

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

“EVALUACIÓN DE LAS TENDENCIAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA DURANTE LOS AÑOS 2000 – 2013”

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL.

AUTOR:

FAUSTO MAURICIO MOGROVEJO TENECELA

DIRECTORES:

JOHANNA PATRICIA SANCHEZ QUEZADA, Mgt.

JENNY DÍAZ RAMÍREZ, PhD.

JOSÉ IGNACIO HUERTAS CARDOZO, PhD.

GABRIEL CERVANTEZ BELLO, PhD.

CUENCA – ECUADOR

2015



RESUMEN

El presente trabajo se realizó de manera conjunta con el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz perteneciente al Tecnológico de Monterrey-Campus Toluca bajo la dirección de la PhD. Jenny Díaz Ramírez y con colaboración de los PhD. José Huertas Cardozo, y PhD. Gabriel Cervantes Bello; como parte del proyecto de Caracterización de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, mediante el análisis de la base de datos de monitoreo atmosférico verificando el cumplimiento de las Normas Mexicanas de Calidad del Aire.

Se realizó el análisis de la base de datos de concentración del promedio horario de los contaminantes atmosféricos monitoreados constantemente en siete estaciones de monitoreo ambiental de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca entre los años 2000 al 2013. Se realizó el análisis de las bases de datos en el periodo de estudio para cada uno de los contaminantes criterio como son: O₃, PM₁₀, SO₂, CO y NO₂; se calculó el valor de los promedios mensuales, anuales y diarios para cada contaminante, verificando el cumplimiento de las NOMs. Estas NOMs establecen los límites máximos permisibles de concentración en la atmosfera para el contaminante criterio.

Se propone un modelo de regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diario del contaminante que genera mayor problemática en la ZMVT. Los valores de concentración diaria de PM₁₀, se pueden obtener con el modelo de regresión que utiliza las variables meteorológicas que también son medidas en la Red automática de monitoreo atmosférico de la ZMVT.

Palabras claves: Análisis de datos, Contaminantes Criterio, Regresión lineal multivariante, Predicción de la concentración.



ABSTRACT

This current work was carried out jointly with the Research Center Automotive Mechatronics belonging to Technological of Monterrey-Toluca Campus, under the direction of PhD. Jenny Diaz Ramirez with the cooperation of PhD. Jose Huertas Cardozo and PhD. Gabriel Cervantes Bello; as part of the Characterization of Air Quality in the Metropolitan Area of Toluca by analyzing the air monitoring database to verify compliance with the Mexican Air Quality Standards.

The analysis was performed based on an hourly database average concentration of air pollutants constantly supervised in seven environmental monitoring stations of the Metropolitan Area of Toluca from 2000 to 2013. The analysis of the databases were performed in the study period from each of the criteria pollutants such as: O₃, PM₁₀, SO₂, CO and NO₂; the value of the monthly, annual and daily averages were calculated for each pollutant in turn to verify compliance with the Official Mexican Air Quality Standards (NOMs). These NOMs establish the maximum permissible limits of concentration in the atmosphere for each one of the criteria pollutants.

A multivariate linear regression model was proposed to predict the daily average concentration of pollutant that creates more problems in the ZMVT. The values of daily concentration of PM₁₀ can be obtained with the regression model using meteorological variables that are also measures in the automatic air quality monitoring network of ZMVT.

Keywords: Data Analysis, Criteria Pollutants, multivariate linear regression, Prediction of concentration.



INDICE

CAPÍTULO 1.....	14
CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA.....	14
1.1. Introducción	14
1.2. Calidad del aire en el Mundo	14
1.3. Calidad del aire en el Ecuador	16
1.4. Calidad del aire en México.....	17
1.5. Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	18
1.6. Características generales de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	19
1.7. Condiciones geográficas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca ...	19
1.8. Meteorología en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	22
1.8.1. Clima	22
1.8.2. Dinámica de vientos.....	24
1.9. Desarrollo Económico en la ZMVT.....	25
1.9.1. Sector económico primario	25
1.9.2. Sector económico secundario.....	26
1.10. Sistema de monitoreo atmosférico en la ZMVT	27
1.11. Descripción de los contaminantes criterios monitoreados en la RAMA de la ZMVT y las técnicas de medición utilizadas para cada contaminante.	29
1.11.1. Partículas menores a 10 micrones (PM_{10}).....	30
1.11.2. Ozono (O_3)	31
1.11.3. Bióxido de Nitrógeno (NO_2).....	32
1.11.4. Monóxido de Carbono (CO).....	33
1.11.5. Bióxido de Azufre (SO_2).....	34
1.12. Normas mexicanas de calidad del aire, que regulan los contaminantes monitoreados	35
1.13. Unidades de medición y cantidad de decimales para los contaminantes....	36
1.14. Características de la base de datos (2000 al 2013).....	37



