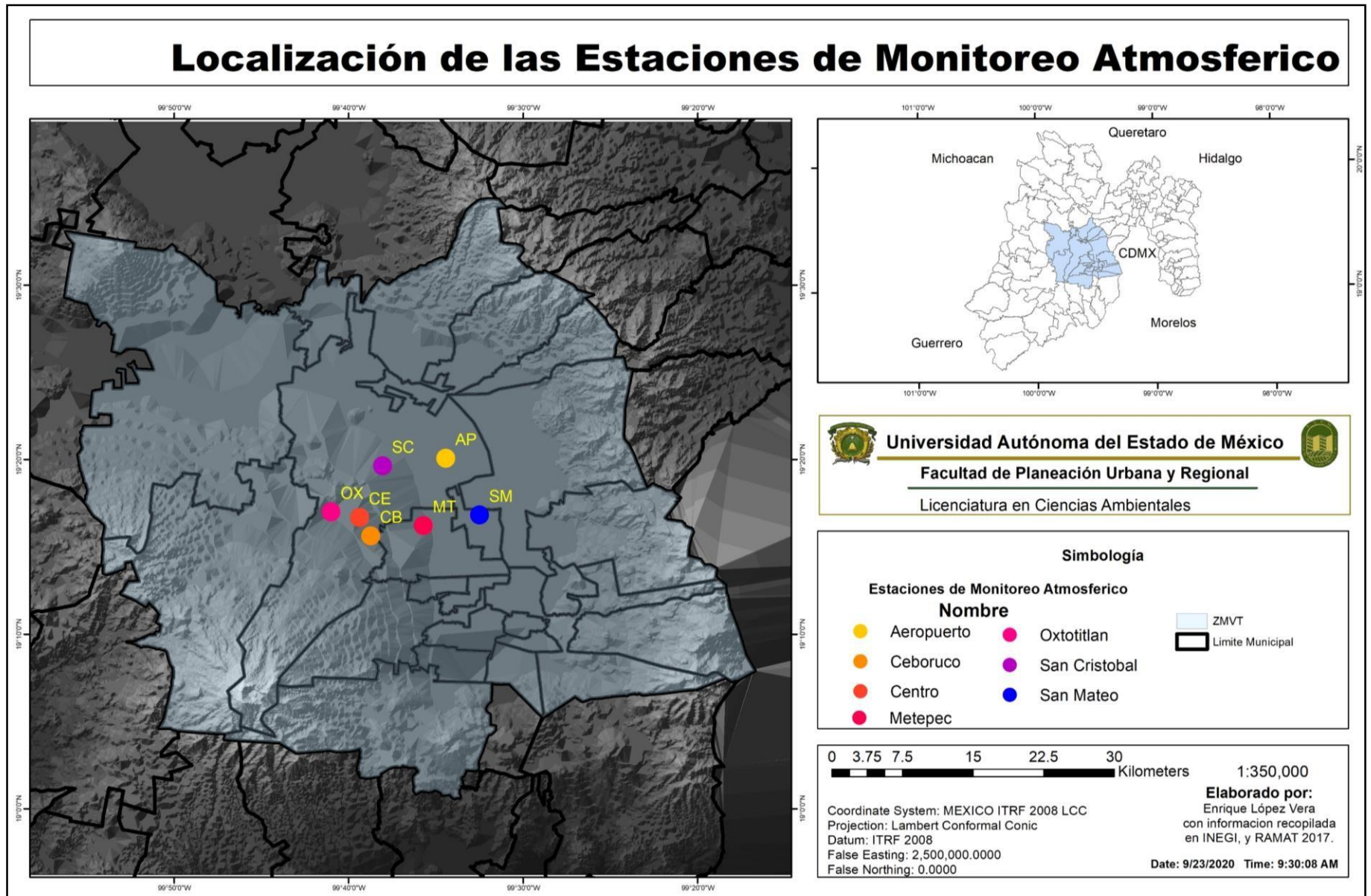
Tabla 12: Zonas de la ZMVT.

Zona	Municipio
Z. Centro	Toluca Centro
	Oxtotitlán
Z. Norte	Aeropuerto
	San Cristóbal Huichochitlán
Z. Sur	Metepec
	Ceboruco
	San Mateo Atenco

Fuente: (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2020).

Las Redes de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT en la actualidad, se distribuyen en únicamente 7 de los 22 municipios que conforman la ZMVT (GEM, 2012). Ver mapa 7.

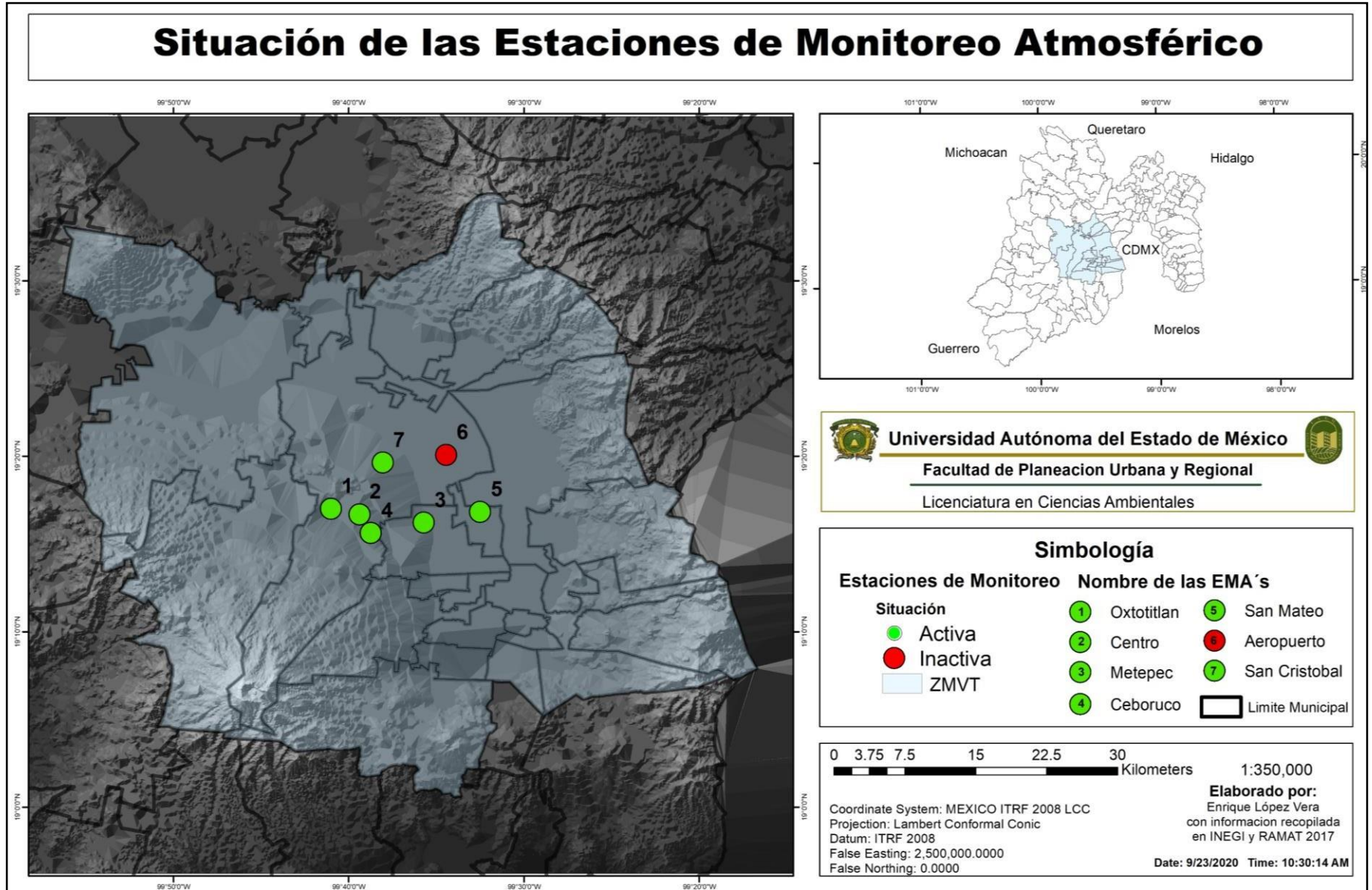
Mapa 7: Localización de las Estaciones de Monitoreo Atmosférico.



Sin embargo, en el año 2015, la estación Aeropuerto (AP) localizada en la zona Norte de la ZMVT, fue desactivada debido a que este dejó de cubrir con los lineamientos solicitados en la NOM-156-SEMARNAT-2012, la cual tiene como requisito el mantener una distancia de al menos 5 metros de distancia a cualquier vía de comunicación, sin embargo, la vialidad sobre la que se encuentra tras trabajos de mejoramiento se amplió dejando la estación a pie de carretera.

Al no cubrir con dicho requisito de distancia con la vialidad altamente transitada en la ciudad de Toluca se llevó a cabo el cese de operaciones en dicha estación quedando las EMA's como se muestran en el siguiente mapa reflejando su situación de actividad o inactividad. Ver mapa 8.

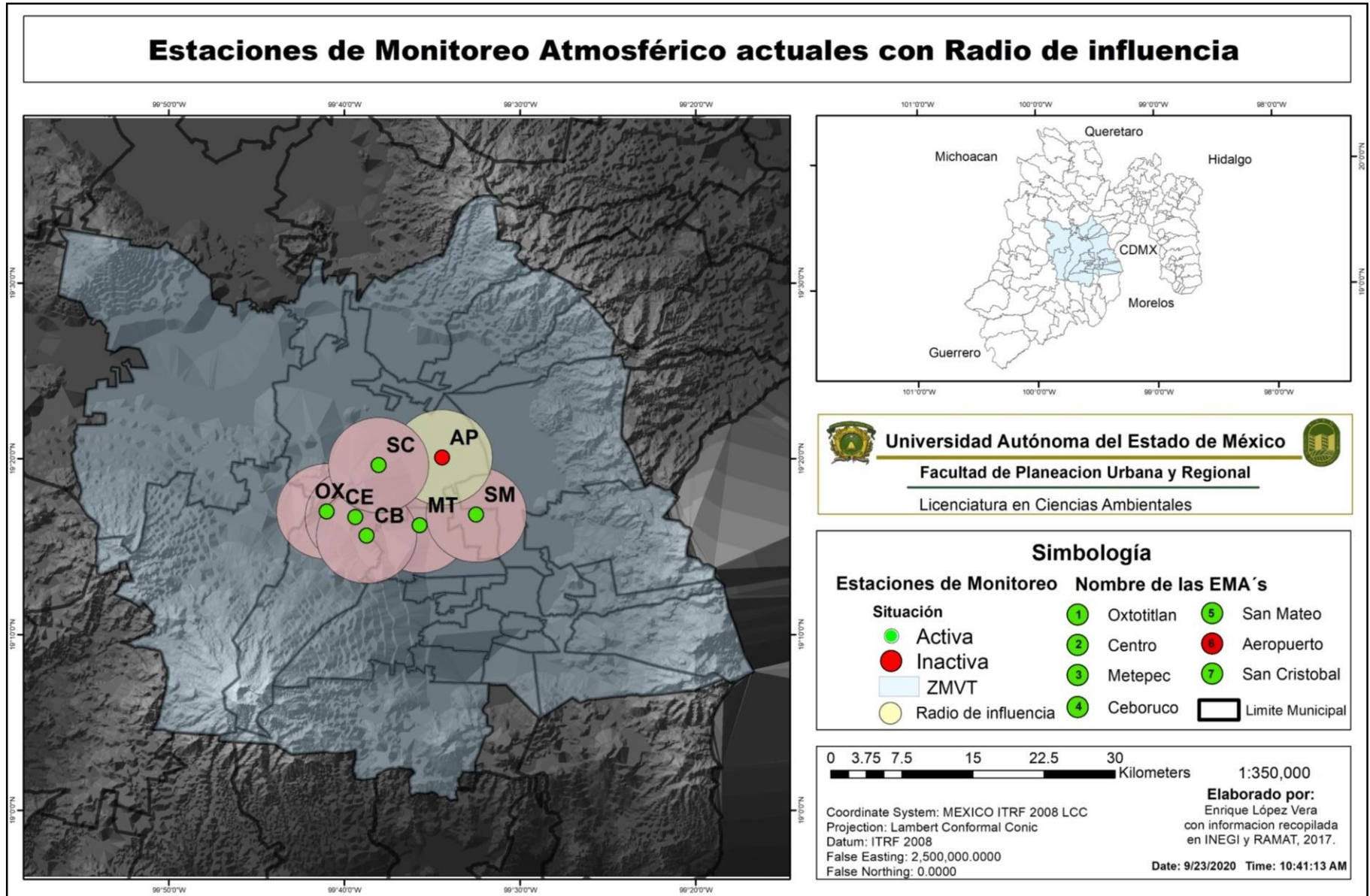
Mapa 8: Situación de las Estaciones de Monitoreo Atmosférico



En el mapa 9 se muestra distribución espacial de las redes automáticas de monitoreo atmosférico en la ZMVT y el espacio que abarcan en ella. El área de color azul corresponde a la ZMVT en su totalidad, los círculos coloreados de color rojo corresponden a las EMA's que se encuentran actualmente activas y la cobertura de estas mismas redes.

Por otro lado, el círculo coloreado de color beige corresponde a la cobertura con la que contaba la estación AP actualmente desactivada de manera permanente, mientras que aquellos municipios coloreados en azul y al interior de la delimitación de la ZMVT son los restantes que no se encuentran abarcados por alguna red o su radio de afluencia.

Mapa 9: Cobertura de las EMA's



3.4. Dinámica de Vientos.

En la época seca fría el desplazamiento de frentes fríos y masas de aire polar son los sistemas meteorológicos que predominan; cuando son intensos estos fenómenos, la Zona Metropolitana del Valle Toluca se ve afectada con sistemas anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco) que pueden generar inversiones térmicas, originando condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (GEM, 2012).

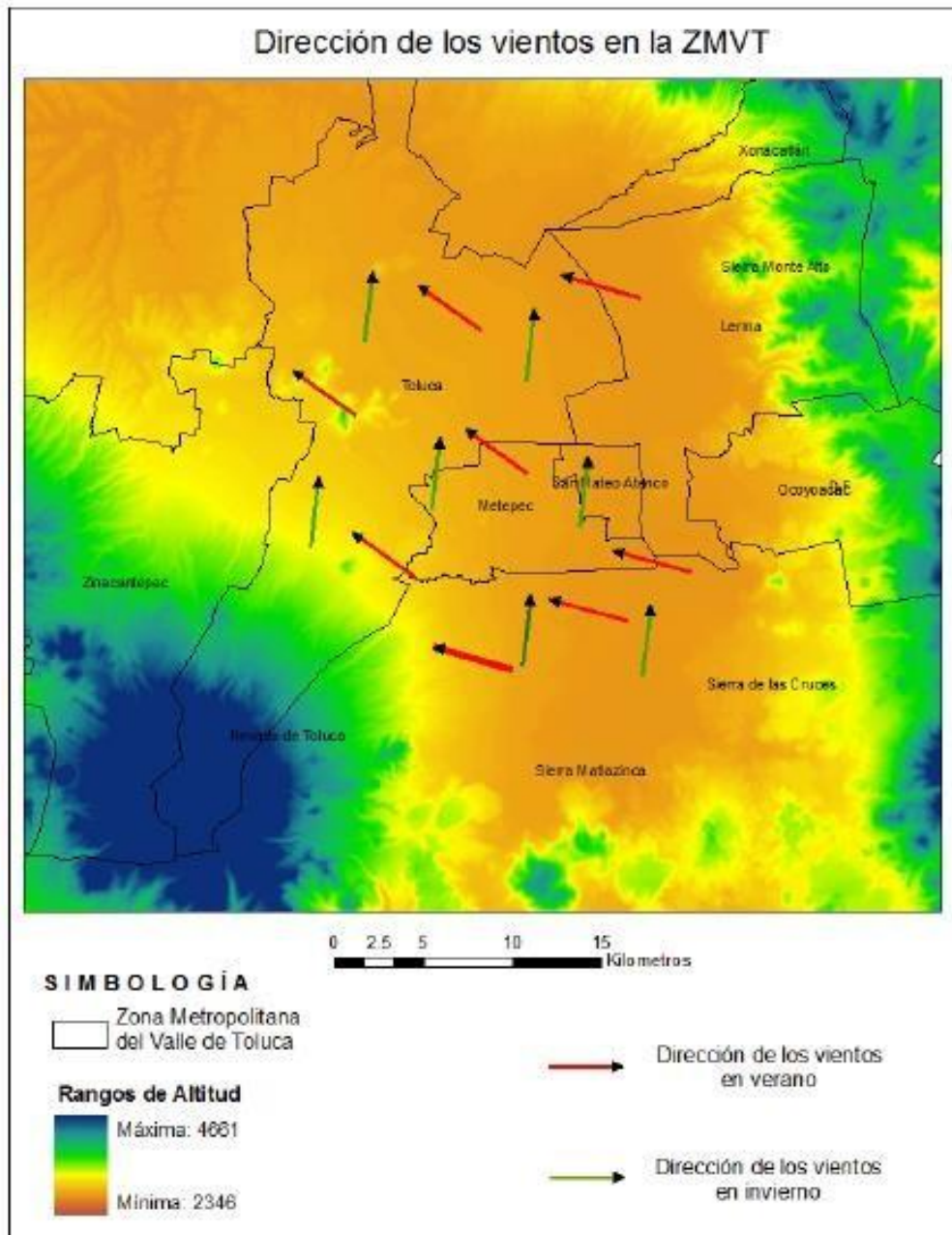
La Zona Metropolitana del Valle Toluca no está encerrada por completo por barreras naturales como sucede con la Zona Metropolitana del Valle de México, lo cual favorece la circulación del viento y, por tanto, su ventilación se ve favorecida la mayor parte del año (GEM, 2012).

La dinámica de viento en la ZMVT es altamente compleja debido a su relieve y por supuesto, gracias a los vientos alisios. Estos vientos se registran estables y débiles en la época seca-fría (marzo-mayo) del Valle de Toluca; de esta manera los vientos predominantes son aquellos provenientes del Sur con dirección al Norte, obedeciendo a las manecillas del reloj a causa del propio relieve de la zona; en este sentido, el volcán “Nevado de Toluca”, es la elevación que no permite la circulación de vientos provenientes del Sur (García-Chávez, 2014).

En la época seca-cálida (noviembre-febrero), gracias a la aceleración de los vientos alisios, los vientos se intensifican y cambian su curso. En este tenor, se habla de la “Sierra de las Cruces”, ubicada de Norte a Sur y que obstruye así, el paso del viento hacia el este del valle, apreciable en el Mapa 3.6 (García-Chávez, 2014).

Por último, en la época de lluvia de la ZMVT, la dinámica se modifica al existir una dirección de Este y Sureste hacia Noroeste y Norte, respectivamente como se observa en la imagen de a continuación, lo cual genera un transporte de contaminantes provenientes de la zona industrial del municipio de Lerma (García-Chávez, 2014).

Imagen 21: Dirección de los vientos.



Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018), (García-Chávez, 2014).

3.4.1. Vientos dominantes

La relevancia de conocer los vientos dominantes radica en que son un factor que puede condicionar la localización de las industrias que emiten grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera.

En cuanto a la dirección de los vientos en la ZMVT se debe mencionar que se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios (sistema de vientos relativamente constantes en dirección y velocidad, desde los 30° de latitud hacia el Ecuador con dirección Noreste en el hemisferio Norte y Sureste en el hemisferio Sur. Son vientos tibios y húmedos en los que viajan las tormentas tropicales, lo que significa que su intensidad es débil e incluso inestable durante los meses de noviembre a finales de febrero; los vientos provenientes del Sur y con dirección Norte son los que más predominan en el Municipio.

Sin embargo, todo está en función del relieve y aquí es importante recalcar que la zona de estudio se encuentra inmerso en un valle que es el que principalmente define la dirección del viento (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

En el siguiente mapa se muestra el comportamiento anual de los vientos en la ZMVT donde se puede apreciar que al correr de Sur Noroeste los vientos llegan principalmente a la zona Norte de la ciudad para precisar en la Estación de Monitoreo Atmosférico de San Cristóbal Huichochitlán (SC) lo cual origina que los Contaminantes Criterio sean depositados en esta zona, cabe resaltar que esta información es generada a partir de las bases de datos obtenidas por la RAMA-ZMVT y no se puede obtener a lo largo de toda la ZMVT considera únicamente el espacio delimitado por las EMA's.

La velocidad del viento está representada de acuerdo a la dirección del vector mientras que el color y el tamaño del mismo simbolizando la velocidad y representando el vector color verde el de menor tamaño el que representa menor velocidad, amarillo intermedio y el color rojo representando el de mayor velocidad.

3.5 Suelos.

En la Zona Metropolitana del Valle Toluca están presentes 8, de los 38 grupos de suelo del mapa mundial de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación considerados por la FAO-UNESCO (GEM, 2012).

3.5.1 Tipos de suelos

Los suelos con mayor extensión corresponden a los denominados: feozem, andosol y el vertisol, localizados en la parte centro y Sur del territorio; con mucho menor cobertura están el luvisol, el cambisol y el planosol localizados en algunas zonas de los municipios de Temoaya y Otzolotepec y los suelos regosol y leptosol restringidos a la zona del Nevado de Toluca y una fracción del municipio de Tenango del Valle, respectivamente (GEM, 2012). Ver tabla 13.