1.15.	Forma de presentación de los datos de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas, en la base de datos de la RAMA-ZMVT	38
1.16.	Discusión	39
CAPÍTULO 2.....		41
METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE MONITOREO ATMOSFERICO DE LA ZMVT		41
2.1.	Introducción	41
2.2.	Procedimiento para realizar el análisis de las bases de datos	41
2.2.1.	Obtención de la base de datos de monitoreo ambiental de la ZMVT	42
2.2.2.	Ordenamiento y agrupación de la base de datos proporcionada por la RAMA-ZMVT	42
2.2.3.	Cálculo del promedio diario, mensual y anual de concentración para la ZMVT y cada estación de monitoreo atmosférico.....	42
2.2.4.	Cálculo del promedio anual de concentración de los contaminantes criterio para la ZMVT.....	42
2.2.5.	Cálculo del promedio mensual de concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la ZMVT entre el 2000-2013.	43
2.2.6.	Cálculo del promedio diario (promedio de 24 horas) de la concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la ZMVT entre el 2000-2013.	44
2.3.	Diagrama de caja.....	45
2.4.	Método de predicción de Regresión Lineal Multivariante	46
2.5.	Evaluación de la predicción	47
2.6.	Definición del procedimiento para generar el modelo de regresión lineal multivariante.	48
2.6.1.	Cálculo del promedio cada hora de concentración de PM10 y de las variables meteorológicas para la ZMVT	48
2.6.2.	Cálculo de los valores mínimos de las variables meteorológicas	49
2.6.3.	Cálculo de los valores máximos de las variables meteorológicas	49
2.6.4.	Interacción entre las variables meteorológicas.....	50



2.6.5. Obtención de los coeficientes de correlación lineal entre el promedio diario de PM ₁₀ con los promedios diarios de las variables meteorológicas y la interacción entre variables meteorológicas.	51
2.7. Conclusión.....	51
CAPÍTULO 3.....	53
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA ZMVT ENTRE LOS AÑOS DEL 2000 AL 2013.....	53
3.1. Introducción	53
3.2. Gráficas de evolución de los contaminantes criterio en la ZMVT entre los años 2000 al 2013	53
3.2.1. Material particulado menor a diez micrones (PM ₁₀).....	53
3.2.2. Monóxido de Carbono (CO)	56
3.2.3. Ozono (O ₃).....	58
3.2.4. Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	60
3.2.5. Dióxido de azufre (SO ₂)	62
3.3. Análisis del comportamiento de la concentración promedio de cada hora de los contaminantes monitoreados en la RAMA-ZMVT e identificación de datos atípicos a partir del año 2011 al 2013.	64
3.3.1. Identificación y análisis del comportamiento de valores atípicos de las mediciones de los contaminantes registradas en el año 2013 a través del uso de Diagramas de Cajas.....	65
3.4. Problemática con el contaminante de mayor presencia en la ZMVT.	73
3.5. Conclusiones	74
CAPÍTULO 4.....	76
MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA PREDECIR EL PROMEDIO DIARIO DE CONCENTRACIÓN DE PM ₁₀ EN LA ZMVT, CON BASE EN LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	76
4.1. Introducción	76
4.2. Presentación grafica de la correlación obtenida.....	76
4.3. MODELO 1:	77



4.3.1. Selección de las variables que se van a utilizar en los modelos de predicción ..	77
4.3.2. Presentación de los resultados del modelo 1	78
4.4. MODELO 2:	78
4.4.1. Identificación de los días de la semana correspondientes a cada día del año, para calcular el promedio de concentración referente a cada día de la semana durante todo el año.	78
4.4.2. Presentación de la ecuación del modelo 2.....	79
4.5. Evaluación de los modelos de predicción con el uso de la medición de los errores (MAE, MSE y MAPE).	79
4.6. Resultados.....	80
4.7. Conclusión.....	81
CAPITULO 5.....	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1. Conclusiones	83
5.2. Recomendaciones	86
5.3. Referencias bibliográficas.....	87
5.4. ANEXOS.....	90



Índice de Tablas

Tabla 1.1 Toneladas de contaminantes emitidas por sector.	19
Tabla 1.2 Características generales de los municipios de la ZMVT	20
Tabla 1.3 Número y porcentaje de unidades manufactureras	26
Tabla 1.4 Ubicación e identificación de las estaciones de la RAMA-ZMVT	29
Tabla 1.5 NOMs de calidad del aire vigentes.....	36
Tabla 1.6 Unidades de medición y cantidad de decimales para los contaminantes.	37
Tabla 2.1 Valores de los promedios anuales calculados para cada contaminante	43
Tabla 2.2 Promedios diarios, valores mínimos y máximos de variables utilizadas.	50
Tabla 4.1 Promedios diarios de la concentración de PM ₁₀	78
Tabla 4.2 Resultados de la evaluación de los modelos de predicción.....	80



Índice de Figuras

Figura 1.1. Localización de la ZMVT	21
Figura 1.2. Localización de municipios, monitoreo ambiental	22
Figura 1.3 Tipos de climas que predominan en la ZMVT	23
Figura 1.4 Climograma, estación climatológica ZMVT	24
Figura 1.5 Rosa anual de vientos-ZMVT	25
Figura 1.6 Localización de las estaciones de la RAMA-ZMVT	28
Figura 2.1. Representación de los valores que se presentan en un diagrama de caja	45
Figura 3.1 Evolución del promedio anual de PM ₁₀ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013) .	54
Figura 3.2 Evolución del promedio mensual de PM ₁₀ en la ZMVT (2011)	55
Figura 3.3 Evolución del promedio mensual de PM ₁₀ en la ZMVT (2000-2013)	55
Figura 3.4 Evolución del promedio anual de CO en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013) ...	56
Figura 3.5 Evolución del promedio mensual de CO en la ZMVT (2011)	57
Figura 3.6 Evolución del promedio mensual de CO en la ZMVT (2000-2013).....	58
Figura 3.7 Evolución del promedio anual de O ₃ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013).....	58
Figura 3.8 Evolución del promedio mensual de O ₃ en la ZMVT (2011)	59
Figura 3.9 Evolución del promedio mensual de O ₃ en la ZMVT (2000-2013)	60
Figura 3.10 Evolución del promedio anual de NO ₂ en las estaciones de la RAMA- ZMVT (2000-2013)	61
Figura 3.11 Evolución del promedio mensual de NO ₂ en la ZMVT (2011).....	61
Figura 3.12 Evolución del promedio mensual de NO ₂ en la ZMVT (2000-2013)	62
Figura 3.13 Evolución del promedio anual de SO ₂ en las estaciones de la RAMA- ZMVT (2000-2013)	63
Figura 3.14 Evolución del promedio mensual de SO ₂ en la ZMVT (2011)	63
Figura 3.15 Evolución del promedio mensual de SO ₂ en la ZMVT (2000-2013).....	64
Figura 3.17 Diagrama de Cajas de las concentraciones promedio horaria de PM ₁₀ -2013.....	65
Figura 3.18 Representación de los valores que se presentan en un diagrama de caja	66
Figura 3.20 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de O ₃ -2013	67
Figura 3.21 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de O ₃ -2013	67
Figura 3.22 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de CO -2013	68
Figura 3.23 Diagramas de Cajas del promedio móvil de 8 horas de CO -2013	69
Figura 3.24 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de CO -2013.....	69
Figura 3.25 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de NO ₂ -2013.....	70
Figura 3.26 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de NO ₂ -2013	71
Figura 3.27 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de SO ₂ -2013	72
Figura 3.28 Diagramas de Cajas del promedio móvil de 8 horas de SO ₂ -2013.....	72
Figura 3.29 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de SO ₂ -2013.....	72
Figura 4.1 Coeficiente de correlación de AVG-PM ₁₀ con las variables meteorológicas e interacciones.	76
Figura 4.2 Resumen de los modelos de predicción de AVG-PM ₁₀ -2011.	81
Figura 4.3 Curvas de ajuste de los modelos de predicción.	81



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

Fausto Mauricio Mogrovejo Tenecela, autor de la tesis “(EVALUACION DE LAS TENDENCIAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA DURANTE LOS AÑOS 2000 – 2013)”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Industrial. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 27 de julio de 2015.