Tabla 13: Tipos de suelos de la ZMVT.

No.	Tipo	Ubicación
1	Feozem	Localizado en zonas de acumulación de materiales en áreas de poca pendiente.
2	Andosol	Corresponde a las partes altas de la zona de estudio.
3	Cambisol	Identificado en pequeñas porciones en los municipios de Temoaya, Otzolotepec y Xonacatlán.
4	Regosol	Su presencia se restringe a la zona montañosa del volcán Nevado de Toluca.
5	Leptosol	Característico únicamente en el Suroeste de Tianguistenco.

Fuente: Elaboración propia con datos de (GEM, 2012).

3.5.2 Uso de suelos.

Debido a que la mayoría de los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle Toluca, son de carácter rural, en Atizapán, superficie de suelo de uso agrícola representa más del 70%. En tanto, Zinacantepec, Ocoyoacac y Xalatlaco poseen entre 43% y 48% de uso de suelo forestal y Metepec y San Mateo Atenco son los municipios que tienen mayor proporción de uso de suelo urbano (GEM, 2012).

Como se puede observar en la tabla 8, el uso del suelo destinado para la agricultura es del 63.6%, le sigue en importancia el uso de suelo forestal con el 19.4%, el uso de suelo urbano con 4.2% y otros usos de suelo tienen un 12.8%, en éste último se incluyen: áreas sin vegetación aparente, cuerpos de agua y carreteras. Cabe destacar que la superficie de suelo forestal es todavía representativa pero con una gran presión por el cambio de uso del suelo de forestal a agrícola pecuario, y a su vez, de agrícola a urbano (GEM, 2012). Ver tabla 14.

Tabla 14: Usos de suelo en la ZMVT.

Usos de Suelo	Superficie	
	Km ²	%
Agrícola	1,696.9	63.6
Urbano	110.5	4.2
Forestal	518.9	19.4
Otros	343.2	12.8
Total	2,669.6	100

Fuente: Elaboración propia con datos de (GEM, 2012).

3.6 Aspectos socioeconómicos de la ZMVT.

Los aspectos socioeconómicos se refieren a ciertas características como: sistema territorial, demografía y sistema económico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

3.6.1 Dinámica poblacional

Una zona metropolitana está formada por una ciudad con una fuerte concentración demográfica que gradualmente expande su supremacía socioeconómica y política hacia una o varias unidades administrativas que se encuentran subordinadas, pues la alta concentración de actividades económicas, laborales y de servicios las hacen dependientes de la primera, enfatizando la interrelación socioeconómica directa entre centro periferia y viceversa, como concentración económica demográfica (GEM, 2012).

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca constituye la segunda mayor concentración poblacional de la entidad y a nivel nacional, después de la Zona Metropolitana del Valle Cuautitlán-Texcoco. Está considerada como una de las metrópolis más importantes

del país, de acuerdo al Sistema Nacional de Ciudades, que la cataloga dentro del rango de grandes ciudades (GEM, 2012).

De acuerdo al Censo General de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) la población de la Zona Metropolitana del Valle Toluca pasó de un millón 917 mil habitantes en 2005, a dos millones 166 mil 24 en el año 2010, lo que representa un incremento de 8.85% (GEM, 2012).

Cabe resaltar que el municipio más poblado es Toluca, le siguen Metepec, Zinacantepec, Almoloya de Juárez y Lerma, con un rango de entre 100 mil y 200 mil habitantes, los restantes 17 municipios tienen una población inferior a los 100 mil habitantes. Aunque San Mateo Atenco cuenta con más de 5 mil individuos dentro de un kilómetro cuadrado, lo cual hace que se ubique como el municipio de la ZMVT con mayor densidad de población en relación a la densidad del territorio nacional (García-Chávez, 2014).

3.6.2 Población sensible.

A fin de identificar, la “población sensible” se presenta, con base en datos del INEGI (2010) la población de la Zona Metropolitana del Valle Toluca por grandes grupos de edad:

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

(GEM, 2012).

La población sensible consiste en la suma de los grupos A y C, es decir, niños y adultos mayores. En la Tabla 15 se muestra que la población más sensible es de 746 mil 592 individuos que representan el 34.46% de la población asentada dentro de la Zona Metropolitana del Valle Toluca; esto quiere decir que una tercera parte de su población total es la más susceptible a los efectos de la contaminación atmosférica (GEM, 2012).

El total de casos atendidos por infecciones respiratorias agudas (IRA) subsecuente en la población de 0 a 4 años durante el 2008, ha sido el más alto desde el 2000. El

incremento en este indicador nos permite suponer que existe una prevalencia de enfermedades respiratorias que ha ido incrementando con el tiempo. El Estado de México, Jalisco y el CDMX son las entidades con mayor número de niñas y niños atendidos por casos subsecuentes de IRA (Respira México, 2018).

Aunado a lo anterior, en universidades de Estados Unidos y Australia se ha estudiado la relación entre los nacimientos prematuros y la contaminación del aire, especialmente en aquellas mujeres embarazadas que viven cerca de vialidades concurridas, lo que afecta no sólo la vida de las madres, sino también la de los niños que no alcanzan un pleno desarrollo de sus órganos en el periodo de gestación (Respira México, 2018).

Tabla 15: Población por grupos de edad y población sensible

Municipios	Población	Grupo de Edad			No Especificado	Población Sensible	%
		A: 0-14	B: 15-64	C: 65 y mas			
Almoloya de Juárez	147,653	48,973	92,328	5,968	384	54,941	37.2
Almoloya del Río	10,886	3,268	6,904	694	20	3,962	36.3
Atizapán	10,299	3,323	6,471	429	76	3,752	36.4
Calimaya	47,033	14,591	29,946	2,167	329	16,758	35.6
Capulhuac	34,101	10,365	21,787	1,728	221	12,093	35.4
Chapultepec	9,676	3,054	6,170	356	96	3,410	35.2
Lerma	134,799	40,848	85,975	6,326	1,650	47,174	34.9
Metepec	214,162	53,488	145,803	10,685	4,186	64,173	29.9
Mexicaltzingo	11,712	3,531	7,527	573	81	4,104	35.0
Ocoyoacac	61,805	18,047	40,378	3,126	254	21,173	34.2
Otzolotepec	78,146	26,492	48,225	3,165	264	29,657	37.9

Rayón	12,748	4,006	8,032	689	21	4,695	36.8
San Antonio la Isla	22,152	7,265	13,773	670	444	7,935	35.8
San Mateo Ateneo	66,568	22,500	40,212	2,742	1,114	25,242	37.9
Temoaya	90,010	32,506	53,773	3,586	145	36,092	40.0
Tenango del Valle	77,965	24,910	48,823	3,986	246	28,896	37.0
Texcalyacac	5,111	1,563	3,246	294	8	1,857	36.3
Tianguistenco	70,682	22,425	44,375	3,653	229	26,078	36.8
Toluca	819,561	230,416	535,838	38,063	15,244	268,479	32.7
Xalatlaco	26,865	8,766	16,659	1,295	145	10,061	37.4
Xonacatlán	46,331	14,435	29,741	2,067	88	16,502	35.6
Zinacantepec	167,759	52,960	106,790	6,598	1,411	59,558	35.5
Total	2'166,024	647,732	1'392,776	98.860	26.656	746,592	34.4

Fuente: Elaboración propia con datos (GEM, 2012).

3.6.3 Actividades económicas.

La ZMVT ha pasado de ser una economía rural a una economía industrial y de servicios. Al interior de la Zona destacan los municipios de Lerma en las actividades económicas terciaria y secundaria, San Mateo Atenco en el sector secundario y en el caso de Metepec, este Surge como generador predominante de nuevos empleos y servicios en los sectores secundario y terciario.

Se ha determinado que la población económicamente activa de la Zona Metropolitana del Valle Toluca es de 49.9%. La población ocupada por sector de actividad, corresponde a 3.4% en el sector primario, 35.9% en el sector secundario y 56.8% en el sector terciario (GEM, 2012).

3.6.3.1 Actividades del sector primario.

Dentro del sector económico primario, destaca la actividad agrícola, en su mayoría es de temporal, aunque también se desarrolla la agricultura de riego, pero en menor medida. Aunado a que el tipo de suelo que predomina es Feozem, el cual es susceptible a la erosión moderada y alta, esta situación hace que se presenten con más facilidad problemas de erosión de suelo acarreado como consecuencia la emisión de partículas de origen natural (García-Chávez, 2014).

Con respecto a la ganadería, se observa la invasión hacia áreas forestales, en donde se presenta, por un lado, la tala de árboles, y por otro, incendios provocados para la quema de pasto y generación de renuevo, beneficiando así el pastoreo de rebaños. Sin embargo dicha actividad afecta la calidad del aire por la emisión de partículas durante la combustión y posteriormente por la erosión del suelo a consecuencia de la pérdida de cubierta vegetal (GEM, 2012).

3.6.3.2 Actividades del sector secundario.

Son diversos tipos de industrias ubicados en la ZMVT, sin embargo, una de las más importantes, debido a la cantidad de unidades económicas con las que cuenta, es la industria manufacturera (COESPO, 2014).

La importancia de la industria radica no sólo en su impacto como actividad económica, sino también en los efectos ambientales derivados de sus procesos intrínsecos, por ejemplo, las emisiones a la atmósfera de hidrocarburos provenientes de la industria metalmeccánica, así como gases de combustión generados en la industria química y alimentaria, en hoteles, baños públicos y restaurantes, los cuales en su conjunto contribuyen al deterioro de la calidad del aire por la ausencia de sistemas de control de emisiones, o bien, la falta de un sistema de administración ambiental, para el ahorro de materias primas y energía (GEM, 2012).

3.6.3.3 Actividades del sector terciario.

En este sector destacan las actividades de comercio al por menor de alimentos, bebidas y tabaco, servicios de apoyo a los negocios, manejo de desechos, servicios

de remediación, servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (GEM, 2012).

En las últimas décadas se ha abierto una importante brecha al interior del comercio al menudeo, pues coexisten, por un lado, el comercio tradicional con rezagos en su operación, equipamiento y técnicas de comercialización y por el otro, el comercio moderno, integrado por tiendas de autoservicio y centros comerciales, el cual ha incrementado su presencia en las zonas urbanas de la entidad (García-Chávez, 2014).

3.7. Vías de comunicación

Debido al dinamismo poblacional de la ZMVT se tiene una gran variedad en cuanto a comunicación tanto terrestre como aérea.

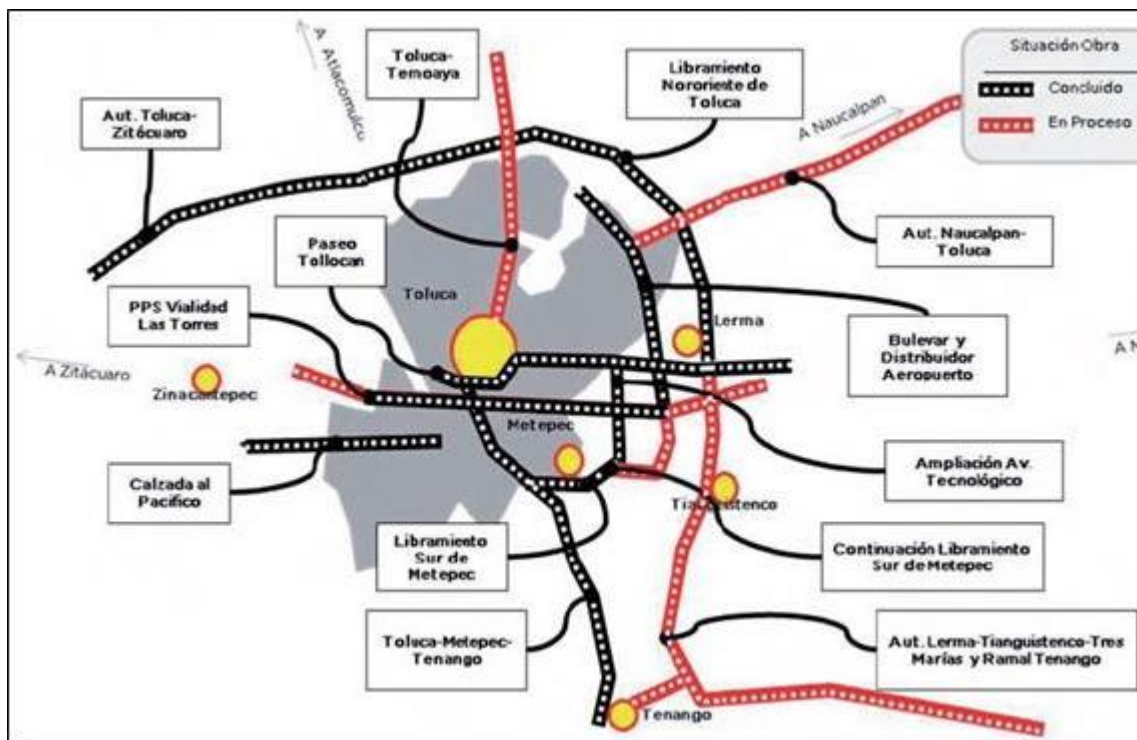
Dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se encuentra el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca, considerado un aeropuerto de clase mundial, por su concepto de apoyo a aerolíneas de bajo costo, la implementación del Sistema de Aterrizajes y Despegues por instrumentos en condiciones de baja visibilidad; el edificio terminal tiene un área de 28,300 m² que incrementa su capacidad de servicio a ocho millones de pasajeros y el estacionamiento de cuatro niveles con más de dos mil cajones (GEM, 2012).

Está considerada como la quinta terminal aérea del país en número de pasajeros, el índice de más alto crecimiento en los últimos años y reconocido como el mejor Aeropuerto en América Latina y el Caribe. Con la finalidad de mejorar la movilidad urbana, la conectividad, los tiempos de traslado, y la imagen urbana de las vialidades, en la zona de estudio, se cuenta con una extensa red de carreteras, a la que se integran cada vez más modernos libramientos, autopistas y vialidades, que permiten el paso rápido hacia su destino (GEM, 2012).

Las principales vías de comunicación son el Libramiento Nororiente de Toluca y Sur de Metepec; el Boulevard y Distribuidor Aeropuerto; las Autopistas: Toluca-Zitácuaro; Toluca-Naucalpan y Lerma-Santiago Tianguistenco-Tres Marías y Ramal a Tenango del Valle. Las Vialidades: Prolongación Avenida Isidro Fabela, Paseo Adolfo López Mateos, Vía Alfredo del Mazo, Vía José López Portillo, Paseo Tollocan, Paseo Colón, Calzada al Pacífico, Avenida Salvador Díaz Mirón, Avenida Tecnológico, Avenida de

las Partidas-Zona Industrial-Lerma-El Cerrillo y las Carreteras: Toluca-Metepec-Tenango del Valle, Toluca-Temascaltepec-Valle de Bravo, Toluca-Temoaya, Toluca-Amanalco de Becerra-Valle de Bravo, Toluca-San Felipe Tlalmimilolpan, Santiago Tianguistenco-Chalma, Amomolulco-Xonacatlán, Xonacatlán-Presa José Antonio Álzate, Ocoyoacac-Santiago Tianguistenco, Tenango-Joquicingo, a Marquesa-Santiago Tianguistenco, Mexicaltzingo-Tianguistenco-Xalatlaco, Almoloya de Juárez; San Mateo Atenco-San Pedro Tultepec y Santiago Tianguistenco-Tenango del Valle (GEM, 2012). Ver imagen 22.

Imagen 22: Vías de comunicación.



Fuente: (GEM, 2012).

Abordar sobre las características físicas, climatológicas y socioeconómicas de la zona de estudio facilito las comprensiones de las características influyen sobre la conducta y comportamiento de los vientos y los contaminantes criterio en la ZMVT.

Capítulo 4. Marco normativo

4.1 Internacional.

En el Artículo 24 de la Convención sobre los Derechos del Niño (CDN), ratificada por México en el año de 1990, el estado mexicano se comprometió a reconocer el derecho de niñas y niños a gozar del más alto nivel posible de salud y de esta forma adquirió la obligación de garantizar los servicios y tomar las medidas necesarias para asegurar la plena aplicación de este derecho. El derecho de nuestros niños y niñas a respirar aire limpio se encuentra incluido en el derecho medio ambiente sano que es obligación del gobierno garantizar (Respira México, 2018).

4.2 Nacional.

En términos de las normas de calidad del aire y su cumplimiento, la información en calidad y en cantidad adecuada obtenida observando estrictamente los procedimientos operativos, será de gran utilidad para desarrollar las capacidades que permitan comparar la información de la calidad del aire, correspondiente a periodos de tiempo definidos, que conjuntamente con los datos meteorológicos de una zona en particular permitirá evaluar con certeza la efectividad de las medidas y acciones aplicadas (INE-SINAICA b, 2010).

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 4° establece que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. La Ley General de Salud contempla que es materia de salubridad general la prevención y el control de los efectos nocivos de los factores ambientales en la salud del hombre; y le corresponde al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Salud (SSA) dictar las normas oficiales mexicanas a que quedará sujeta la prestación, en todo el territorio nacional, de servicios de salud en las materias de salubridad general y verificar su cumplimiento; ejercer la coordinación y la vigilancia general del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley y demás normas aplicables en materia de salubridad general. Asimismo, dispone que las autoridades sanitarias establecerán las normas, tomarán las medidas y realizarán las actividades a que se refiere esta Ley tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente. La formulación y conducción de la política de

saneamiento ambiental corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en coordinación con SSA, en lo referente a la salud humana. También, corresponde a la Secretaría de Salud determinar los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente; así como con los gobiernos de las Entidades Federativas, en sus respectivos ámbitos de competencia desarrollar investigación permanente y sistemática de los riesgos y daños que para la salud de la población que origine la contaminación del ambiente. (COFEPRIS a, 2017)

la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que debe haber una administración integral de los datos de calidad del aire que se generan en el país, tanto por las redes de monitoreo urbanas como por las estaciones de monitoreo individuales, ya sea que pertenezcan al gobierno o a la iniciativa privada. Por ello, la SEMARNAT y el INE, en conjunto con otras dependencias nacionales e internacionales han desarrollado el Sistema Nacional de Información sobre Calidad del Aire (SINAICA), el cual es un espacio virtual de vinculación de los sistemas de medición de la calidad del aire locales, que suministra información gratuita sobre calidad del aire al público en general, lo más cercano posible al tiempo real, a través de Internet. El servicio que brinda el SINAICA de administración, análisis y difusión de los datos de calidad del aire está dirigido a tomadores de decisión, investigadores, académicos y personas interesadas en el tema, por lo que posee información técnica y normativa, bases de datos históricas y vínculos a otras páginas de Internet nacionales e internacionales dedicadas al tema de Calidad del Aire (<http://sinaica.ine.gob.mx/>) (INE-SINAICA a, 2010).

Los contaminantes criterio tienen asignado un límite máximo normado en el aire ambiente para determinar si éste es respirable sin afectar la salud humana ya que Al detectar la concentración de contaminantes del aire ambiente estamos determinando su calidad. Así entonces, la calidad del aire puede ser definida por indicadores o índices preestablecidos que determinan la concentración de contaminantes en el aire ambiente ligada a escalas que califican esa calidad de forma cualitativa, cromáticas o numérica (INE-SINAICA a, 2010).

4.3 Normas Oficiales Mexicanas.

En la actualidad, los problemas relacionados con la contaminación atmosférica y el deterioro de la calidad del aire se han convertido en una prioridad de las grandes ciudades, los cuales se han incrementado como consecuencia del creciente desarrollo industrial y el incremento del flujo vehicular, principalmente. La contaminación atmosférica se ha venido incrementando tanto a nivel mundial como en países de América Latina. En México, la calidad del aire se ha visto afectada por la presencia de múltiples contaminantes (partículas, dióxido de nitrógeno, ozono, etcétera), lo que representa un serio problema de salud pública y deteriora la calidad de vida de sus habitantes. Cada vez son más las personas expuestas a concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos que representan un riesgo alto de sufrir daños irreversibles en su salud, lo que transgrede el derecho humano a disfrutar de un ambiente limpio y sano, y a vivir con una mejor calidad de vida (Secretaría de Salud, 2014).

4.3.1 Ozono.

Iniciando con la NOM-020-SSA1-2014 donde se mencionan los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O_3). Valores normados para la concentración de ozono (O_3) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población, para quedar como Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O_3) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire. Ver tabla 16.

Tabla 16: Valores para las concentraciones de Ozono en el aire ambiente de acuerdo con las NOM's

Contaminante	NOM	Concentración		
		ppm	µg/m ³	Periodo
Ozono	NOM-020-SSA1-1993	0.11	216	1 hr.
		0.08		8 hrs.
	NOM-020-SSA1-2014	0.095	186	1 hr.
		0.07		8 hrs.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida en (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2020).

Cabe mencionar que los límites permisibles fueron disminuidos de 0.11 a 0.95 ppm para la medición horaria y de 0.80 a 0.70 ppm para el promedio móvil de 8 horas, en la actualización por la secretaria de salud a la norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación durante el mes de agosto del 2014 que a su vez entraría en vigor 60 días después de la publicación de la misma.