Fausto Mauricio Mogrovejo Tenecela

C.I: 0105013312



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

Fausto Mauricio Mogrovejo Tenecela, autor de la tesis “(EVALUACION DE LAS TENDENCIAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA DURANTE LOS AÑOS 2000 – 2013)”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 27 de julio de 2015.

Fausto Mauricio Mogrovejo Tenecela

C.I: 0105013312



Toluca, México.
03 de Diciembre de 2014

Fausto Mauricio Mogrovejo Tenecela
Estudiante Ingeniería Industrial
Universidad de Cuenca
PRESENTE

Asunto: Carta de aprobación para que el proyecto asignado en el CIMA, pueda ser publicada como Tesis de autoría personal del estudiante en la Universidad de Cuenca.

La misión del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz-CIMA es brindar una respuesta integral a las necesidades de investigación, desarrollo tecnológico, en México para asegurar su competitividad a nivel internacional mediante la realización de proyectos financiados externamente donde participen directamente investigadores y jóvenes ingenieros talentosos en proceso de formación.

En su estancia en el CIMA, le fue asignado el proyecto de caracterización de la base de datos de medición de concentración de contaminantes medidos entre los años 2000 al 2013 por la red automática de monitoreo atmosférico de la Zona metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT).

Luego de revisar y analizar el diseño de tesis presentado, me es grato comunicarle al estudiante que ha sido aceptada la solicitud, de publicación de la parte del proyecto asignado, como su autoría personal en la Universidad de Cuenca.

Quedamos a sus órdenes para mayor información al respecto.

Dr. José Ignacio Huertas Cardozo
Director de posgrados en ingeniería, Campus Toluca.
Investigador del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz
Tecnológico de Monterrey - Campus Toluca
jhuertas@itesm.mx
52 722 279 99 90 ext 2113



GLOSARIO DE TERMINOS

ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca
O ₃	Ozono
PM ₁₀	Partículas menores a 10 micrones
SO ₂	Dióxido de Azufre
CO	Monóxido de Carbono
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
NOMs	Normas Oficiales Mexicanas de Calidad del Aire
CC	Contaminantes Criterio
RAMA-ZMVT	Red automática de monitoreo atmosférico de Toluca
OMS	Organización Mundial de la Salud
µg / m ³	microgramos por metro cúbico
MAE	Mean Absolute Error (media del error absoluto)
MSE	Mean Square Error (error cuadrático medio)
MAPE	Mean Absolute Percent Error (porcentaje del error medio absoluto)



CAPÍTULO 1

CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA

1.1. Introducción

Calidad del aire es la exposición en un espacio de tiempo, en una ubicación o ciudad específica a la concentración promedio de gases contaminantes perjudiciales para la salud de los seres vivos (Sans, 1989). Es decir calidad del aire hace referencia a la cantidad de contaminantes presentes en el aire, ya sea de una alta calidad, con un nivel bajo de concentración; o una mala calidad, con un nivel elevado de concentración de contaminantes del aire.

Los contaminantes del aire pueden agruparse en dos categorías: los contaminantes primarios, que se emiten directamente a la atmósfera; y los contaminantes secundarios, que se forman en la atmósfera a partir de precursores primarios debido a reacciones químicas tales como hidrólisis, oxidación y reacciones fotoquímicas. (Troposfera, 2015)

1.2. Calidad del aire en el Mundo

La contaminación atmosférica actualmente es uno de los problemas ambientales más severos a nivel mundial; que está presente en todas las sociedades, independientemente del desarrollo socioeconómico y es un fenómeno que afecta directamente a la salud de los seres humanos, las plantas, los animales, el suelo y el agua; debido a los cambios que se producen en la composición química de la atmósfera cambiando el clima, produciéndose lluvia ácida o destruir el ozono, todos estos son fenómenos de gran importancia global.

El dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero, es el contaminante que está causando en mayor medida el calentamiento de la Tierra, si bien todos los seres vivos emiten dióxido de carbono al respirar, éste se considera por lo general contaminante cuando se asocia con coches, aviones, centrales eléctricas y otras actividades humanas que requieren el uso de combustibles fósiles como la gasolina y el gas natural. (EPA, 2013)

Otros contaminantes relacionados con el cambio climático son el dióxido de azufre. Una de las características principales del dióxido de azufre y de otros productos químicos íntimamente relacionados es que son los causantes de la lluvia ácida.