4.3.2 Monóxido de Carbono.

Continuando con la NOM-021-SSA1-1993 para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Ver tabla 17.

Tabla 17: Valores para las concentraciones de monóxido de carbono en el aire ambiente de acuerdo con las NOM's

Contaminante	NOM	Concentración		Periodo
		ppm	µg/m ³	
Monóxido de Carbono	NOM-021-SSA1-1993	11	12.595	8 hrs (móvil)

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en (INE-SINAICA a, 2010).

4.3.3 Dióxido de azufre.

En la NOM-022-SSA1-2019 se indican los lineamientos de la calidad del aire ambiente, con respecto al Dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de este contaminante en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Ver tabla 18.

Tabla 18: Valores para las concentraciones de Dióxido de Azufre en el aire ambiente de acuerdo con las NOM's

Contaminante	NOM	Concentración		Periodo
		Ppm	µg/m ³	
Dióxido de Azufre	NOM-022-SSA1-1993	0.13	341	24 hrs
	NOM-022-SSA1-2010	0.11	288	
	NOM-022-SSA1-2019	0.04	105	

Fuente: Elaboración propia con información obtenida en (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2020).

4.3.4 Dióxido de nitrógeno.

Para el bióxido de nitrógeno (NO₂) se emplea la NOM-023-SSA1-1993 con los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente. Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Ver tabla 19.

Tabla 19: Valores para las concentraciones de Dióxido de nitrógeno en el aire ambiente de acuerdo con las NOM's

Contaminante	NOM	Concentración		Periodo
		ppm	µg/m ³	
Dióxido de Nitrógeno	NOM-023-SSA1-1993	0.21	395	1 hr

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en (INE-SINAICA a, 2010).

4.3.5 Partículas suspendidas totales.

Para el caso de las Partículas Suspendidas Totales (PST), particularmente las PM₁₀ y PM_{2.5} se indican los criterios en la NOM-025-SSA1-2014 para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM_{2.5} de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire. Ver tabla 20.

Tabla 20: Valores para las concentraciones de Partículas Suspendidas Totales (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en el aire ambiente de acuerdo con las NOM's

Contaminante	NOM	Concentración		
		ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Periodo
PM_{10}	NOM-025-SSA1-1993	n/a	120	24 hrs
			50	Anual
$PM_{2.5}$		n/a	65	24 hrs
			15	Anual
PM_{10}	NOM-025-SSA1-2014	n/a	75	24 hrs
			40	Anual
$PM_{2.5}$		n/a	45	24 hrs
			12	Anual

Fuente: Elaboración propia con información obtenida en (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2020).

4.3.6 Calculo del IMECA

Para el cálculo del IMECA se puede obtener información de la NADF-009-AIRE-2006 la cual es la Norma Ambiental para el Distrito Federal (DF), ahora Ciudad de México (CDMX) que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.

Imagen 23: IMECA

Categoría	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
BUENA	0-50	Sin riesgo	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR	51-100	Aceptable	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
EXTREMADAMENTE MALA	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

Fuente: (Dirección de Monitoreo Atmosférico de la CDMX, 2018)

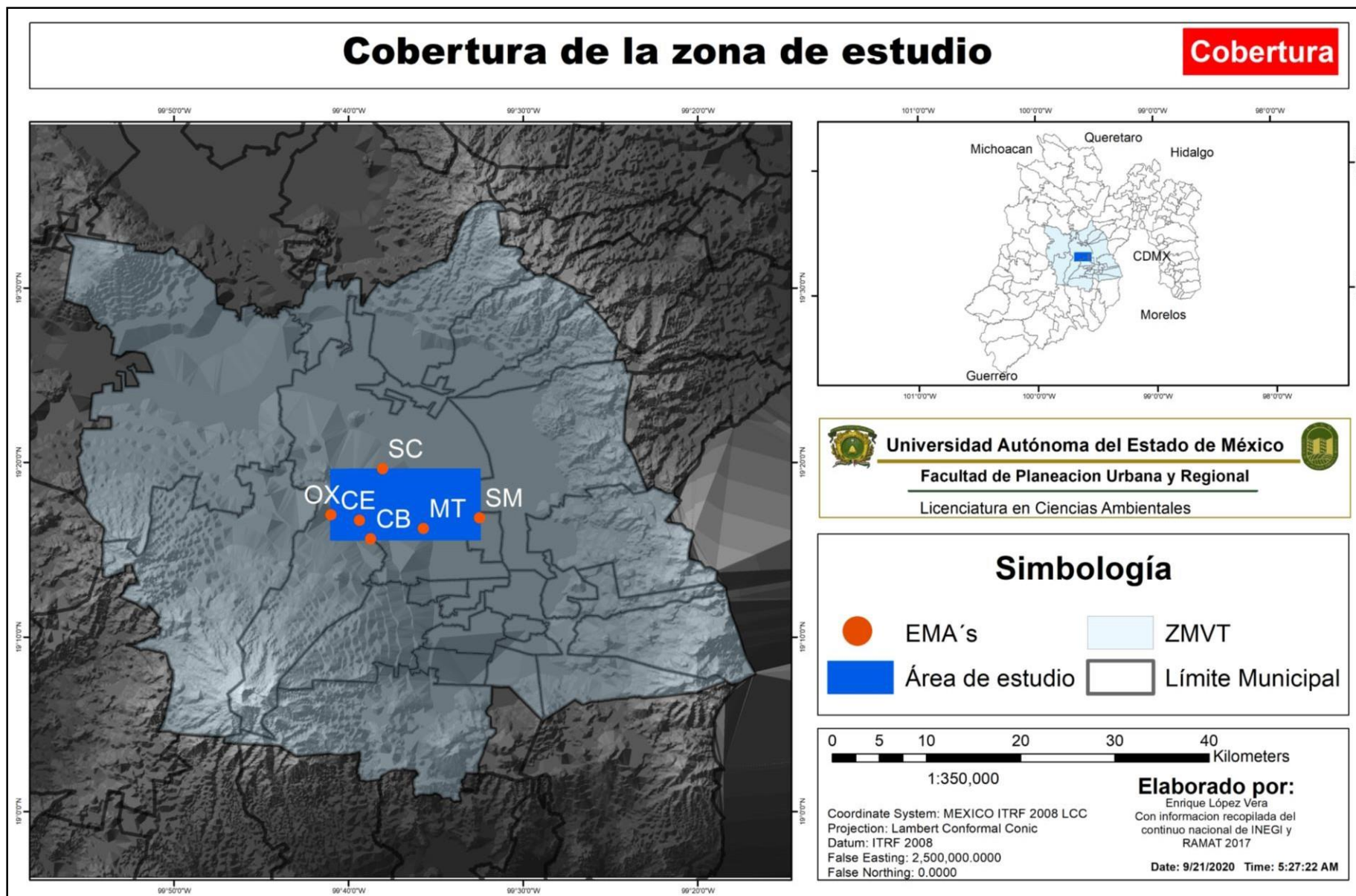
Los contaminantes criterio se encuentran normados de manera Internacional y Nacional ya que estos implican daños a la salud, es necesario que estos tengan valores límites establecidos, así como autoridades que se encarguen de realizar las mediciones y de ser necesario llevar a cabo acciones de control para minimizar el impacto que pudieran ocasionar a la población.

Capítulo 5. Resultados

En el presente capítulo, se evaluará el comportamiento de los contaminantes criterio (cc) en la zona de cobertura, delimitada para esta investigación, cabe mencionar que debido a la cantidad y posición de las estaciones estas no cubren el total de la ZMVT, como se mencionó en el capítulo anterior.

En el mapa 10 se representa la cobertura con la que se realizó el presente trabajo de investigación esto se debe a la distribución de las EMA's y el software únicamente reconoce ese espacio para realizar los cálculos en representaciones y derivar a interpolaciones IDW de cada uno de los contaminantes.

Mapa 10: Cobertura de la zona de estudio



En el mapa 10 se ubica un polígono definido como cobertura de la zona de estudio tiene una extensión de 114 Km² de los 2,704 Km² del total de los 22 municipios que conforman la ZMVT posicionado al centro de la misma, el mapa mencionado, es un entendimiento del espacio que se representara en los mapas siguientes, para facilitar su apreciación se realizaran con un acercamiento al área de estudio.

Esta área se definió de manera automática por el software ArcGIS, este es el espacio comprendido por las 6 estaciones que se encuentran activas y se delimita al Norte por la EMA San Cristóbal (SC), al Este con la EMA San Mateo Atenco (SM), al Sur con la estación Ceboruco (CB) y al Oeste con la Estación Oxtotitlán (OX) las cuales al ser las estaciones que se encuentran a las orillas dan cabida a que se limite con estos puntos, manteniéndose al interior del rectángulo las estaciones Centro (CE) y Metepec (MT).

Se resalta la importancia de la delimitación de esta zona debido a que es donde se obtienen mediciones y se puede tener mayor fidelidad de los datos puesto que es donde se registran las mediciones que fijan la calidad del aire de la ZMVT.

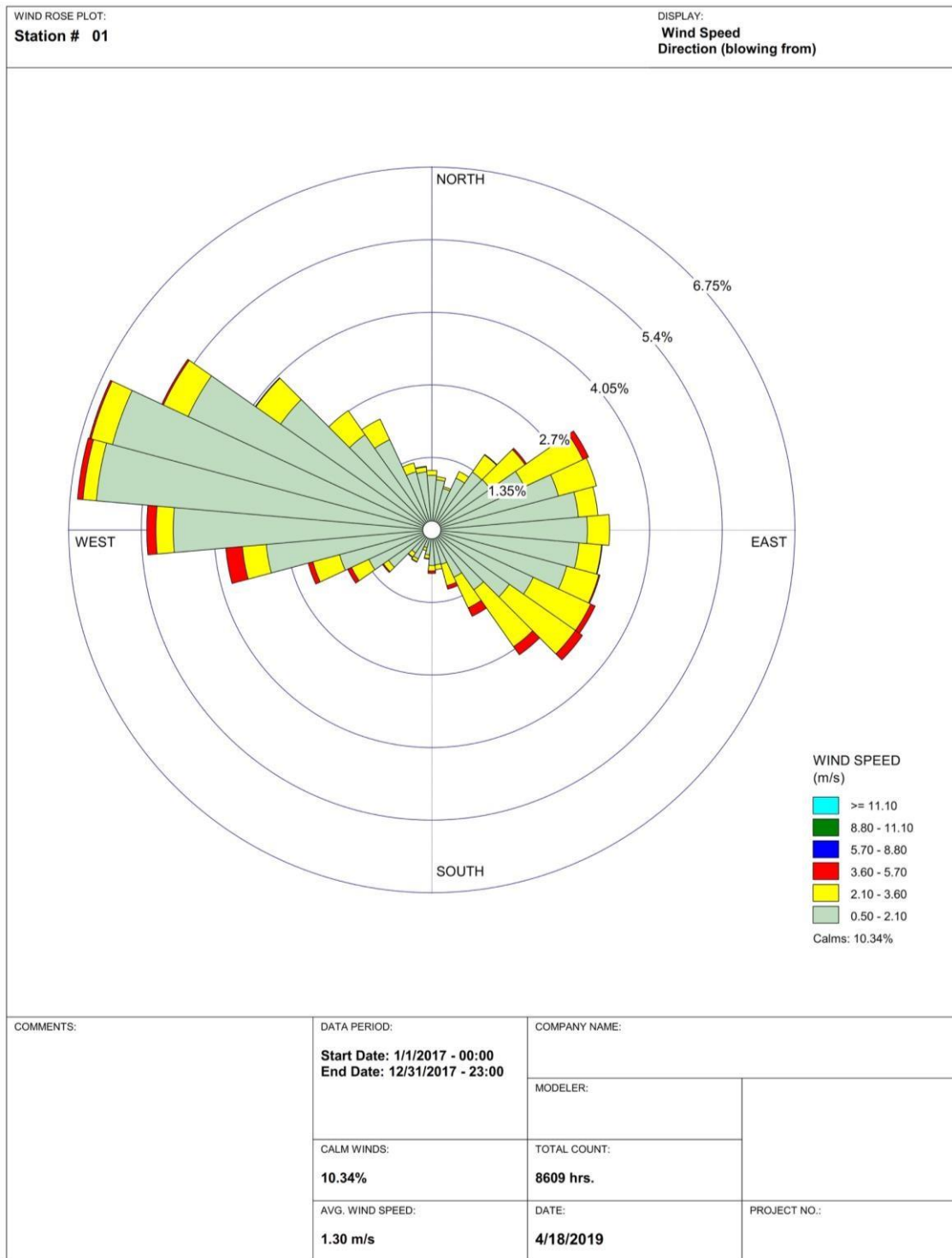
En los siguientes mapas del presente capítulo, se mostrará el comportamiento de los cc's en medición horaria en el área de estudio, así como su correlación con la velocidad y dirección del viento, los datos obtenidos para su elaboración fueron brindados por la RAMA-ZMVT de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica.

5.1 Vientos en la ZMVT

El viento que recorre un espacio durante un rango de tiempo se puede representar con una rosa de los vientos de procedencia, la cual indica el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla de diferentes direcciones tomando como punto de origen las EMA's, a continuación se mostraran las rosas de los vientos para las 6 estaciones y una general para la ZMVT las cuales fueron elaboradas en la página weblakes ingresando los 8,760 datos obtenidos de las EMA's y 52,560 para la rosa de los vientos general de la ZMVT son los 8,760 datos de las 6 estaciones para el periodo del 1° de Enero al 31 de Diciembre del 2017.

5.1.1 Oxtotitlán (OX).

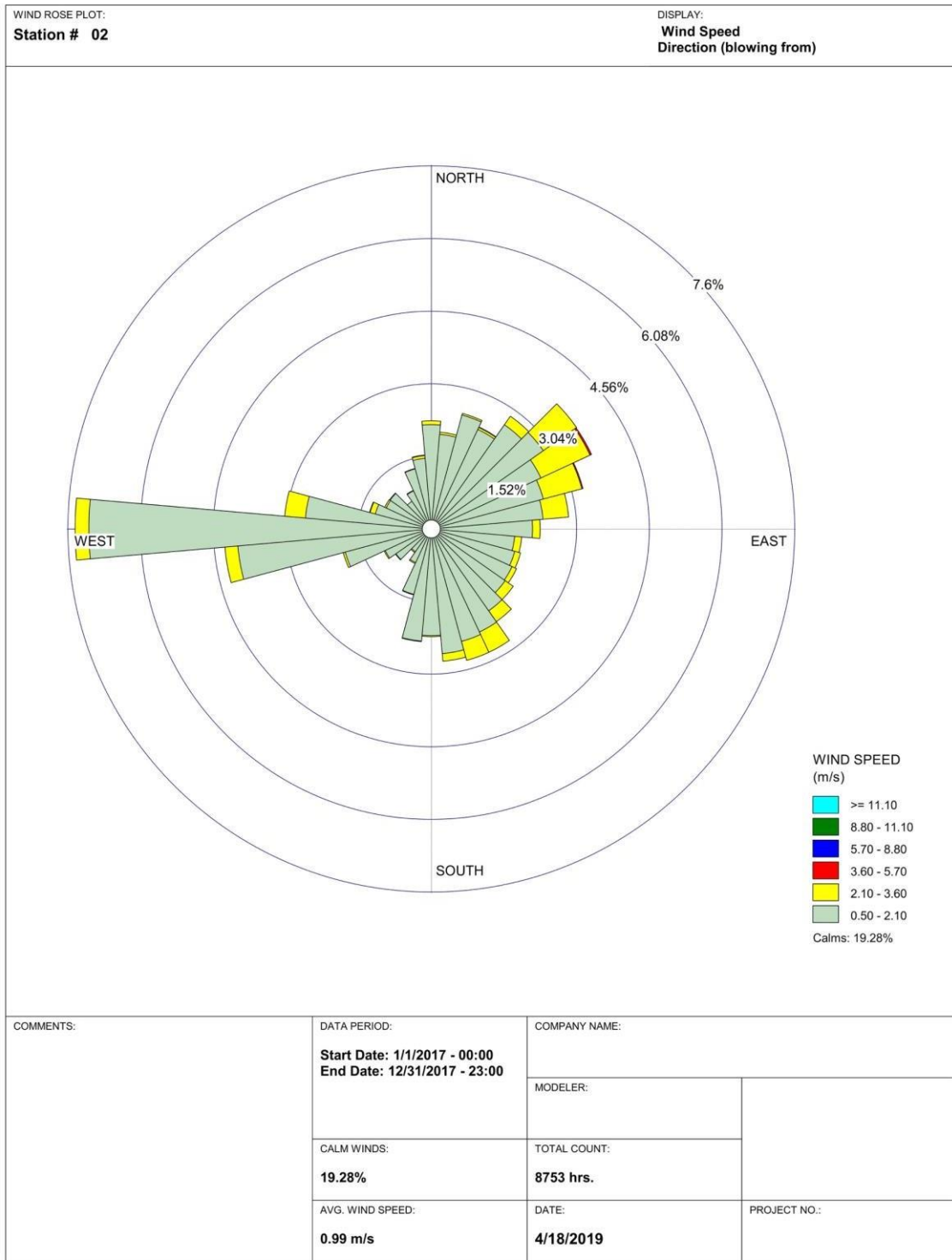
Imagen 24: Rosa de los vientos 01 Estación Oxtotitlán.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.2 Centro (CE).

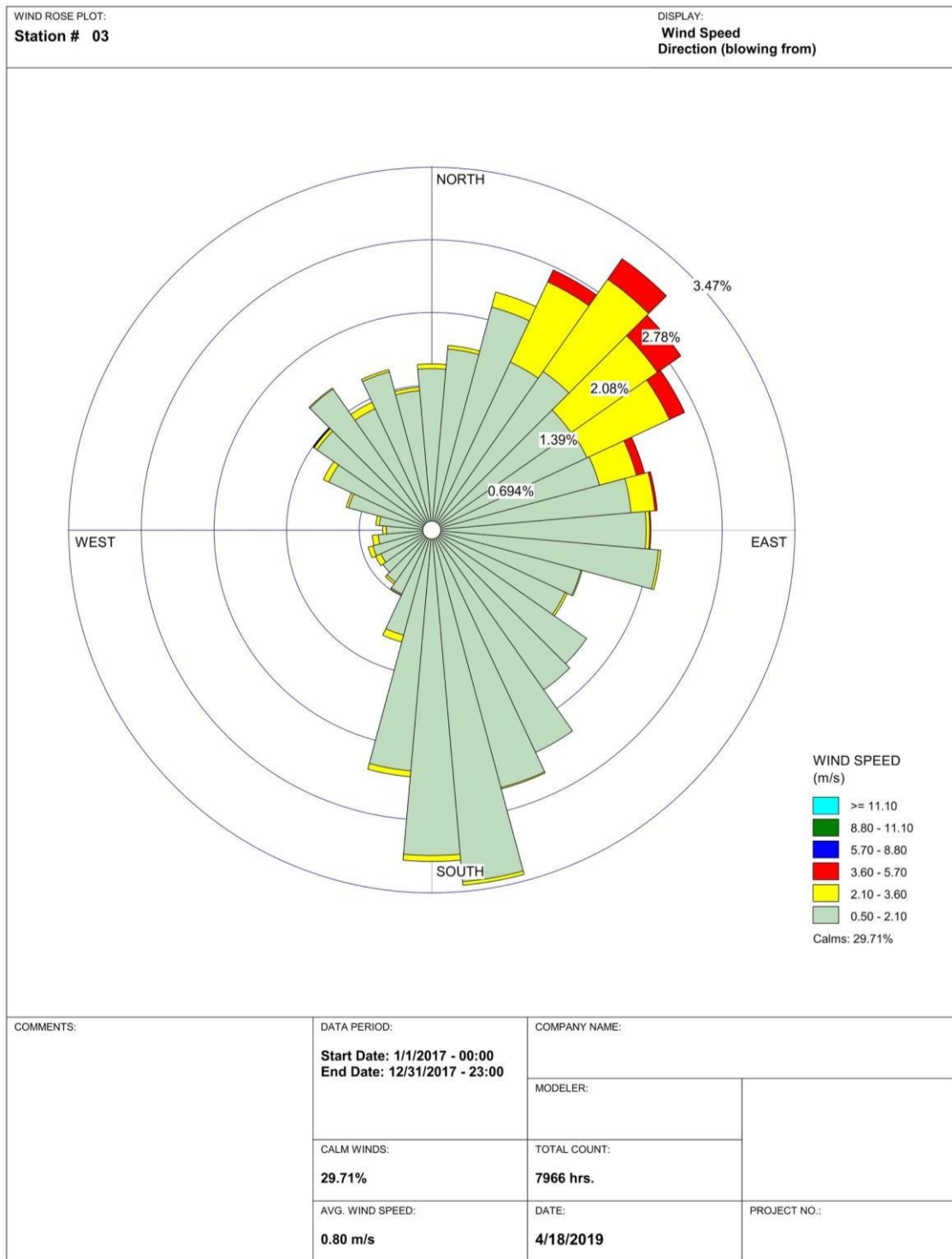
Imagen 25: Rosa de los vientos 02 Estación Centro.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.3 Metepec (MT).