Sin embargo, también reflejan la luz cuando son liberados en la atmósfera, lo que mantiene la luz solar fuera y hace que la Tierra se enfríe. Las erupciones volcánicas pueden arrojar cantidades enormes de dióxido de azufre a la atmósfera, lo que en ocasiones provoca un enfriamiento que dura varios años, de hecho, antes los volcanes eran la fuente principal de dióxido de azufre; hoy son sustituidos por los seres humanos. (EPA, 2015)

Los países industrializados han tomado medidas para reducir los niveles de dióxido de azufre y humo para mejorar la salud de sus habitantes; sin embargo, uno de los resultados, no previsto hasta hace poco, es que unos niveles de dióxido de azufre más bajos podrían, de hecho, empeorar el calentamiento global, ya que el dióxido de azufre de los volcanes puede enfriar el planeta al bloquear el paso de la luz del sol y con la reducción de la cantidad de este compuesto presente en la atmósfera hace que pase más luz solar, lo que calienta la Tierra. Este efecto se magnifica cuando cantidades altas de otros gases en la atmósfera hacen que se retenga el calor adicional. (Ballester, Marzo 2005)

En un nivel más amplio, los gobiernos están tomando medidas para limitar las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero. Una de ellas es el Protocolo de Kioto que se encuentra en su segundo periodo de vigencia desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre del 2020 (Nations, 2012), un acuerdo entre países para reducir las emisiones de dióxido de carbono. Otro método es el de establecer un impuesto a las emisiones de carbono o aumentar los impuestos de la gasolina, para que tanto la gente como las empresas tengan más motivos para conservar la energía y contaminar menos.

El reporte de la Organización Mundial de la Salud (**OMS**), en el 2014 desde **GINEBRA, SUIZA**, reveló que más de la mitad de la población mundial vive en ciudades con índices de contaminación 2,5 veces superior a las recomendados por el organismo, además destaca que entre las ciudades más contaminadas del planeta se encuentran Nueva Delhi, Beijing, Dacca, Ulan-Bator y Karachi en Asia; Abu Dabi, Doha, El Cairo en Medio Oriente; así como Dakar y Accra en África. Las ciudades más contaminadas de Europa son: Ankara y Sofía y en América Latina es Lima, la capital peruana. (OMS, 2014)



1.3. Calidad del aire en el Ecuador

En el Ecuador los problemas ambientales relacionados con la concentración de contaminantes atmosféricos se presentan en las grandes ciudades, en especial en Quito, Guayaquil y Cuenca, donde se evidencia gran concentración de población urbana y la presencia de industrias manufactureras. (Ministerio del Ambiente, 2010)

La contaminación atmosférica en el país es generada principalmente por la flota vehicular, siendo el mayor responsable de las emisiones de los principales contaminantes del aire y por lo tanto de enfermedades respiratorias en la población, esto evidencia la necesidad de mejorar la calidad de los combustibles, para que vehículos de mayor tecnología puedan circular y funcionar adecuadamente y de esta manera empezar a reducir el grado de emisiones. En Quito (CORPAIRE) desde inicios del 2004 y en Cuenca (CUENCAIRE) desde abril del 2008, realizan continuamente la revisión técnica vehicular y el monitoreo de gases contaminantes presentes en la atmosfera, con la finalidad de que los datos obtenidos de concentración, sirvan como insumo para la planificación, formulación, ejecución y evaluación de políticas y acciones relacionadas con el mejoramiento de la calidad del aire y de la misma manera difundir la información en un lenguaje comprensible para la ciudadanía en general.

Los efectos de la contaminación del aire sobre la economía del Ecuador no han sido establecidos por la falta de un conocimiento verídico de la calidad del aire en el país. (Ministerio del Ambiente, 2010)

En vista que la contaminación del aire en el Ecuador se agrava continuamente, se ha empezado a desarrollar, inventario de emisiones, programas de mejoramiento de la calidad del aire, conjuntamente con Normas Técnicas de Calidad del aire que establecen los valores máximos permitidos de emisiones a la atmosfera ya sea de fuentes fijas o móviles de combustión. Con la elaboración de estas normas, se podrá realizar la debida planificación para reducir la concentración de gases y partículas contaminantes presentes en el aire.

En el inventario de emisiones reportado en el 2014 con año base del 2010, se realizó un proceso dinámico para mejorar la calidad de la información para que sea un componente clave y estratégico para todo programa de la calidad del aire; es indispensable disponer de información confiable sobre las emisiones, cantidades de contaminantes emitidos. (Ministerio del Ambiente, 2010)



1.4. Calidad del aire en México

La calidad del aire en México en los últimos años ha presentado varios cambios positivos a causa de ciertos programas de mejoramiento de la calidad del aire, que se han ejecutado o planificado, ya sea por los diferentes estados, zonas metropolitanas o municipios de México, que anteriormente han sido catalogadas como las ciudades más contaminadas del país. Estos programas de calidad de aire surgen a causa de que la contaminación atmosférica se ha extendido en los últimos años a otras ciudades además de las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), Monterrey (ZMM), Valle de Toluca (ZMVT), y Guadalajara (ZMVG); por lo cual surge la necesidad de mejorar la calidad del aire en las ciudades mexicanas y resalta que la ZMVM, es ya la más contaminada en el país. (Riojas-Rodríguez, Schilmann, López-Carrillo, & Finkelman, 2013, p. 641).

Para las ciudades que se encuentran ejecutando ciertos programas de mejoramiento de la calidad del aire, presentan ciertos avances en materia de gestión de la calidad del aire, debido a que pueden aumentar o disminuir en el número de contingencias ambientales y de esta manera verificar si ciertas contingencias es directamente proporcional con el número de días por debajo o por encima de los valores máximos permisibles por los contaminantes regulados. La calidad del aire de la ciudad de México durante el año 2011, registró una leve mejoría con respecto al año previo con una disminución en las concentraciones de contaminantes: dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de azufre, de 11%, 15% y 4%, respectivamente. En el caso del ozono se registró un incremento de 2,5 ppb en el promedio anual, mientras que las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} aumentaron en 5 µg/m³ y 3 µg/m³, respectivamente. (Calidad del aire en la Ciudad de México 1986-2011.pdf, s.f., p. 11). Cuando se tiene los datos históricos de contaminación atmosférica se puede evaluar y analizar los comportamientos que presentan los contaminantes a lo largo de los años de monitoreo, pudiendo elaborar informes de calidad del aire de años atrás, frente a los cambios que se generan durante un año previo, ya sea por contingencias ambientales o días sin uso del auto.

La ZMVM al realizar el monitoreo continuo a través de la Red automática de monitoreo, obtiene una concentración promedio cada hora de los contaminantes monitoreados, generando una base de datos, que sirve para elaborar informes de



calidad del aire diariamente, mensualmente y anualmente; manteniendo informada continuamente a los habitantes, y a su vez, verificar la efectividad del programa PROAIRE, que está vigente en la ciudad de México.

Con el propósito de proteger la salud humana contra los daños provocados por la contaminación del aire, la Secretaría de la Salud de México cuenta con las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental (NOM), que están vigentes desde su publicación en el diario oficial de la Federación (1993-1994, última revisión.). Las NOM establecen los valores de los contaminantes del aire para la protección de la salud de la población.

1.5. Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)

La zona metropolitana del valle de Toluca, tiene un continuo crecimiento poblacional, urbano e industrial, creció a un total de 22 municipios y por consiguiente dio lugar a un aumento en la demanda de servicios públicos, transporte y vivienda que a su vez requieren del agua y suministro de energía, observándose actualmente aspectos preocupantes en materia de contaminación del aire. A partir de 1993 el Gobierno del Estado de México opera la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la zona metropolitana del valle de Toluca (RAMA-ZMVT), con el propósito de medir de manera permanente los principales contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos (ozono, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas suspendidas fracción respirable PM10, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, precipitación pluvial, presión atmosférica, temperatura y radiación solar) en el área con mayor densidad poblacional dentro de la ZMVT para conocer la calidad del aire en la misma.(Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2014). El monitoreo continuo de la calidad del aire forma parte del sustento técnico para la elaboración de planes y programas encaminados a la prevención y control de la contaminación atmosférica en beneficio de los habitantes del valle de Toluca.

La RAMA-ZMVT, cuenta con 7 estaciones de monitoreo, que en función de su población de aproximadamente 2 millones de habitantes, para la Organización Panamericana de la Salud, el número mínimo de estaciones debe ser de 5 estaciones, para la vigilancia de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales; teniendo de esta manera mayor área de monitoreo ambiental.