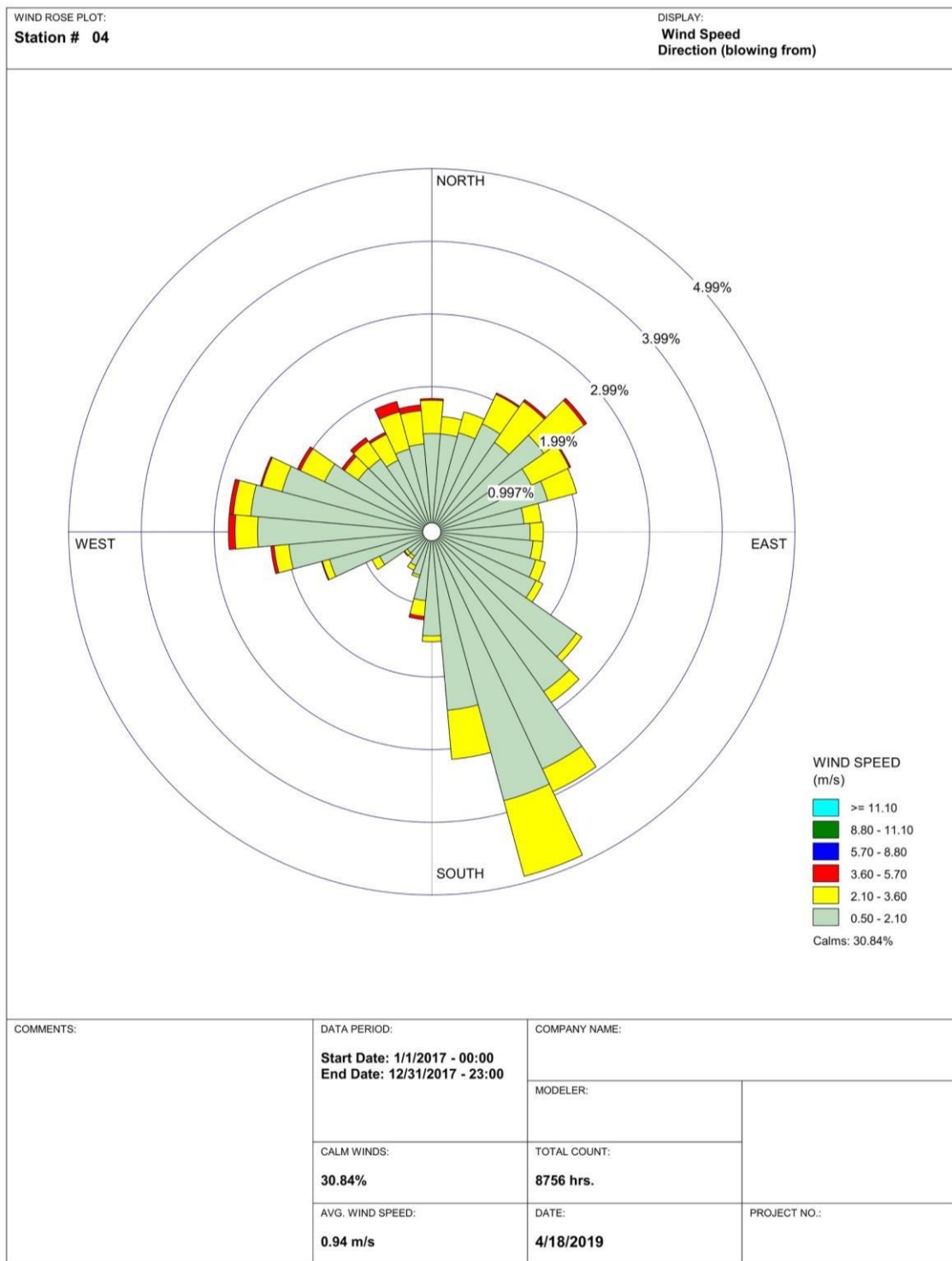
Imagen 26: Rosa de los vientos 03 Metepec



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.4 Ceboruco (CB).

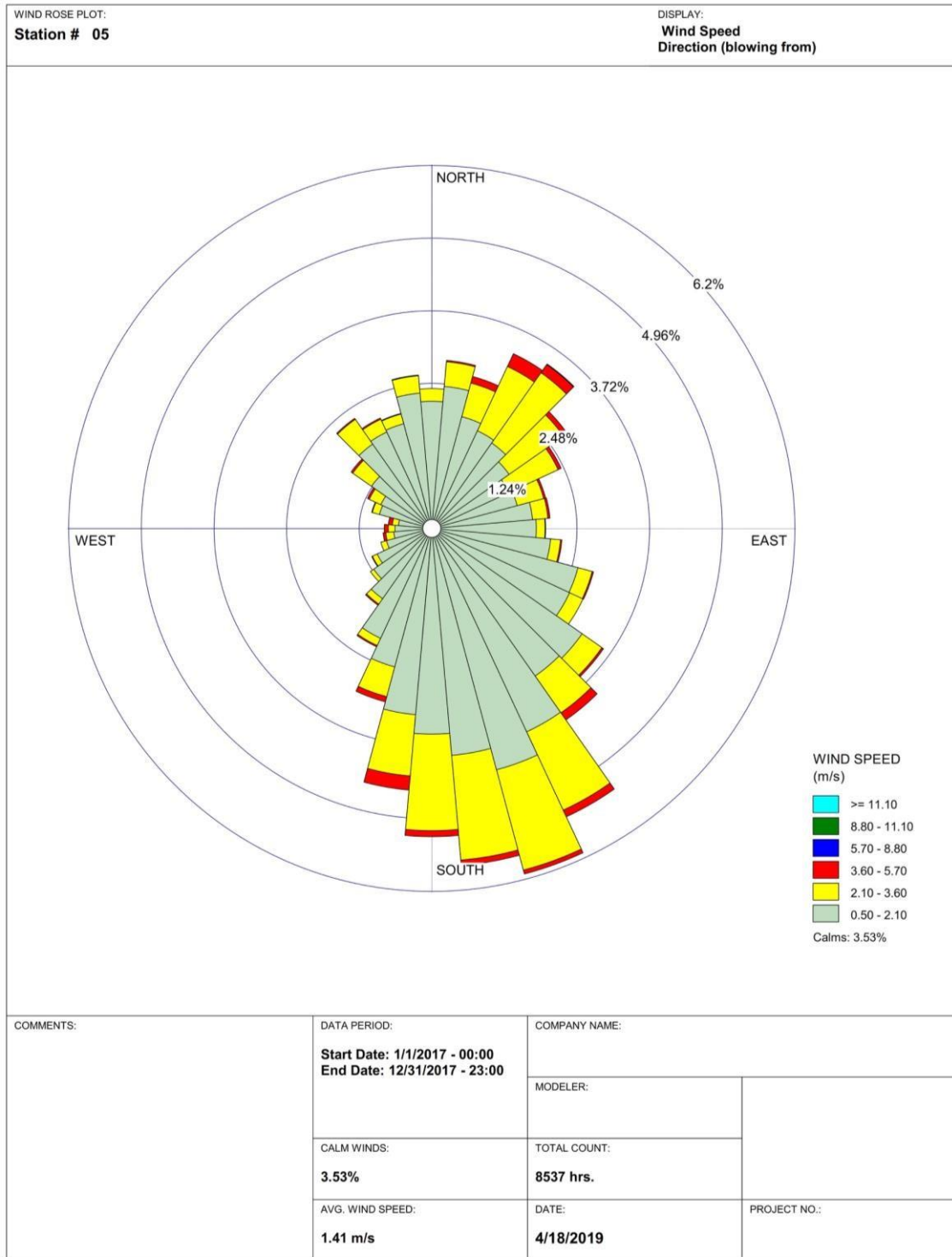
Imagen 27: Rosa de los vientos 04 Ceboruco.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.5 San Mateo Atenco (SM).

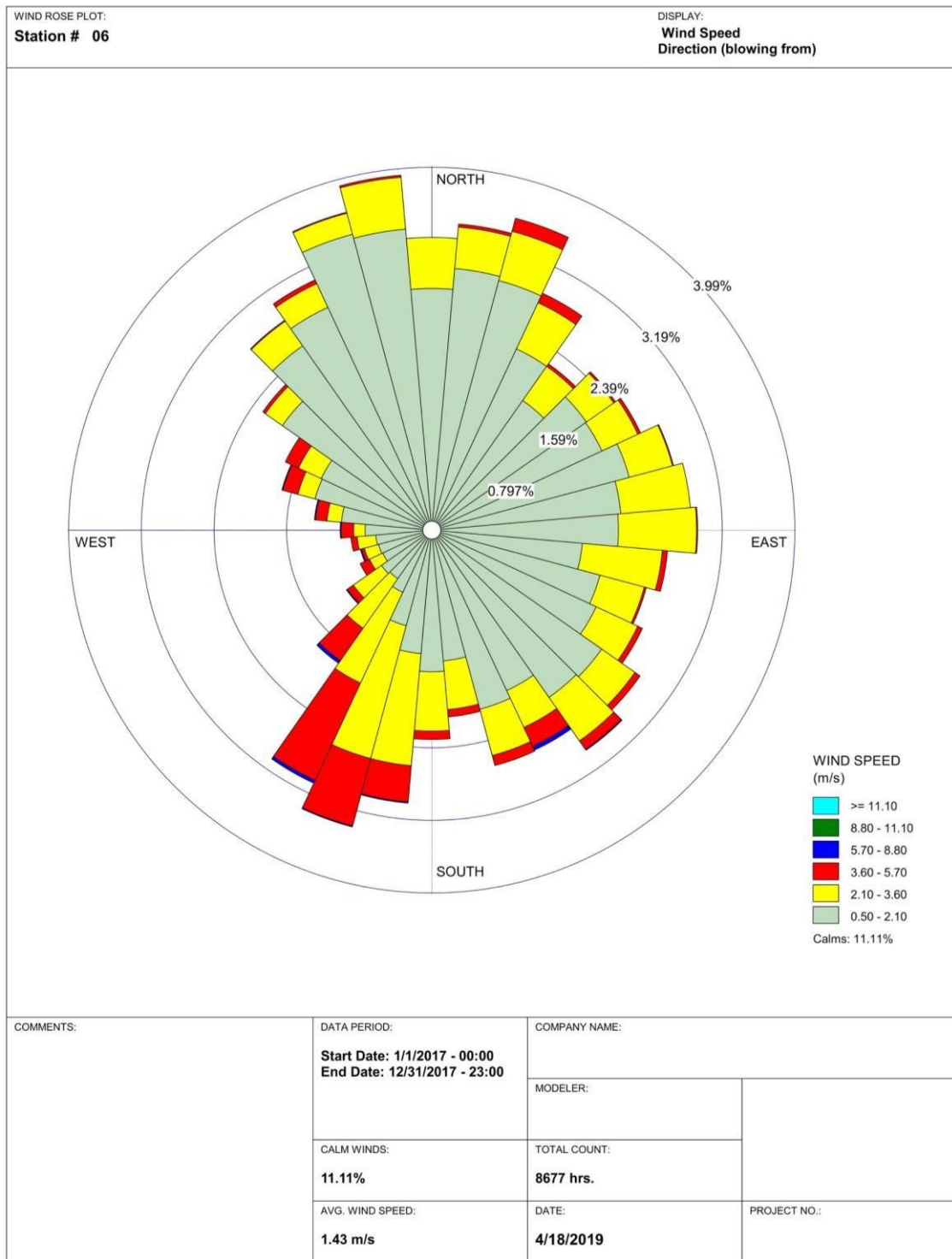
Imagen 28: Rosa de los vientos 05 San Mateo Atenco.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.6 San Cristóbal (SC).

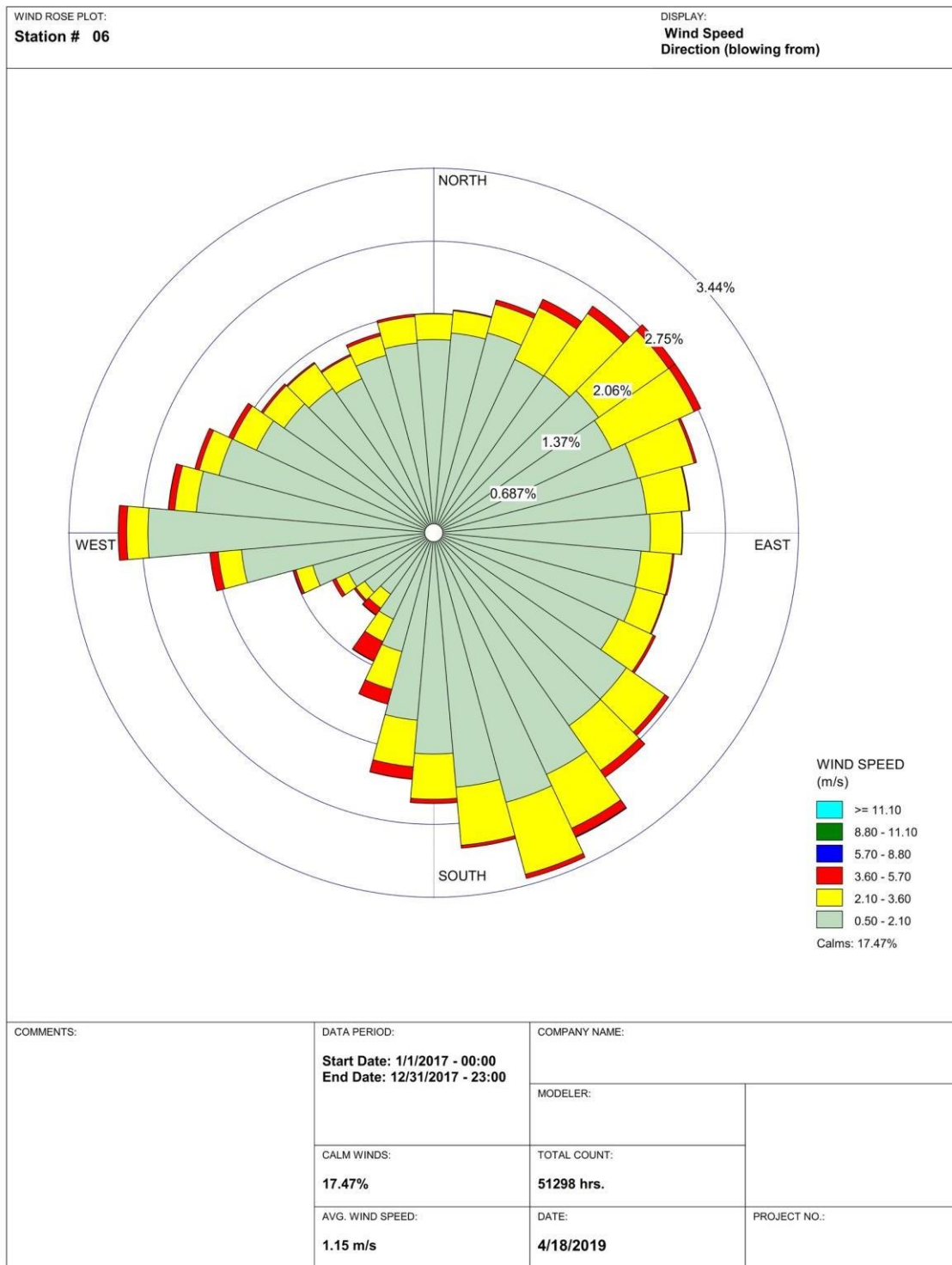
Imagen 29: Rosa de los vientos 06 San Cristóbal.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

5.1.7 Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Imagen 30: Rosa de los vientos 07 General de la ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de RAMA-ZMVT en (Weblakes, 2019).

En las rosas de los vientos de la imagen 24 a la 30, se aprecia el comportamiento de cada estación con respecto a la dirección del viento de cada año, los vientos a pesar de que en cada estación pueden tener diferencias en las direcciones que predominan, en la rosa 7 se muestran los intervalos de cada hora de todo el año en las 6 estaciones de por lo que esta sería nuestra Rosa de los Vientos general de la ZMVT, en esta se aprecia que durante todo el año en el área de estudio los vientos predominan hacia el Noreste lo cual implica el desplazamiento de los contaminantes criterio hacia esa dirección.

Para poder utilizar la información de vientos se realizó una capa de vientos para poder contrastar esta información de manera visual con las interpolaciones de los contaminantes.

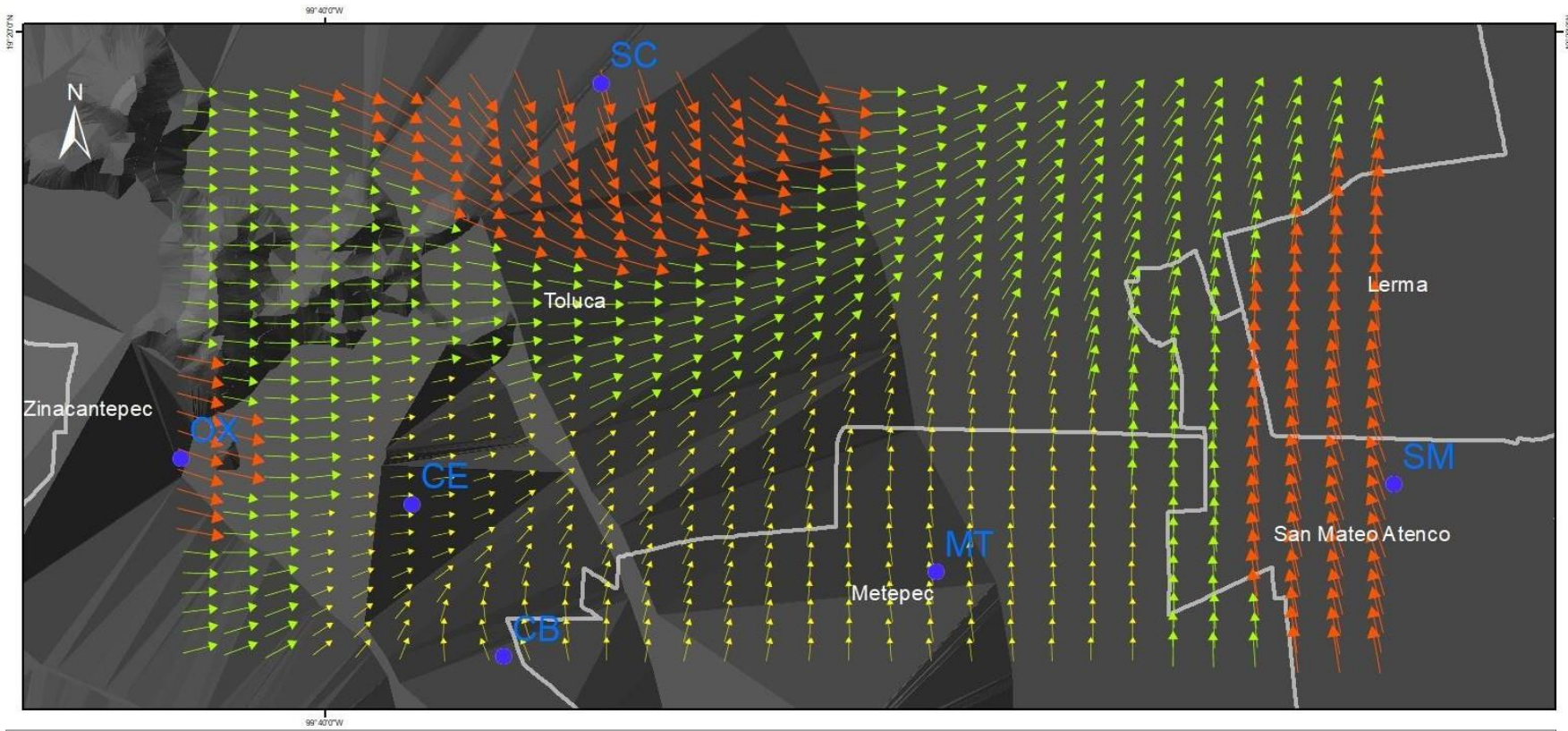
El mapa de vientos fue elaborado mediante la herramienta de interpolación IDW, donde se corrió de manera individual para la dirección como para la velocidad de los vientos estos mostrados en grados y m/s respectivamente, los cuales fueron promediados y brindados por la RAMA-ZMVT, posteriormente se creó una capa de malla de puntos con la herramienta create fishnet donde se nos permite seleccionar la extensión y cantidad de puntos los cuales no cuentan con valores asignados, para eso se utilizó la herramienta de Extracción de valores múltiples con la cual pasaremos los valores de las capas IDW de dirección y velocidad a los puntos.

Una vez que tenemos los valores asignados a los puntos se modificaron las características del símbolo pasando a vectores en el software mediante propiedades de capa, se eligió símbolos graduados para definir el tamaño y el color conforme la velocidad; para la dirección se viento se definió en propiedades avanzadas del símbolo y se cambió la rotación de los vectores. Ver mapa 11.

Mapa 11: Dirección y Velocidad del Viento

Dirección y Velocidad del Viento

Vientos




Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Planeación Urbana y Regional
 Licenciatura en Ciencias Ambientales

Simbología

- EMA's
- División Municipal

Velocidad

- ↑ 0.897686 - 1.128550
- ↑ 1.128551 - 1.285340
- ↑ 1.285341 - 1.473720

Elaborado por:
 Enrique López Vera
 Con información recopilada del continuo nacional de INEGI y la RAMAT 2017

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
 Projection: Lambert Conformal Conic
 Datum: ITRF 2008
 False Easting: 2,500,000.0000
 False Northing: 0.0000

Time: 9:03:39 AM Date: 3/31/2020

Kilometers
 0 0.5 1 2 3 4

1:50,000

En el mapa 11 se utilizaron los valores promediados obtenidos por la RAMA-ZMVT tomando en cuenta que son vectores en los cuales 0 y 360 representan el mismo valor que es el Norte se puede promediar de manera aritmética puesto que de promediar de esta manera no se tendría un valor confiable la media aritmética de 1 y 359 daría 180 lo posicionaría a los resultados al Sur del territorio.

Al tratarse de análisis horarios en un año se obtienen 8760 datos sin contemplar mediciones erróneas ya sea por fallos técnicos u operativos es por esto que se solicitó el apoyo de la RAMA-ZMVT para así trabajar con datos confiables.

Como se aprecia en el mapa 11 los vientos van predominantemente hacia el Noreste durante gran parte del año, estos moviéndose de Oeste a Este y de Sur a Norte, pero saliendo por el Noroeste, esto ocasiona que los contaminantes criterio se dispersen hacia esa zona de la ZMVT por lo que hay un desplazamiento de los mismos.

5.2 Análisis de dispersión.

En este apartado analizaremos los valores de cada uno de los contaminantes, estos mapas fueron elaborados basados en las mediciones realizadas en el año 2017 mediante la interpolación IDW.

El resultado muestra el análisis e interpretación de los parámetros reportados por la RAMA-ZMVT y colabora en el entendimiento del comportamiento que estos pueden tener para la medición de los 22 municipios y su relación con el viento.

Estos mapas fueron diseñados con base en 9 valores cada uno, a manera de estandarizarlos, estos valores son divisiones equitativas entre ellas para que así todo el mapa de dispersión de contaminantes tenga dichos 9 intervalos, pero con valores independientes por contaminante debido a que se manejan de diferente manera sus ponderaciones, de igual manera se hará mención sobre su cumplimiento o incumplimiento con las NOM's.

5.2.1 Ozono (O₃).

En el mapa 12 se muestra el resultado de la interpolación de los valores obtenidos por el ozono en la ZMVT señalando los niveles de contaminación.

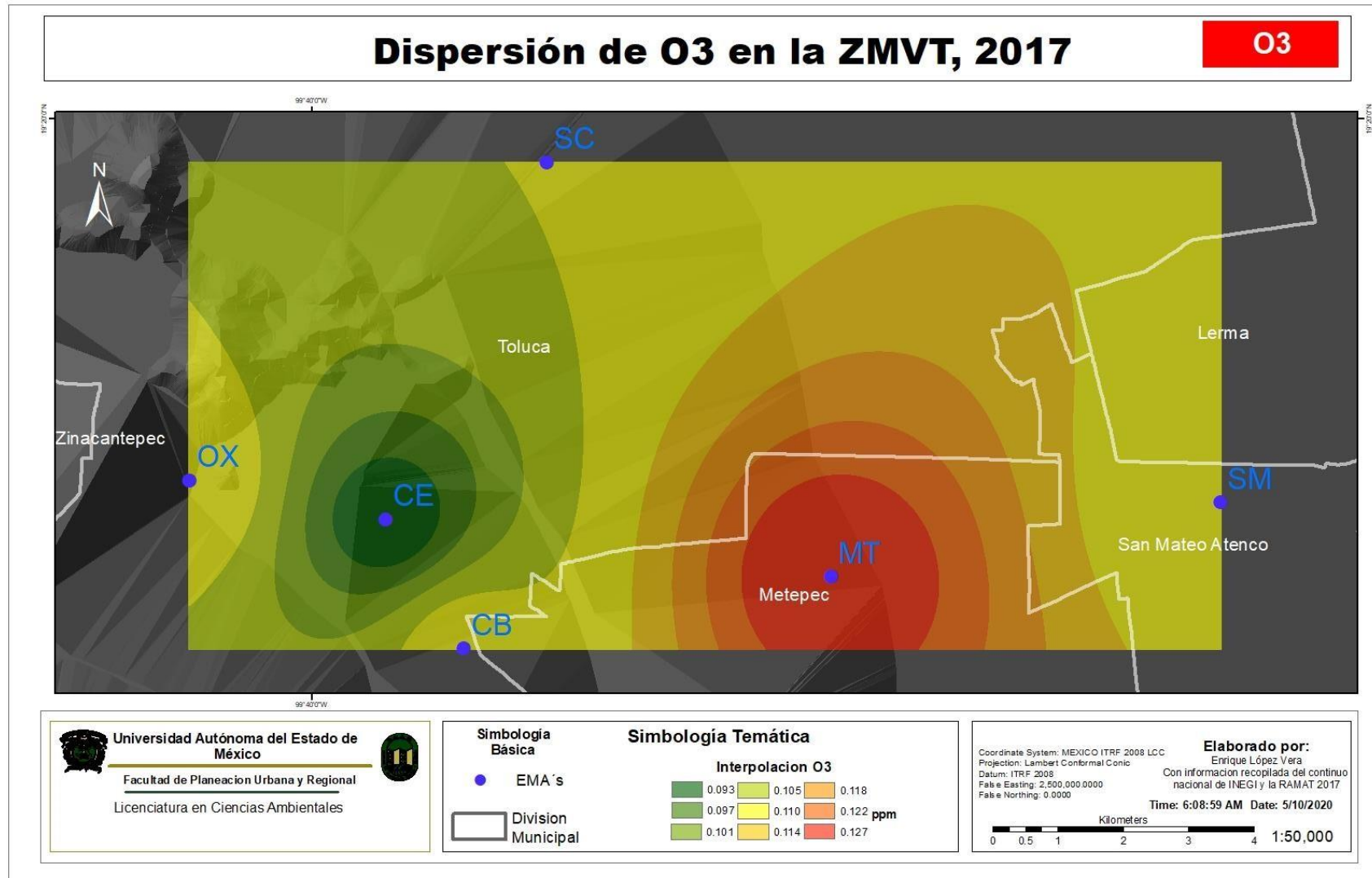
De acuerdo con la NOM-020-SSA1-2014, el límite permisible es de 0.095 ppm en intervalos de 1 hr al tener los valores promedio en el 2017 de 0.093 ppm como mínimos y 0.127 ppm los 9 intervalos con los que se trabajó la interpolación IDW fueron los siguientes ver tabla 21.

Tabla 21: Intervalos de la interpolación IDW Ozono, 2017.

0.093 ppm	0.105 ppm	0.118 ppm
0.097 ppm	0.110 ppm	0.122 ppm
0.101 ppm	0.114 ppm	0.127 ppm

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

Mapa 12: Dispersión de Ozono en la ZMVT, 2017.

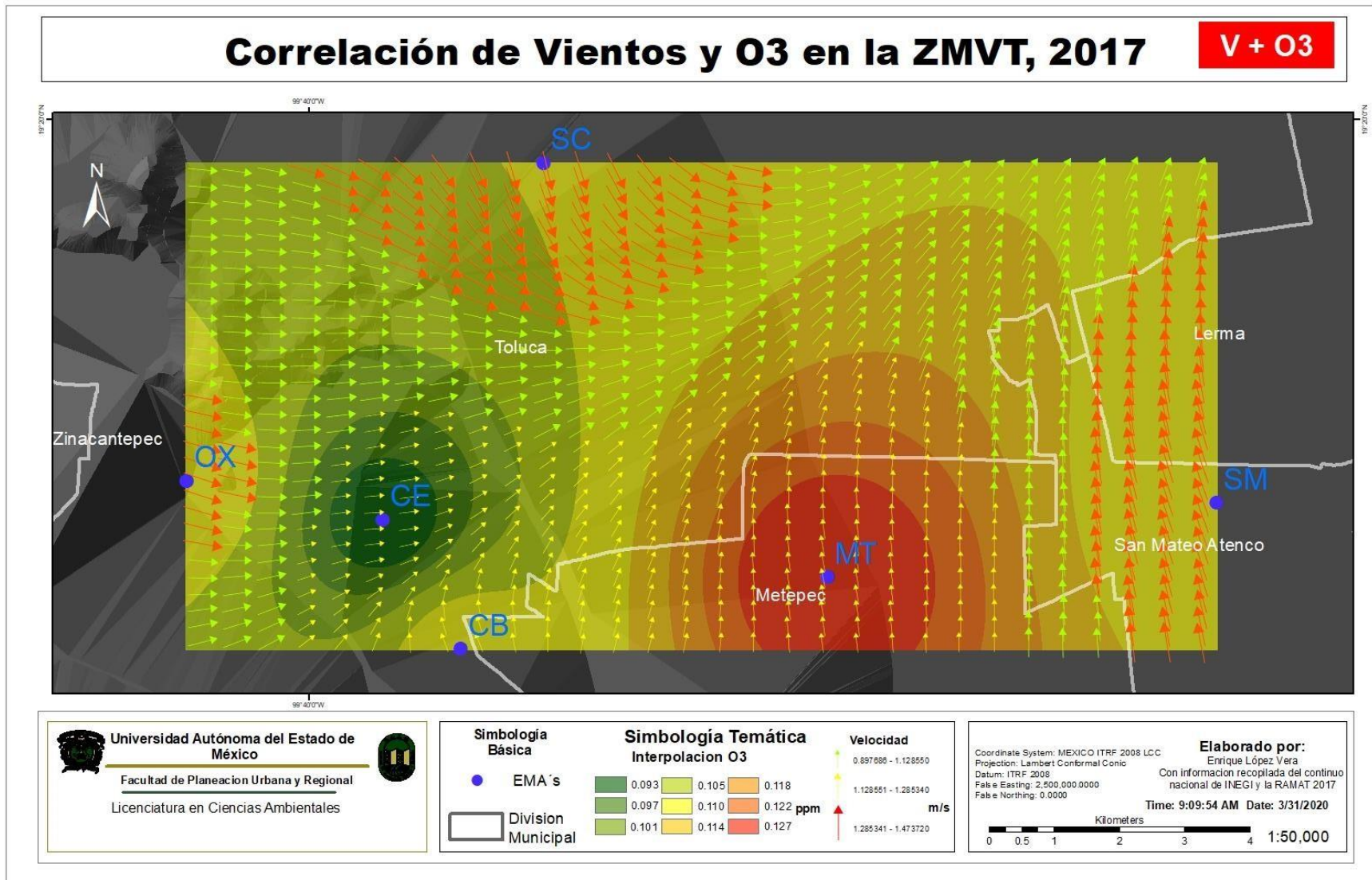


En el mapa 12 se puede observar como únicamente en una pequeña área alrededor de la estación CE es donde se cumple con el límite permisible fijado por la norma mientras que en el resto del área de estudio no se cumple con este límite, la zona de mayor afectación es la colindante con la estación MT, el intervalo de mayor cobertura en la zona analizada es de color amarillo, la cual corresponde a 110ppm.

5.2.1.1 Correlación de interpolación del O₃ con los vientos.

En el mapa 13 se sobrepuso la capa de vientos a la de interpolación del contaminante ozono para analizar el comportamiento que estos tuvieron durante el año 2017 en la ZMVT.

Mapa 13: Correlación de vientos y Ozono en la ZMVT, 2017.



Se puede apreciar que el O₃ tiende a moverse hacia la zona en la que se dirige los vientos la cual a su vez es un área de vientos moderados de menor velocidad, esto se debe a que los vientos transfirieren al contaminante a su paso debido a que es donde se encuentran las zonas de altas concentraciones.

Es una situación que se debe tomar en consideración en zonas que tienen altos niveles de contaminación de este contaminante como lo es la estación MT, en la zona Noroeste del área de estudio que es a donde se desplazan los contaminantes se puede tener afectaciones adversas de consideración en la salud humana. Puede causar problemas respiratorios, provocar asma, reducir la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares (COFEPRIS b, 2017), mientras que a la vegetación, elevados niveles de concentración de ozono son responsables de daños visibles en las hojas, reducciones en el crecimiento de las plantas y disminución de cosechas, así como de un aumento de la sensibilidad al estrés, lo cual puede repercutir en plagas, sequía y carencias nutricionales, entre otros (Generalitat Valenciana , 2015).

5.2.2 Monóxido de carbono (CO).

La importancia de la medición del CO, se enfatiza debido a que el oxígeno es distribuido por la hemoglobina de la sangre, esta hemoglobina tiene presenta menor afinidad por el O₂ que por el CO, por lo que na exposición prolongada al monóxido de carbono puede reducir la cantidad de oxígeno usado por el cerebro con consecuencias como quedar inconsciente, o incluso muerte por hipoxia (asfixia) (RAMA, 2018).

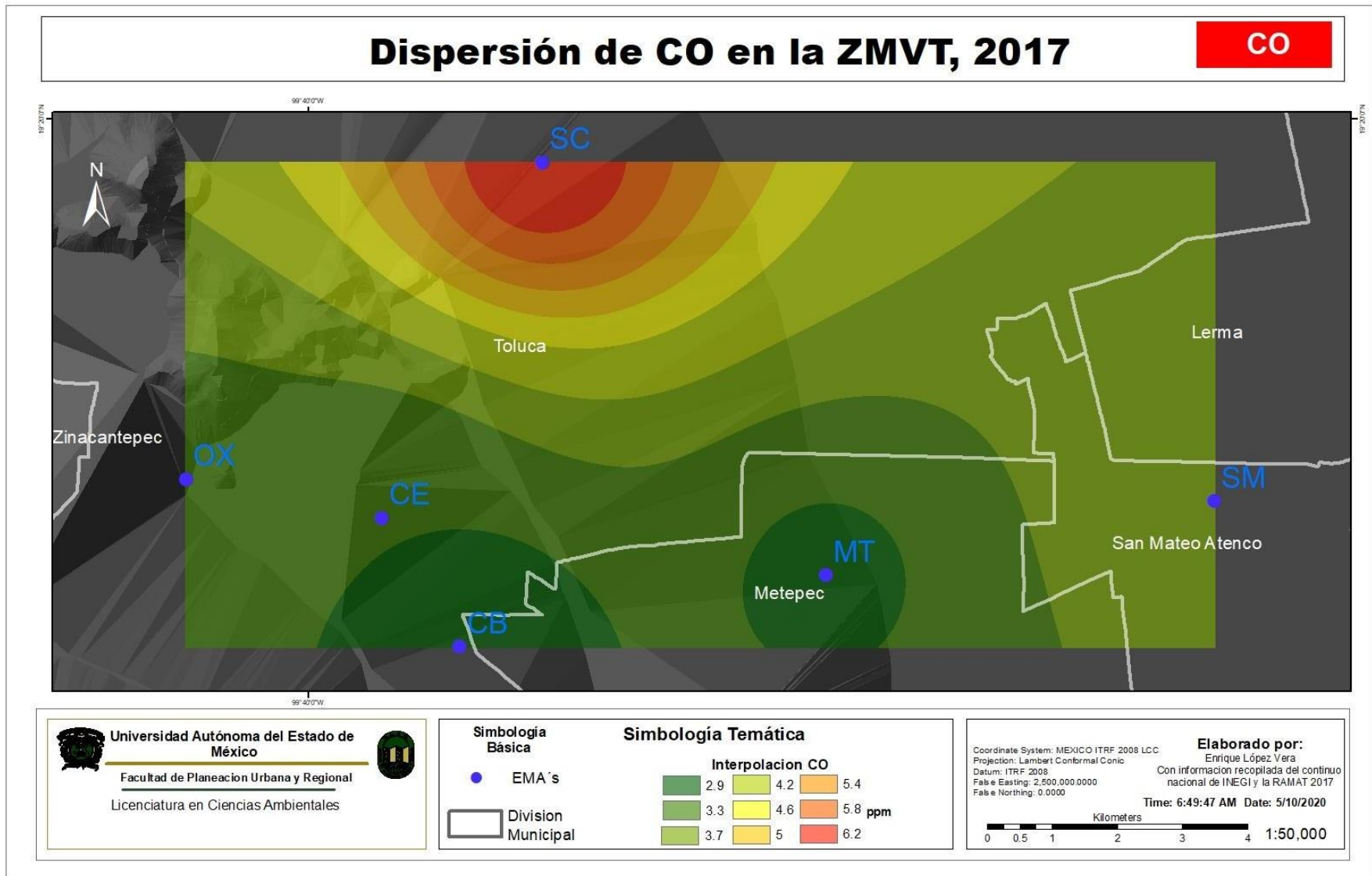
Este contaminante se encuentra normado en nuestro país, por la NOM-021-SSA1-1993 la cual fija como límite permisible el valor de 11 ppm, elaborado con la misma metodología con valores promediados, pero a periodos de 8 hrs de acuerdo a la Norma se obtuvieron valores de entre 2.9 ppm para el mínimo y 6.2 ppm, para el máximo los cuales se fraccionaron en 9 intervalos los cuales son: Ver tabla 22.

Tabla 22: Intervalos de la interpolación IDW Monóxido de Carbono, 2017

2.9 ppm	4.2 ppm	5.4 ppm
3.3 ppm	4.6 ppm	5.8 ppm
3.7 ppm	5 ppm	6.2 ppm

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

Mapa 14: Dispersión de Monóxido de Carbono en la ZMVT, 2017.

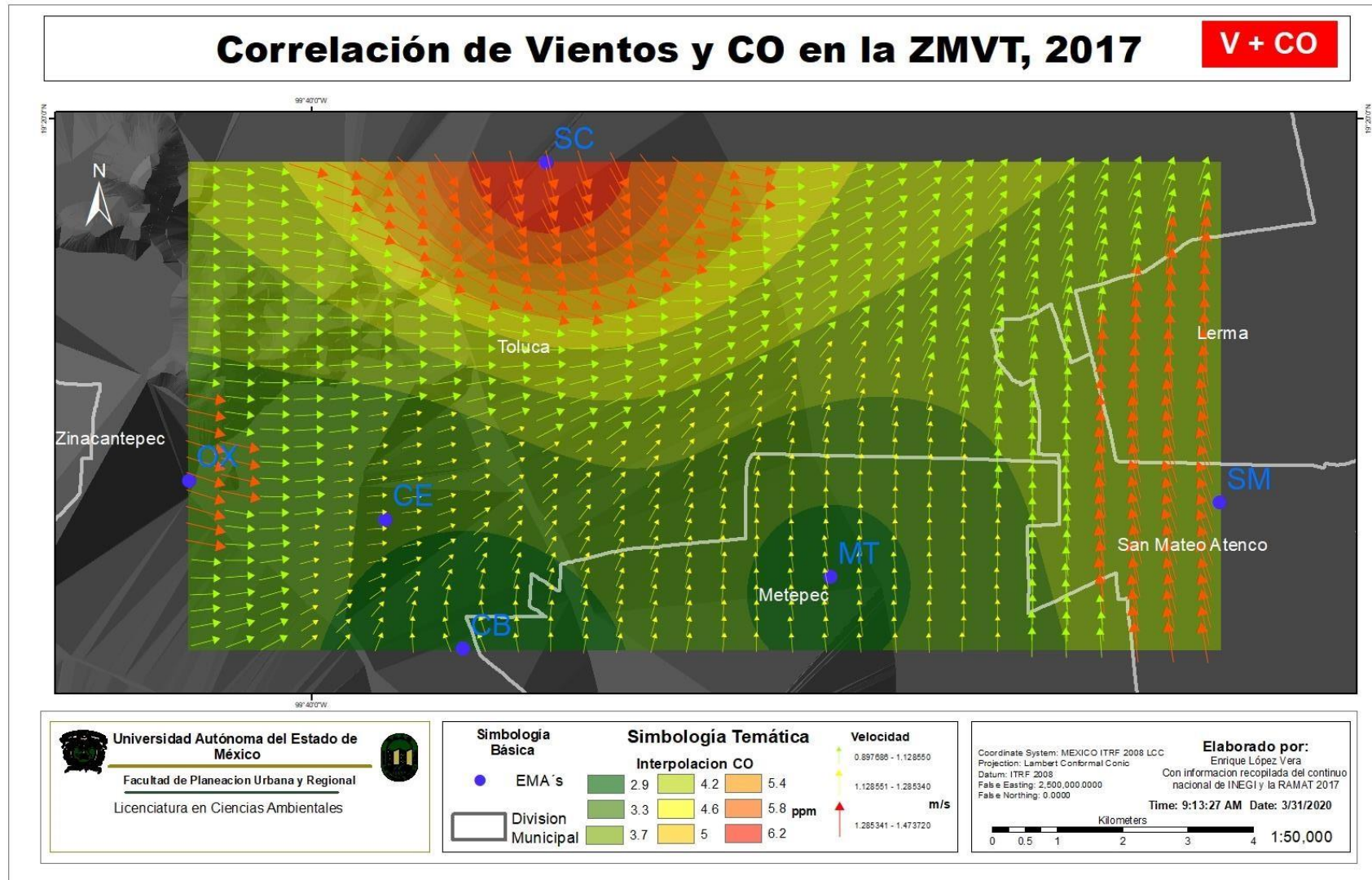


Los valores de CO obtenido en 2017 en la ZMVT se mantuvieron siempre dentro del límite permisible establecido por la Norma, sin embargo, con esta información se puede observar que la zona donde se muestran mayores niveles de concentración de este contaminante es en la estación SC.

Cabe mencionar que la estación SC ubicada al Norte del área de estudio y de la ciudad de Toluca se encuentra cerca de la vía de comunicación Alfredo del Mazo que conecta a la ciudad de Toluca con la zona Norte del país por lo que es la principal avenida de vehículos que salen con rumbo o provienen del estado de Querétaro, Hidalgo y Guanajuato por lo que cuenta con una gran afluencia de vehículos automotores, servicio de transporte público y camiones de carga diariamente.

5.2.2.1 Correlación de interpolación del Monóxido de Carbono con los vientos.

Mapa 15: Correlación de Monóxido de Carbono con los vientos en la ZMVT, 2017.



En el mapa 15, se puede observar que la zona de la estación SC es la que tiene la mayor concentración de CO en la ZMVT, se observa también que en esta área cuenta con vientos de gran velocidad. los cuales están orientados al Noreste, la zona de vientos calmados es la oriunda a las áreas de bajos niveles de CO que corresponde a la estación MT y CB.

Es de importancia mantener el monitoreo del CO a pesar de que se tengas bajos niveles debido a que es un contaminante altamente tóxico para las formas de vida aeróbicas, una característica de riesgo es que carece de olor, lo cual dificulta su detección.

5.2.3 Dióxido de Azufre (SO₂)

En este apartado se analizará el SO₂, este contaminante puede afectar al sistema respiratorio, funciones pulmonares además de causar irritación ocular. Entre los efectos derivados de la inflamación del sistema respiratorio esta la secreción mucosa, tos, agravamiento del asma y bronquitis crónica.

Este compuesto se mide en de acuerdo a la NOM-022-SSA1-2019, la cual establece el límite permisible de 0.04 ppm, sucesora de la NOM-022-SSA1-2010 entonces se manejaba en 0.11 ppm y antes de esta se trabajaba con la NOM-022-SSA1-1993 cuando era 0.13 ppm se puede apreciar que cada actualización da un decremento a estos límites permisibles.

Puesto que el trabajo está evaluando el año 2017, se considerará el valor establecido por la NOM-022-SSA1-2010 era la que se encontraba vigente en ese año, en el mapa se obtuvo el valor promedio mínimo de 0.017 y el máximo de 0.031 para el análisis anual los cuales fueron divididos en 9 clases las cuales son: Ver tabla 23.

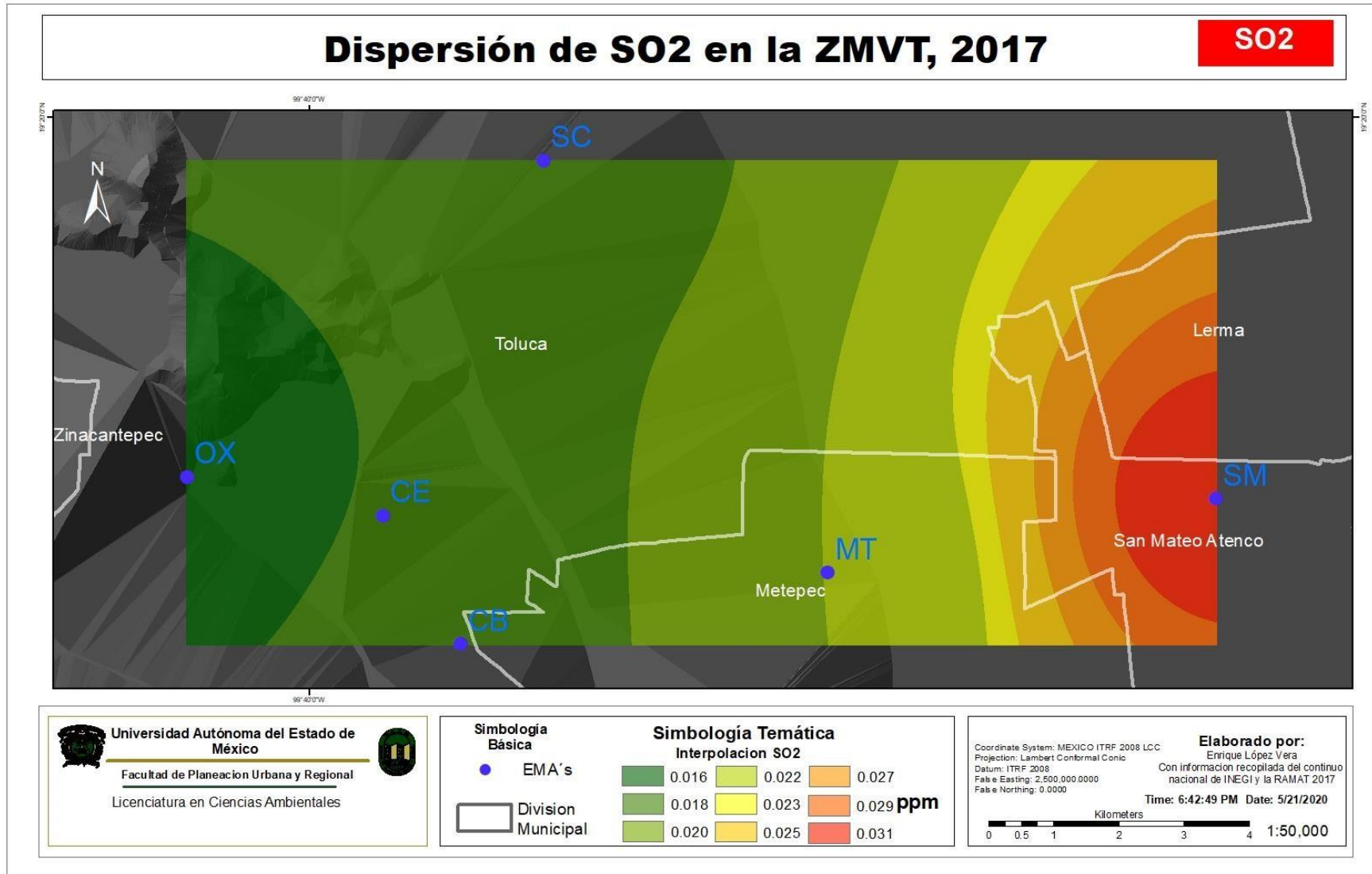
Tabla 23: Intervalos de la interpolación IDW Dióxido de azufre, 2017

0.016 ppm	0.022 ppm	0.027 ppm
0.018 ppm	0.023 ppm	0.029 ppm
0.020 ppm	0.025 ppm	0.031 ppm

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

Estos parámetros indican que de acuerdo al límite permisible de la NOM-022-SSA1-2010 el cual es de 0.11 en todas las estaciones en promedio se encontraron dentro del mismo y no presento un riesgo para la salud de los pobladores de la ZMVT.

Mapa 16: Dispersión de Dióxido de azufre en la ZMVT, 2017.

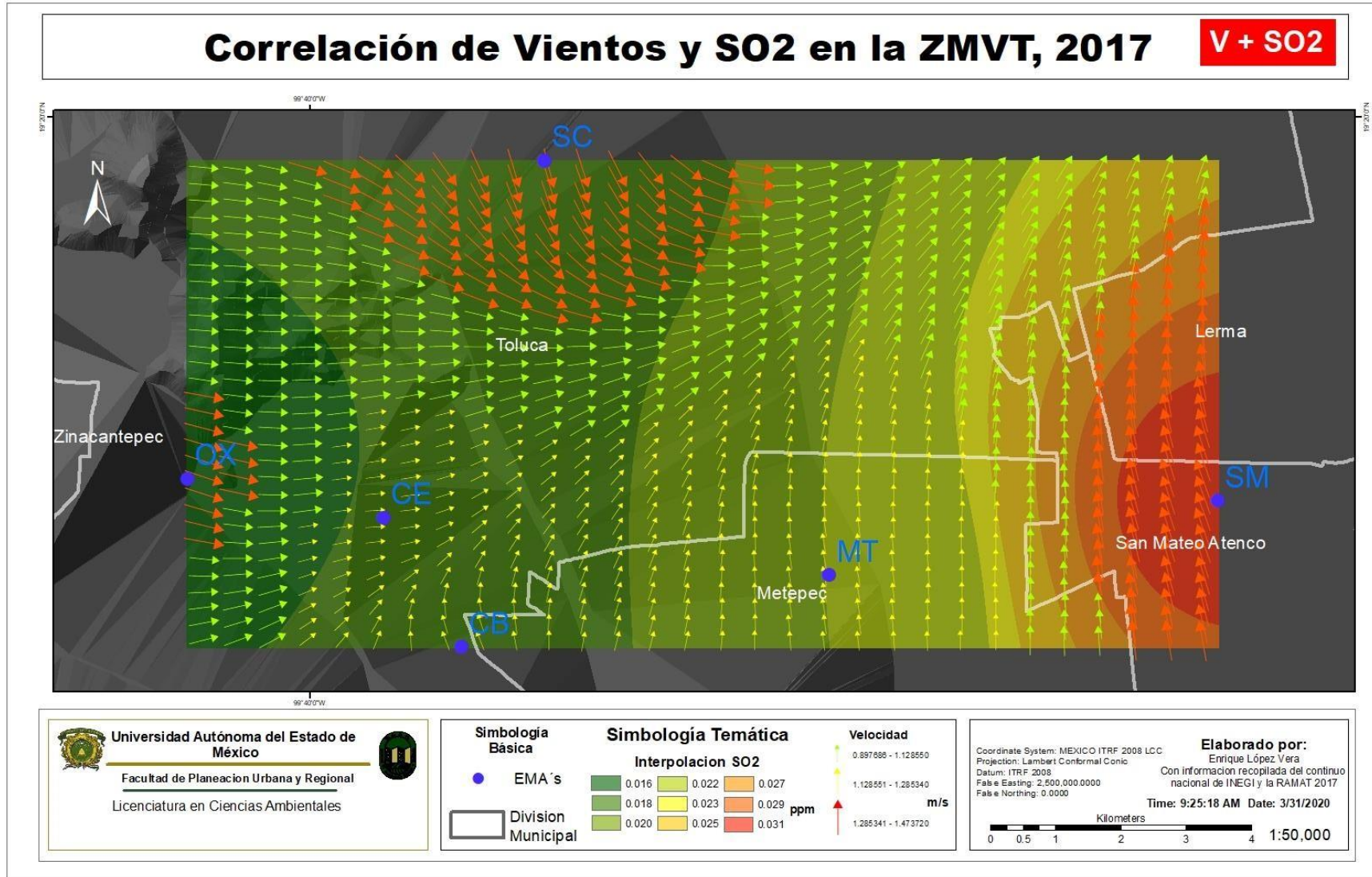


De acuerdo al mapa 16 se verifica que el comportamiento va en decremento de Este a Oeste, esto se debe a que al Este de la zona de estudio en los municipios de San Mateo Atenco y Lerma se encuentra la estación SM la cual es aledaña a la Zona Industrial de la ciudad de Toluca que es donde se lleva gran parte de la actividad económica del sector secundario, así como el cruce del Río Lerma.

La presencia del tramo del Río Lerma perteneciente a la cuenca Lerma-Santiago en esta zona es un factor a considerar puesto que de acuerdo con la periodista Salazar, Ana perteneciente al grupo milenio estos 15kms se encuentran biológicamente muertos al no contar con oxígeno lo cual repercutiría en emisión de gases, mal olor entre otros desechos (Salazar, 2017). Por otro lado, como se aprecia en el mapa al Oeste del mismo en la estación OX la cual es una zona principalmente de giro comercial/habitacional lo cual justificaría los niveles bajos de este contaminante.

5.2.3.1 Correlación de la interpolación de Dióxido de azufre con los vientos.

Mapa 17: Correlación de Dióxido de azufre con los vientos en la ZMVT, 2017.



En el mapa 17 se puede apreciar que este contaminante no mantiene un comportamiento directamente proporcional con la dirección del viento, puesto que la capa de vientos todas las estaciones mantienen una conducta direccionada al Noreste mientras que para la capa de dispersión del contaminante se orienta de manera vertical a manera de franjas teniendo los niveles bajos al Oeste y los niveles altos se mantienen al Este del mapa 17.

Es de importancia el monitoreo del dióxido de azufre debido a que al mezclarse con el agua se convierte en ácido sulfúrico el cual es el principal componente de la lluvia ácida; las principales afectaciones al volverse más ácida repercuten principalmente en el agua, la vida animal y vegetal de ecosistemas acuáticos se ve afectada debido a que la fertilidad del suelo disminuye y los microorganismos de la tierra, esenciales para el ciclo natural se resienten, de igual manera ataca a edificios antiguos y nuevos, principalmente si han sido construidos con materiales como la piedra caliza y arenisca (Ecovidrio, 2019).

5.2.4 Dióxido de nitrógeno (NO₂).

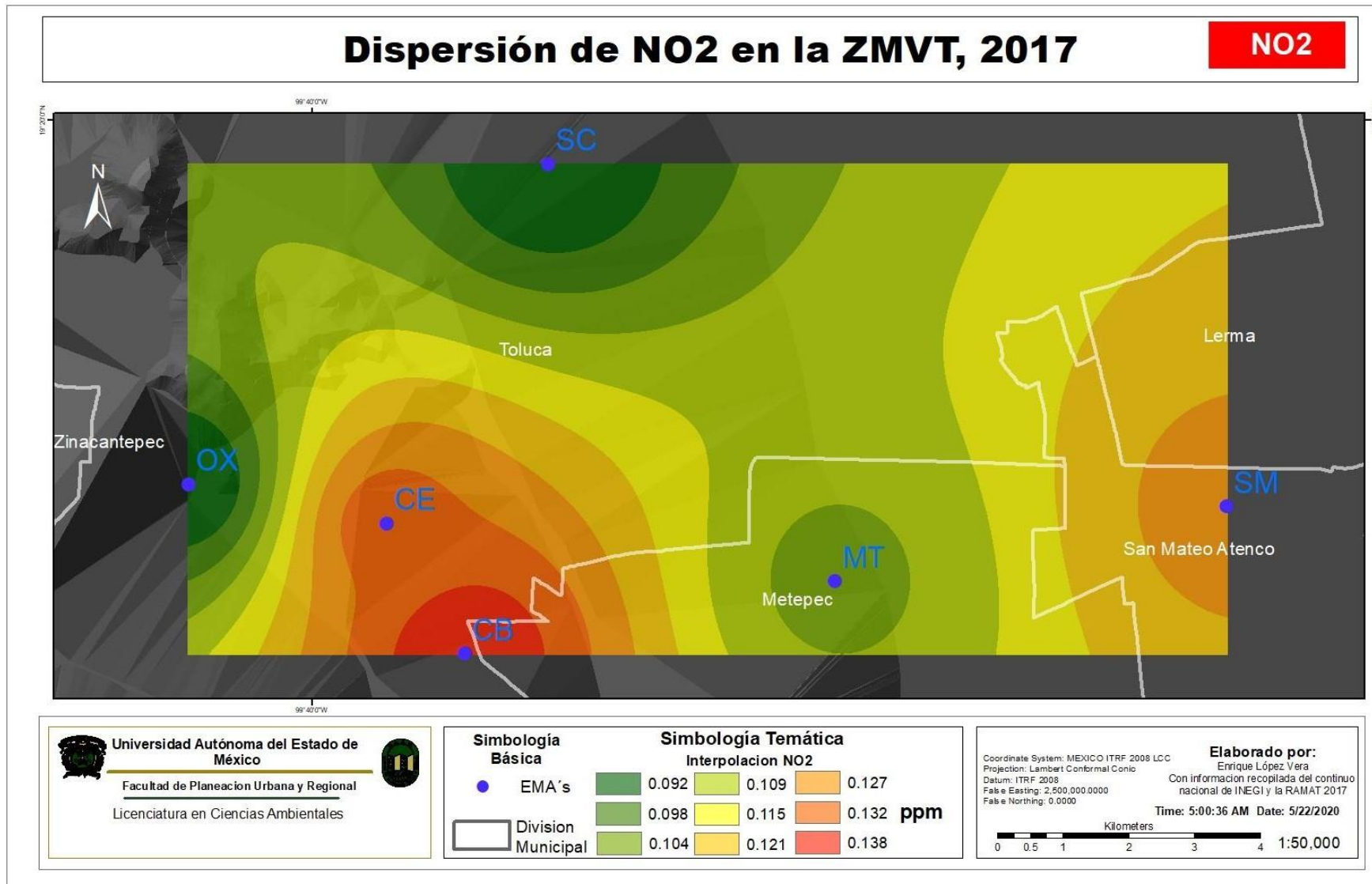
A continuación, se mostrará el mapa 18 correspondiente del NO₂, el cual se encuentra normado por la NOM-023-SSA1-1993, la cual establece el límite permisible en 0.21 ppm, para los valores registrados durante 2017, se obtuvo un mínimo de 0.092 ppm y un máximo de 0.138 ppm lo que denota que durante el año se mantuvieron mediciones de este contaminante dentro del límite permisible en la ZMVT, los intervalos que se generaron para el mapa de dispersión son: Ver tabla 24.

Tabla 24: Intervalos de la interpolación IDW Dióxido de Nitrógeno, 2017.

0.092 ppm	0.109 ppm	0.127 ppm
0.098 ppm	0.115 ppm	0.132 ppm
0.104 ppm	0.121 ppm	0.138 ppm

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

Mapa 18: Dispersión de Dióxido de Nitrógeno en la ZMVT, 2017.



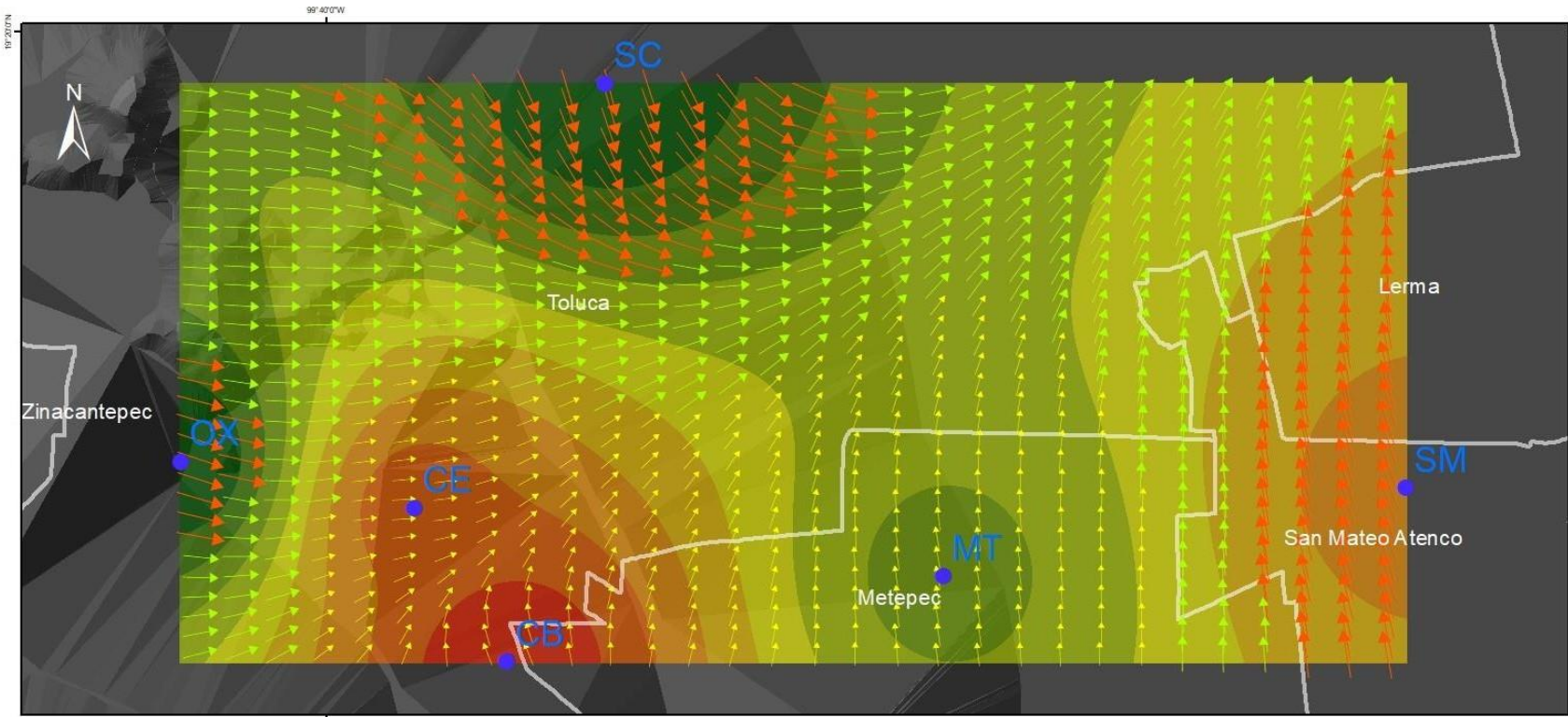
En el mapa 18, se observa que la zona de mayor concentración de este contaminante es al Sur, donde se localiza la estación Ceboruco repercutiendo sobre la estación Centro mientras que las EMA's que mantienen los niveles más bajos son San Cristóbal y Oxtotitlán localizadas al Norte y al Suroeste respectivamente, mientras que las estaciones Metepec y San Mateo Atenco presentan concentraciones intermedias.

5.2.4.1 Correlación de Dióxido de nitrógeno con los vientos.

Mapa 19: Correlación de Dióxido de Nitrógeno con los vientos en la ZMVT, 2017.

Correlación de Vientos y NO2 en la ZMVT, 2017

V + NO2




Universidad Autónoma del Estado de México
 Facultad de Planeación Urbana y Regional
 Licenciatura en Ciencias Ambientales

Simbología Básica		Simbología Temática			Velocidad	
●	EMA's	Interpolación NO2			0.897686 - 1.128550	m/s
□	Division Municipal	0.092	0.109	0.127	1.128551 - 1.285340	
		0.098	0.115	0.132	1.285341 - 1.473720	
		0.104	0.121	0.138		

Elaborado por:
 Enrique López Vera
 Con información recopilada del continuo nacional de INEGI y la RAMAT 2017
 Time: 9:24:55 AM Date: 3/31/2020

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
 Projection: Lambert Conformal Conic
 Datum: ITRF 2008
 False Easting: 2,500,000.0000
 False Northing: 0.0000

0 0.5 1 2 3 4 1:50,000
 Kilometers

De acuerdo a la correlación del mapa 19 se puede observar que las zonas Norte y Suroeste (EMA's SC y OX) son 2 de las 3 áreas que tienen vientos de altas velocidades, lo cual podría justificar los bajos niveles de concentración del NO₂ viéndose beneficiada por el traslado a zonas de baja velocidad donde la concentración va de intermedia a alta.

Sin embargo, a pesar de que al Este de la zona de estudio en la estación SM cuenta de igual manera con vientos de alta velocidad, se tiene concentración media del contaminante lo cual indica que de no contarse con la misma los niveles de concentración serían más elevados en la zona.

La importancia de la medición de este contaminante a pesar de mantener niveles bajos de acuerdo a la normatividad es debido a los efectos sobre la salud.

5.2.5 Material Particulado PM₁₀.

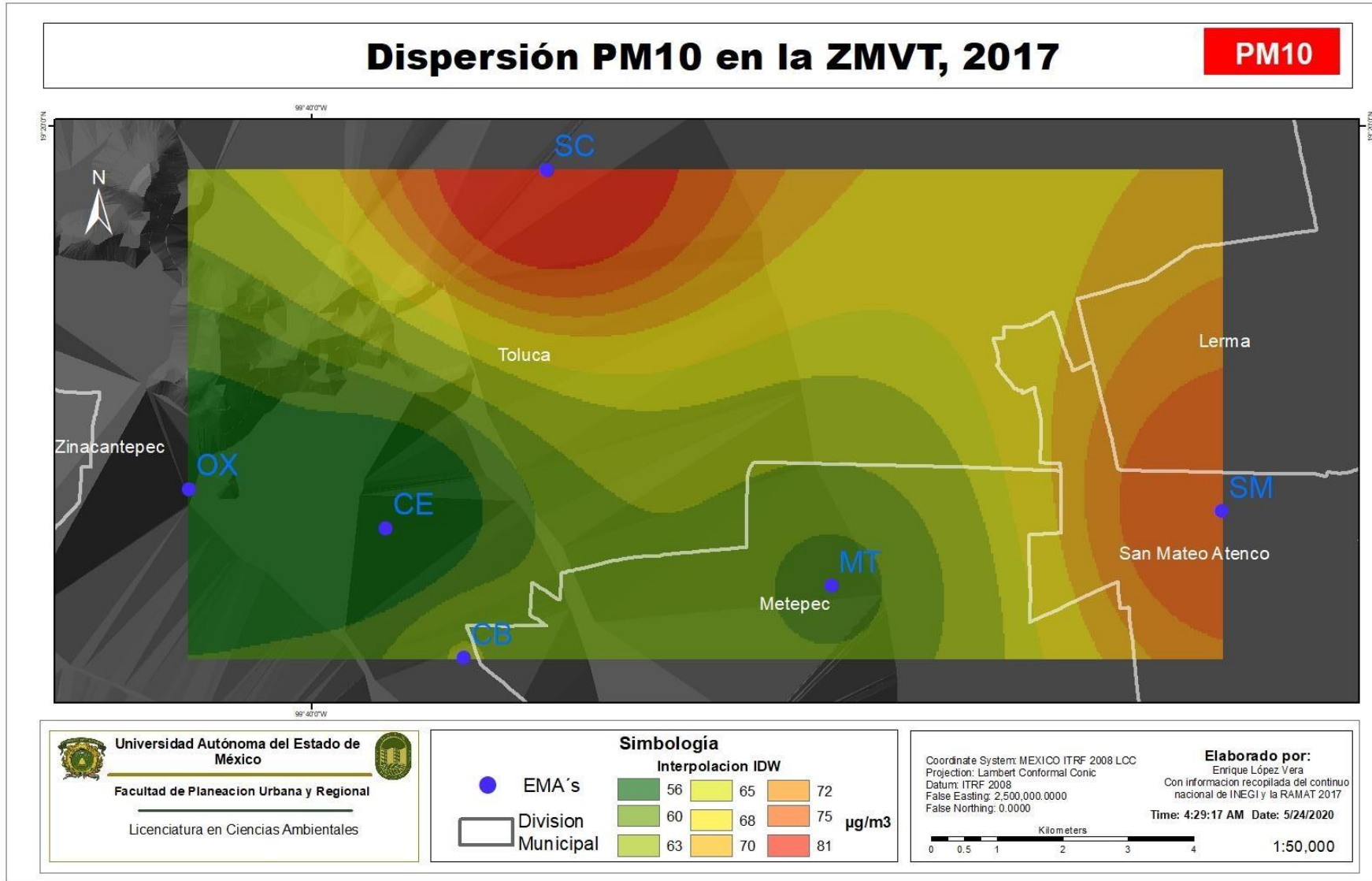
Las PM₁₀ es un contaminante atmosférico normado bajo la NOM-025-SSA1-2014, la cual establece el límite permisible en 75 µg/m³ para intervalos de 24 hrs y 40 µg/m³ para promedio anual, en cuanto a los valores registrados durante 2017 las PM₁₀ registraron un mínimo de 56 µg/m³ y un máximo de 81 µg/m³ estos promedios anuales registrados entre las EMA's son valores encima de los límites permisibles anuales por lo que gran parte del año fijado la calidad del aire se mantuvo en la categoría de regular a mala en cuanto a este contaminantes gracias al uso del indicador IMECA por lo cual no se declaró contingencia ambiental gran parte del año, los intervalos que se generaron para los mapa de dispersión son: Ver tabla 25.

Tabla 25: Intervalos de la interpolación IDW PM₁₀, 2017.

56 µg/m ³	65 µg/m ³	72 µg/m ³
60 µg/m ³	68 µg/m ³	75 µg/m ³
63 µg/m ³	70 µg/m ³	81 µg/m ³

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

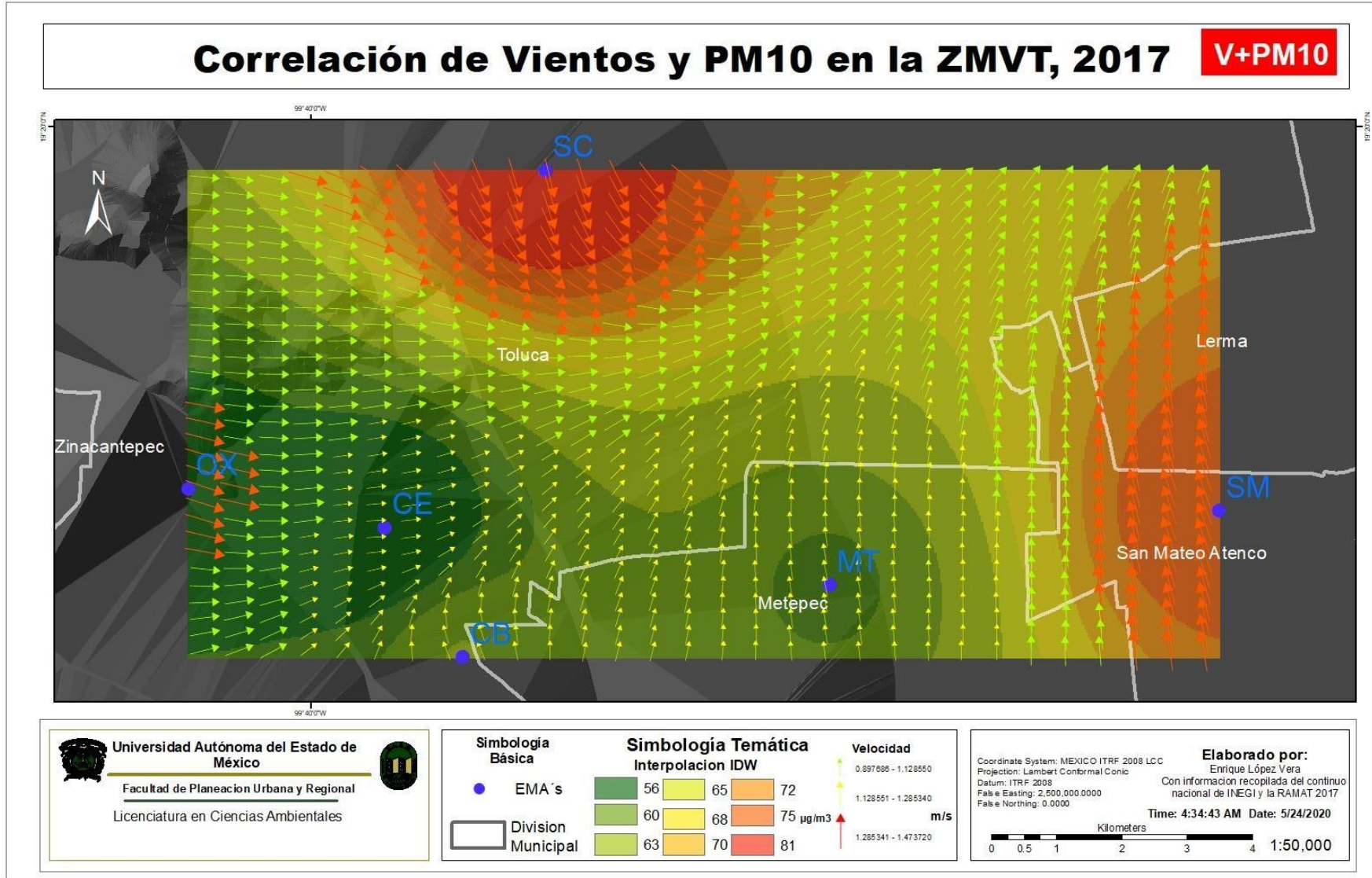
Mapa 20: Dispersión de PM₁₀ en la ZMVT, 2017.



En el mapa 20 se puede apreciar que las zonas de mayor concentración se encuentran al Norte de la zona de estudio, donde se localiza la EMA SC y al Este igualmente con niveles altos en la estación SM mientras que al Oeste y Suroeste se encuentran las estaciones con los niveles más moderados de las PM_{10} siendo estas OX y CE.

5.2.5.1 Correlación de la interpolación de las PM_{10} con los vientos.

Mapa 21: Correlación de PM₁₀ con los vientos en la ZMVT, 2017.



5.2.6 Material Particulado PM_{2.5}.

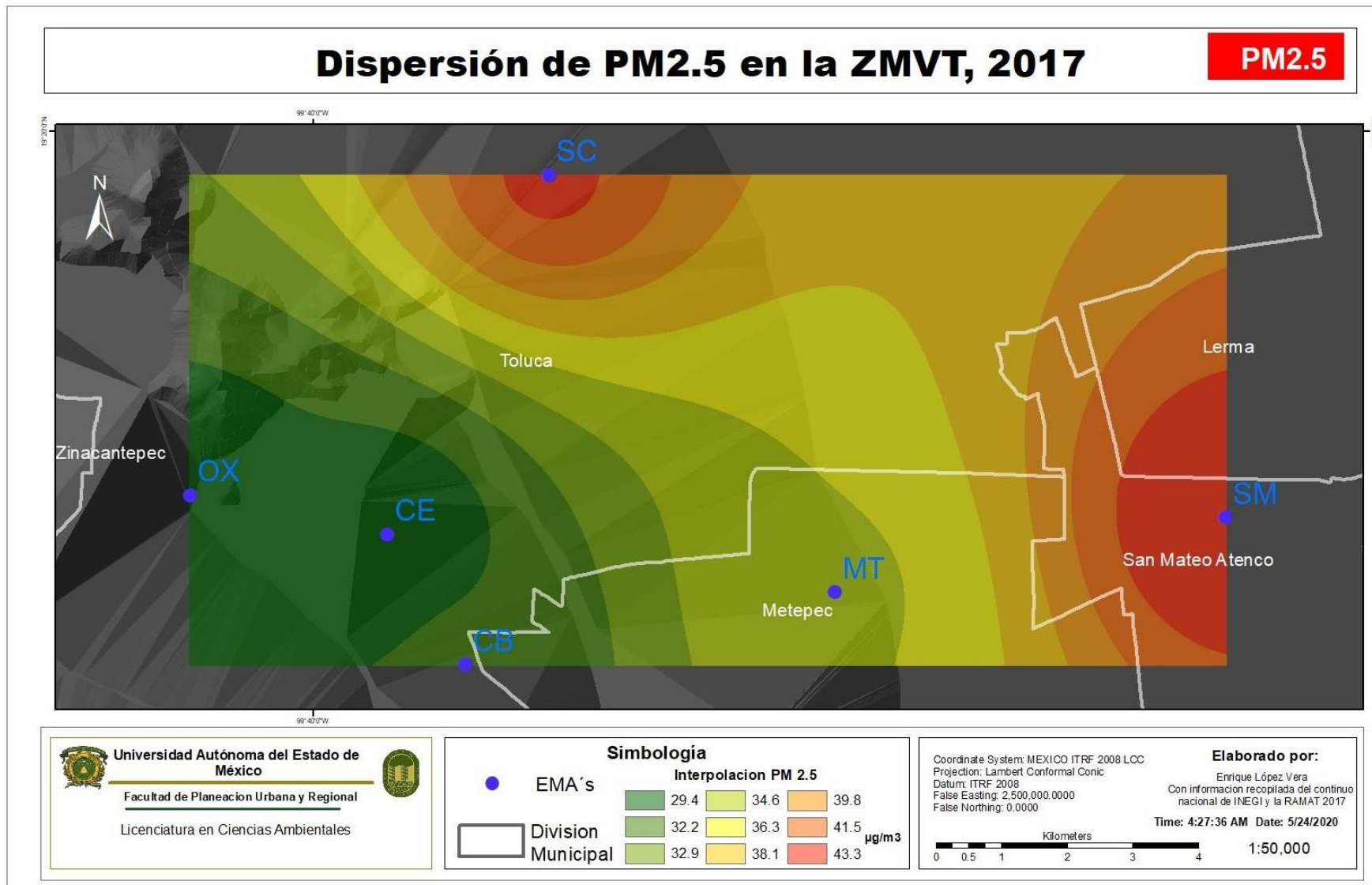
Para el caso de las PM_{2.5} este contaminante de igual manera se cuenta normado bajo la NOM-025-SSA1-2014 la cual establece el límite permisible en 45 µg/m³ para intervalos de 24 hrs y 12 µg/m³ para promedio anual, en cuanto a los valores registrados durante 2017 las PM_{2.5} registraron un mínimo de 29.4 µg/m³ y un máximo de 43.3 µg/m³ estos promedios anuales registrados entre las EMA's son valores encima de los límites permisibles anuales por lo que gran parte del año fijado la calidad del aire se mantuvo en la categoría de regular a mala en cuanto a este contaminantes gracias al uso del indicador IMECA por lo cual no se declaró contingencia ambiental gran parte del año, los intervalos que se generaron para los mapa de dispersión son: Ver tabla 26.

Tabla 26: Intervalos de la interpolación IDW PM_{2.5}, 2017.

29.4 µg/m³	34.6 µg/m³	39.8 µg/m³
32.2 µg/m³	36.3 µg/m³	41.5 µg/m³
32.9 µg/m³	38.1 µg/m³	43.3 µg/m³

Fuente: (Elaboración propia con datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, 2018).

Mapa 22: Dispersión de PM_{2.5} en la ZMVT, 2017.



En el mapa 22 se puede observar que las zonas de mayor concentración se encuentran al Norte de la zona de estudio, donde se localiza la EMA SC y al Este igualmente con niveles altos en la estación SM mientras que al Oeste y Suroeste se encuentran las estaciones con los niveles más moderados de las $PM_{2.5}$ siendo estas OX y CE.

De acuerdo con los mapas 20 y 22 se puede observar las similitudes en cuanto a la distribución de estos contaminante, a pesar de no cumplirse el límite permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana las estaciones que registraron los niveles más altos de concentración de este contaminante son la localizada al Norte (SC) y al Este (SM) de la ZMVT, esto se justifica con el uso de suelo que se tiene en dichas zonas el cual se tiene en la parte superior que es Pecuario y a la izquierda que es Industrial.

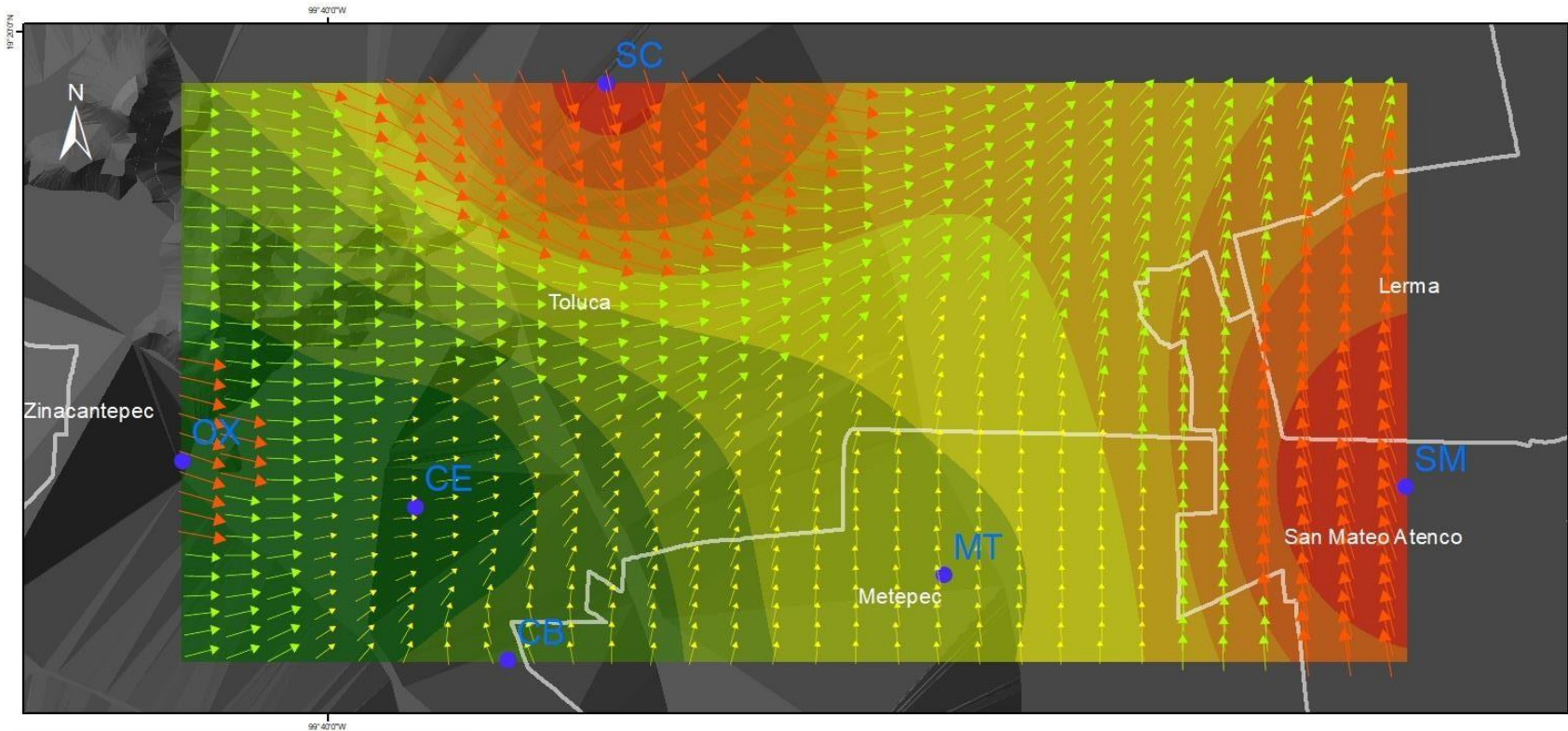
Las vías de comunicación también influyen puesto que en la EMA ubicada en el poblado de San Cristóbal Huichochitlán se tiene la vialidad Alfredo del Mazo Vélez, la cual conecta a la ciudad de Toluca con el Norte del país puesto que es la vía de comunicación que se tiene con el Estado de Querétaro mientras que la EMA localizada en el municipio de San Mateo Atenco se encuentra a la entrada de la Carretera México Toluca por lo que es una zona de gran afluencia vehicular conectado la capital mexiquense con la capital de la república mexicana.

Por otro lado, en las estaciones OX, CE, CB y MT al encontrarse en zonas más céntricas, cuentan con escasas áreas sin suelo firme y al tratarse de usos de suelos principalmente habitacionales y comerciales tienen niveles más bajos de concentración sin embargo aún estos se encuentran por encima de la norma.

5.2.6.1 Correlación de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ con los vientos en la ZMVT, 2017.

Mapa 23: Correlación de PM_{2.5} con los vientos en la ZMVT, 2017.

Correlación de Vientos y PM_{2.5} en la ZMVT, 2017 V+PM_{2.5}



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Planeación Urbana y Regional
Licenciatura en Ciencias Ambientales



Simbología Básica

- EMA's
- Division Municipal

Simbología Temática
Interpolación PM 2.5

29.4	34.6	39.8
32.2	36.3	41.5
32.9	38.1	43.3

ppm

Velocidad

0.897688 - 1.128650	m/s
1.128651 - 1.285340	m/s
1.285341 - 1.473720	m/s

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: ITRF 2008
False Easting: 2,600,000.0000
False Northing: 0.0000

Elaborado por:

Enrique López Vera
Con información recopilada del continuo nacional de INEGI y la RAMAT 2017

Time: 9:02:14 AM Date: 3/31/2020

Kilometers
0 0.5 1 2 3 4 1:50,000

En los mapas 21 y 23 se aprecia cómo se tiene en gran parte una relación entre velocidad del viento con los niveles de concentración ya que a excepción de la estación OX donde se tienen velocidades altas y concentración baja en el resto de la zona de estudio coincide de acuerdo a velocidades bajas niveles bajos registrados y vientos de velocidades altas niveles altos de concentración.

Como se había mencionado esto se puede deber a que colindante a las estaciones SC y SM el viento va en dirección a la estación por lo que para la estación SM son transferidos los contaminantes de la Zona industrial de la ciudad de Toluca hacia ella mientras que para la EMA SC la propia actividad pecuaria de gran volumen de suelo suelto combinado con los fuertes vientos de la zona son los que justificaron los elevados niveles de concentración en la zona.

Para las estaciones CE, CB y MT las cuales presentan niveles bajos de concentración y bajas velocidades de viento, en la cobertura de los mapas se puede ver como la dispersión de los contaminantes al igual que la dirección de los vientos buscan salir hacia el Noreste siguiendo una trayectoria equivalente.

Se resalta la importancia de la medición de este contaminante puesto que son compuestos con los que no se está cumpliendo el límite establecido por la normatividad y este contaminante tiene una relación cuantitativa a largo plazo entre la exposición a altas concentraciones del contaminante con el incremento de la mortalidad o morbilidad diaria.

Conclusiones

Se dio cumplimiento al objetivo general planteado al inicio de la presente investigación, con la elaboración de las dispersiones y el análisis de los contaminantes criterio PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂ y CO, lo que permitió identificar los valores máximos, mínimos y promedios anuales en la ZMVT, durante el año de estudio (2017), empleando la técnica de interpolación de IDW, obteniendo los mapas de las interpolaciones correspondientes.

Las bases de datos de cada contaminante fueron revisadas, ajustadas y limpiadas con base en los lineamientos de las normas que se encargan de regular cada contaminante: NOM-020-SSA1-2014 para el ozono; NOM-021-SSA1-1993 para el monóxido de carbono; NOM-022-SSA1-2010 para el bióxido de azufre; NOM-023-SSA1-1993 bióxido de nitrógeno, y la NOM-025-SSA1-2014 para el material particulado.

Se integraron los valores estadísticamente válidos para calcular los procesos de interpolación de dispersión, de acuerdo a las normas de cada contaminante al requerir al menos el 75% de los datos válidos, de cada estación por cada uno de ellos.

Se elaboraron las Rosas de los Vientos con los datos de cada una de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT para el 2017, lo que permitió identificar la conducta de los vientos en cada una de las EMA's y a su vez el de la ZMVT en general, encontrando. El registro de comportamiento del tiempo pone de manifiesto una marcada dominancia de los vientos del Noreste y Sureste.

Las representaciones visuales de las dispersiones elaboradas para los contaminantes criterio en la ZMVT, permitirá que las autoridades y la población de la ZMVT identifiquen con mayor facilidad la distribución y la concentración en ppm de los contaminantes.

De acuerdo a la información obtenida en las seis estaciones de monitoreo atmosférico, para los contaminantes criterio analizados, se puede confirmar la hipótesis establecida al inicio del presente trabajo de investigación, ya que las estaciones San Cristóbal y San Mateo presentaron altos niveles de concentración para cinco de los contaminantes

analizados a excepción del ozono lo que representa un 83.34% de forma conjunta, derivado de los usos de suelo agrícolas y de las vías de comunicación aledañas.

La representación espacial IDW muestra que los vientos que soplan del Noreste se dispersan en diferentes direcciones manteniéndose al Sur con vientos moderados, al Oeste con vientos de intensidad media y concentrándose los de mayor velocidad con dirección hacia el Este y Noroeste de la zona de estudio de la RAMA-ZMVT.

Contrastando la información de los mapas de dispersión de los contaminantes criterio, con la de los vientos, se evidencia que existe una relación directa entre la velocidad y la dirección del viento con los niveles de concentración de los contaminantes medidos para las EMA's; lo cual representa un riesgo para la salud de los pobladores de la ZMVT y en general para el ambiente debido a las afectaciones que pueden provocar, de tal manera que al contar la población con este tipo de representaciones gráficas le permitirá tomar medidas preventivas.

Recomendaciones

Derivado de los resultados obtenidos en la presente investigación, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- El incremento en el número de las EMA's, para ampliar la cobertura monitoreada en el ZMVT de siete a los veintidós municipios que la conforman.
- Elaborar proyecciones sobre la conducta de los contaminantes criterio a corto y mediano plazo, mediante la información recolectada en las EMA's apoyándose de los SIG para estimar las zonas que puedan tener mayores niveles de concentración a futuro con el objetivo de mantener informada a la población de la ZMVT.
- Facilitar a la población herramientas de visualización mediante el uso de los SIG, respecto al comportamiento y dispersión de los contaminantes criterio, con la finalidad de favorecer medidas y acciones de medición y control a favor de una mejor gestión de la calidad de aire en la ZMVT.
- Continuar con estudios de investigación al respecto del comportamiento de los contaminantes criterio en la ZMVT.
- Informar oportunamente a la población a través de medios digitales (difusión en la página del GEM y redes sociales), así como con la distribución en centros de salud de materiales impresos (carteles, folletos, trípticos, etc.) sobre los riesgos que conlleva la exposición a estos contaminantes con el objetivo de desarrollar conciencia ambiental y de esta manera buscar la reducción de estos contaminantes.

Bibliografía

- AEMA. (2015). *El medio ambiente en Europa: Estado y perspectivas*. Copenhague: Informe de síntesis Agencia Europea de Medio Ambiente,.
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013). *Calidad del aire en Europa*. Copenhague: Green Facts. Obtenido de <https://www.greenfacts.org/es/calidad-aire-europa/highlights-air-pollution-europe-es.pdf>
- Aire CDMX. (01 de Enero de 2020). *El monitoreo de la calidad del aire*. Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>
- Arrambide-Olvera, J., & Guajardo-Quiroga, R. (2002). Índices de intensidad de contaminación atmosférica: una aplicación para el Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 179-189.
- Bickel, J. (2005). *Desarrollo de capacidades de monitoreo de calidad del aire en Amdel América Central y Sudamérica*. Sao Paulo: Programa Regional Aire Limpio.
- Bolaños, M. P., & Chacón, A. C. (2017). Intoxicacion por monoxido de carbono. *Medicina legal de Costa Rica.*, 14-19.
- Carrasco, J. (2012). Red de estaciones de observación atmosférica en la Antártica, una colaboración internacional para la investigación del cambio climático. *Anales Instituto Patagonia*, 57-63.
- Casella: Monitoring and Measurement Equipment. (10 de Enero de 2020). *Sensores de velocidad y dirección y de viento*. Obtenido de <http://casella-es.com/wp-content/uploads/2013/07/Sensores-V-y-D-de-viento-Casella.pdf>
- CeMCAQ. (2017). *Dióxido de Azufre*. Obtenido de El Centro De Monitoreo De La Calidad Del Aire Del Estado De Querétaro: <http://www.cemcaq.mx/contaminacion/bioxido-de-azufre-so2>
- Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional. (15 de Enero de 1998). *Ozono*. Recuperado el 10 de Mayo de 2020, de Efectos sobre la salud del Ozono: http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/ozone/health_ozoml
- COESPO. (2014). *Zonas metropolitanas del Estado de México*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2018, de Zonas metropolitanas del Estado de México: http://coespo.edomex.gob.mx/zonas_metropolitanas
- COFEPRIS a. (31 de Diciembre de 2017). *Antecedentes (aire ambiente)*. Recuperado el 08 de octubre de 2018, de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/antecedentes-aire-ambiente>

- COFEPRIS b. (31 de Diciembre de 2017). *Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>
- COFEPRIS c. (31 de Diciembre de 2017). *Clasificación de los contaminantes del aire ambiente*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- Cómision Europea. (2018). *Una Europa que protege: Aire puro para todos*. Bruselas: Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0330&from=FR>
- Comunidad de Madrid. (08 de Enero de 2020). *Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid*. Obtenido de Descripción de la Red: https://gestiona.madrid.org/azul_internet/html/web/3.htm?ESTADO_MENU=3
- Consejo de la Unión Europea. (07 de Junio de 2018). *Acuerdos internacionales sobre acción por el clima*. Obtenido de <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/international-agreements-climate-action/>
- Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. (2015). *Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey*. Monterrey: SEMARNAT.
- Davydova-Belitskaya, V., Nickolaevich-Skiba, Y., N. Bulgajov, S., & Martínez, A. (1999). Modelación matemática de los niveles de contaminación en la ciudad de Guadalajara,. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 103-111.
- Díaz-Suárez, V., & Páez-Pérez, C. (2006). Contaminación por material particulado. *Acta Nova*.
- Dirección de Monitoreo Atmosférico de la CDMX. (21 de Septiembre de 2018). *IMECA*. Obtenido de Índice METropolitano de la Calidad del Aire: <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>
- Dirección General de Estadística e Información Ambiental. (2002). Aire. En V. Lichtinger-Waisman, & A. Cárdenas-Jiménez, *Compendio de estadísticas ambientales* (págs. 155-178). CDMX: Dirección General de Estadística e Información Ambiental.
- Ecovidrio. (24 de Enero de 2019). *¿Qué es la Lluvia Ácida?* Obtenido de Ecólatras : <http://blog.ecolatras.es/sostenibilidad/que-es-la-lluvia->

atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 97-116.

- García-Chávez, M. d. (2014). *Análisis correlacional entre el incremento de los automóviles particulares y la concentración de partículas menores a diez micrómetros (PM10) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante el periodo 2006-2011*. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Toluca: UAEMex.
- GEM. (2012). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca (2012-2017)* (1 ed.). Metepec, Estado de México, México: Gobierno del Estado de México.
- Generalitat Valenciana . (2015). ¿Cómo incide el Ozono en el medio y la Salud. En E. Mantilla, N. Castell, R. Salvador, C. Azorin, M. Millán, J. V. Miró, & L. Juan, *Ozono troposférico y calidad del aire* (págs. 17-18). Valencia: Unión Europea.
- GIS Geography. (25 de Octubre de 2017). *Interpolate*. Obtenido de Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation: <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>
- Gobierno CDMX. (18 de Marzo de 2019). *El monitoreo de la calidad del aire*. Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhtml=%27>
- Gobierno del Estado. (2007). *NTEA-007-SMA-DS-2006*. Secretaria de Medio Ambiente. CDMX: Poder Ejecutivo. Recuperado el 26 de Noviembre de 2018, de http://rama.edomex.gob.mx/sites/rama.edomex.gob.mx/files/files/rama_pdf_ntea.pdf
- Gobierno del Estado de México. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad, Proaire 2018-2030*. Toluca: GEM.
- González-Pérez , C. (21 de Marzo de 2013). *Introducción al Análisis Volumétrico*. Salamanca, Salamanca, España.
- Guajardo-Quiroga, R., & Arrambide-Olvera, J. (2002). Índices de intensidad de contaminación atmosférica: una aplicación para el Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. *Revista Internacional de Contaminación*, 179-189.
- Gutiérrez-Reyes, J., Romero Guzmán, E. T., Reyes Gutiérrez, L. R., Sandoval Pérez, A., & Aguirre Campuzano, C. E. (2018). *Bioaerosoles depositados vía húmeda-seca en la zona metropolitana del valle de Toluca*. Toluca: El ININ hoy.
- H. Ayuntamiento de Toluca. (15 de Febrero de 2016). *Programa Municipal de protección civil*. Obtenido de Información pública de oficio mexiquense:

ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2018/115/1/c18bfb2058d4378a47d5e3d18629696f.pdf

Hernández-Romero, J. C., Madrigal Uribe, D., & Morales Méndez, C. (2004). Comportamiento del monóxido de carbono y el clima en la Ciudad de Toluca, de 1995 a 2001. *Ciencia Ergo Sum*, 263-274.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Pilar-Baptista, L. (2010). *Metodología de la investigación* (5 ed.). CDMX: McGraw-Hill.

Huamán-Gonzalez, L. E., & Pérez-Carpio, J. E. (2016). Evaluación e interpretación de la calidad del aire por gases de combustión (SO₂ y CO) en el sector Cercado y Los Jardines, Tarapoto – San Martín 2015. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 41-54.

Icon Argentina. (27 de Julio de 2012). *Tubos de difusión para el analisis ambiental*. Obtenido de <http://www.iconargentinaonline.com/Tubos%20de%20difusion%20para%20analis%20ambiental.htm>

IDEAM. (2012). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. En M. d. Sostenible, *Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales* (pág. 28). Bogota: Comite de Comunicaciones y Publicaciones IDAEM.

INAFRED. (15 de Octubre de 2010). *Enciclopedia de los Municipios y delegaciones de México*. (l. p. Municipal., Editor) Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15106a.html>

INEGI. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. CDMX: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INE-SINAICA a. (2010). *Manual 1: Principios de Medición de la Calidad del Aire* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE-SINAICA b. (2010). *Manual 2: Sistemas de Medición de la Calidad del Aire* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/2-%20Sistemas%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE-SINAICA c. (2010). *Manual 3: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de

<https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3%20-%20Redes,%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE-SINAICA d. (2010). *Manual 4: Operación de Estaciones de Medición de la Calidad del Aire, mantenimiento y calibración de sus Componentes* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/4%20-%20Operaci%C3%B3n%20de%20Estaciones%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire,%20mantenimiento%20y%20calibraci%C3%B3n%20de%20sus%20Componentes.pdf>

INE-SINAICA e. (2010). *Manual 5: Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Insituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5%20-%20Protocolo%20de%20Manejo%20de%20Datos%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE-SINAICA f. (2010). *Manul 6: Lineamientos Técnicos y Administrativos para la Auditoría de Sistemas de Medición de la Calidad del Aire* (1 ed.). Ciudad de México: INE: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/6%20-%20Lineamientos%20T%C3%A9cnicos%20y%20Administrativos%20para%20la%20Auditor%C3%ADa%20de%20Sistemas%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias. (2003). La contaminación atmosférica en el sur. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 47-53.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2000). *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Ecología.

Korc, M. E., & Sáenz, R. (1999). *Monitoreo de la calidad del aire*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

LGEEPA. (2018). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

Martinez, A. P., & Romien, I. (2011). *Introducción Al Monitoreo Atmosférico – 03. Revisión De Metodologías Existentes. Parte 4*. Argentina: Estrucplan.

Meteorología y climatología de Navarra. (17 de Marzo de 2019). *Elementos y factores del clima. Tipos de climas*. Obtenido de Factores del clima: <http://meteo.navarra.es/definiciones/elementosFactores.cfm>

- Molina, H. (25 de Abril de 2016). Los 5 contaminantes que nos ahogan en la Zona Metropolitana. *Alto Nivel, Eleva tu poder de Deision*.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., & Rendón, J. (08 de Mayo de 2012). comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ingenierías USBMed, 03(01)*, 62-68. Recuperado el 21 de Febrero de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4694125.pdf>
- Nájera-Cedillo, M. C., Márquez, A. B., Sánchez Gómez, R., & Corona, J. P. (2005). Los sistemas de información geográfica como herramienta para observar el comportamiento del ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *GEOS*, 368-376.
- ONU. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico*. Rio de Janeiro: ONU.
- ONU. (1998). *Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Kyoto: ONU.
- Orozco-Hernández, M. E., Tapia Quevedo, J., Míreles Lezama, P., Vera Bolaños, M. G., García Fajardo, B., & Álvarez Arteaga, G. (2015-1). Desarrollo agropecuario y variación climática en el Estado de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 99-119.
- Palacios, M. E. (2009). Determinación de niveles basales de colinesterasa en jornaleros agrícolas. *Medigraphic Artemisa*, 63-68.
- RAMA. (22 de Noviembre de 2018). *Características de los contaminantes*. Obtenido de Monóxido de Carbono (CO): <https://rama.edomex.gob.mx/caracteristicas>
- Ramírez-Cando, L. J., Armijos, M., Crespo, M., Pino-Casignia, S. P., & Álvarez-Mendoza, C. I. (2018). Modelamiento geoestadístico de mediciones de concentración de material particulado (PM10) para la validación de un método simplificado. *Anales Científicos*, 81-91.
- Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. (25 de Febrero de 2020). *Secretaría de Medio Ambiente*. Obtenido de Normatividad: <https://rama.edomex.gob.mx/normatividad>
- Respira México. (15 de Diciembre de 2018). *Respira México, por un aire limpio para todos*. Recuperado el 21 de 01 de 2019, de <http://respiramexico.org.mx/la-poblacion-mas-vulnerable-los-ninos/>
- Rodríguez-Jiménez, R. M., Benito-Capa, Á., & Portela-Lozano, A. (2004). *Meteorología y Climatología*. Madrid, España: FECYT.
- Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (Diciembre de 2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. (P. U. Chile,

Ed.) *EURE*, 35-62. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19615724002>

- Salazar, A. (15 de Mayo de 2017). *Río Lerma es una cloaca; está biológicamente muerto*. Obtenido de Milenio: <https://www.milenio.com/estados/rio-lerma-es-una-cloaca-esta-biologicamente-muerto>
- Salazar-Ávila, D. (2018). *Análisis del comportamiento del Bióxido de Azufre (SO₂) y su relación con la temperatura: Caso Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) 2011-2016*. (FaPUR, Ed.) Toluca, Estado de México, México: UAEMex.
- Sánchez, L., Quadri, G., Martínez, J., & Pérez, D. (1991). Evaluación de la calidad del aire en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación*, 99-100.
- Sánchez-López, A., Cruz-Gutiérrez, V., Posada-Zamora, M. A., Torrijos M., M. T., & Osorio Lama, M. A. (2016). *Computing Science*, 9-19.
- Secretaría de Salud. (1994). *12-23-94 NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO)*. CDMX: Gob.mx.
- Secretaria de Salud. (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración*. CDMX: Poder Ejecutivo.
- Secretaría del Medio Ambiente. (09 de Abril de 2019). *¿Qué es la Red?* Obtenido de *¿Qué es la Red?*: http://rama.edomex.gob.mx/que_es_red
- SEMADES. (2011). *Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable*. Jalisco: Dirección del Sistema de Monitoreo Atmosférico.
- SEMARNAT. (2011). *Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo especial informe 12- cap 7*. CDMX: SEMARNET.
- SEMARNAT. (2012). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012*. Monterrey: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
- SEMARNAT. (31 de Mayo de 2018). *Monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/monitoreo-de-la-calidad-del-aire-en-la-zmvm>
- SIMA. (2015). *Sistema Integral de la Medicion del Aire*. Obtenido de Inicio: <http://aire.nl.gob.mx/>

- Sin Autor. (10 de Enero de 2020). *Problema y Ambiente*. Obtenido de Contaminantes Atmosfericos: <https://sites.google.com/site/problemayambiente/origen-y-tipos-de-contaminacion-atmosferica>
- SMA. (2018). *Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT*.
- Sura-Castellanos, K. A. (2018). *Las fuentes móviles se les atribuye gran parte de la contaminación del aire de las áreas urbanas, pues los vehículos que utilizan tecnología obsoleta representan gran parte del total de la flota, estos problemas se incrementan por las condiciones climáticas*. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Toluca: UAEMex.
- UDG. (05 de 10 de 2019). *Salud Ambiental*. Obtenido de http://www.saludambiental.udg.mx/maestria/II_dip_files/Modulo_II/Urbanismo/M%C3%89TODOS%20DE%20MEDICI%C3%93N%20DE%20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE.doc
- Universidad de Santiago de Chile. (2016). Guía de ejercicios métodos gravimétricos. *Servicios Académicos para el Acompañamiento y la Permanencia - PAIEP*, 1-12.
- Vilerta, C. (15 de Junio de 2009). Un Modelo Descriptivo de la Geografía del Robo en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Journal of Latin American Geography*, págs. 55-80.
- Von Martini, A., Bragachini, M., Bianchini, A., Martellotto, E., & Méndez, A. (2013). Percepción Remota. *Agricultura de Precisión INTA Manfredi*, 12-17.
- Weblakes. (18 de Abril de 2019). *Wrplot*. Obtenido de <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>
- Zapata-Sánchez, C. E., Quijano-Hurtado, R., Molina-Vásquez, E., Rubiano-Hernández, C. M., & Londoño-Gaviria, G. (2008). Fortalecimiento de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire en el Valle de Aburra con Medidores Pasivos. *Gestión y Ambiente*, 67-84.