1.6. Características generales de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)

La zona en estudio es la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), la cual presenta una economía industrial y de servicios, contando ahora con importantes parques industriales, y siendo considerada como una de las metrópolis más importantes en la región centro de México. El incremento de las actividades productivas y de la concentración de una población creciente han denotado un aumento considerable en los servicios de transporte público y privado, ocasionando directamente un mayor consumo de combustibles, provocando un aumento en la degradación en la calidad del aire; al considerar que la ZMVT se extiende sobre una superficie de 1 208,55 km² y ubicada a una altitud promedio de 2 660 metros sobre el nivel del mar, lo cual tiende a generar que los procesos de combustión de hidrocarburos sean menos eficientes y provoquen una mayor contaminación del aire. (GEMa, 2005)

La demanda creciente de energía para vehículos, industrias, comercios y servicios de la ZMVT se cubre en su totalidad con hidrocarburos (gasolinas, gas licuado de petróleo, gas natural, diésel, combustóleo y gasóleo); en el año 2000 el consumo energético de combustibles fósiles para la zona fue de 3,9 millones de litros de gasolina al día. En el 2004 el Gobierno del Estado de México (GEM) reportó que en la ZMVT se emiten anualmente 608 140,2 Tn de contaminantes a la atmósfera, de las cuales el 93% corresponde al transporte, el 6% a los parques industriales y el 1% a la actividad vegetal y suelos, Tabla 1.1.

Tonelas de contaminantes emitidas	
Sector	Tn / Año
Transporte	565570.386
Parques Industriales	36488.412
Vegetación y suelos	6081.402

Tabla 1.1 Toneladas de contaminantes emitidas por sector.

1.7. Condiciones geográficas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)

Actualmente, el área conurbada (fusión de municipios) de la ZMVT es la segunda conurbación en importancia del Estado de México y la quinta a nivel nacional. Está integrada por 22 municipios, donde viven 2'166 024 millones de habitantes, Su concentración de fuentes de empleo y servicios, así como las relaciones de intercambio



comercial, especialmente con los municipios del poniente y sur de la entidad, se han traducido en la conformación de un área de amplia influencia. (Proaire Valle de Toluca, 2012-2014)

La ZMVT está conformada por 22 municipios, 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 (msnm), con un rango que va de 2 560 a 2 740 msnm. En la Tabla 1.2 se muestran las características generales de los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

No.	Municipios	Cabecera Municipal	Latitud (máx.)	Longitud (máx.)	Superficie (km ²)	%
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° 11' 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° 11' 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 Atenco	San. Mateo Atenco	19° 16' N	99° 32' O	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	Tiangustenco	Santiago Tianguistenco de Galeana	19° 11' N	99° 28' O	121.6	7.5
19	Toluca	Toluca de Lerdo	19° 17' N	99° 40' O	420.1	15.8
20	Xalatlaco	Xalatlaco	19° 11' 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 de la ZMVT					2669.6	100

Tabla 1.2 Características generales de los municipios de la ZMVT

Fuente: (Inventario de emisiones ZMVT, 2004)

La ZMVT, se localiza en la parte centro del Estado de México; colinda al Norte con los municipios de San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jiquipilco y Nicolás Romero; al sur con: Ocuilan, Joquicingo, Tenancingo, Villa Guerrero y Coatepec Harinas; al este con: Isidro Fabela, Jilotzingo, Naucalpan de Juárez, Huixquilucan y con el Distrito Federal; y al oeste con: Temascaltepec, Amanalco y Villa Victoria. (Figura 1.1.)



Figura 1.1. Localización de la ZMVT

Fuente: (Proaire Valle de Toluca, 2012)

En el tema de calidad del aire, la ZMVT comprende siete municipios de este a oeste y de norte a sur: Xonacatlán (32,87 Km²), Lerma (228,64 Km²), Ocoyoacac (134,71 Km²), San Mateo Atenco (12,58 Km²), Metepec (70,43 Km²), Toluca (420,14 Km²) y Zinacantepec (309,18 Km²), que corresponden al 5,3% del territorio estatal y que por su constante dinámica e interacción contribuyen de manera significativa al problema de la contaminación atmosférica a partir de su actividad urbana. Es importante considerar que el área urbana de estos municipios comprende una superficie de 315,80 Km² (el

26,1%), según los usos de suelo identificados en los planes de desarrollo urbano municipales. (GEMa, 2005). Estos municipios son los más importantes por presencia de grandes industrias y mayor aglomeración de habitantes, que con sus actividades diarias, afectan la calidad del aire. Su ubicación se presenta en la figura 1.2.

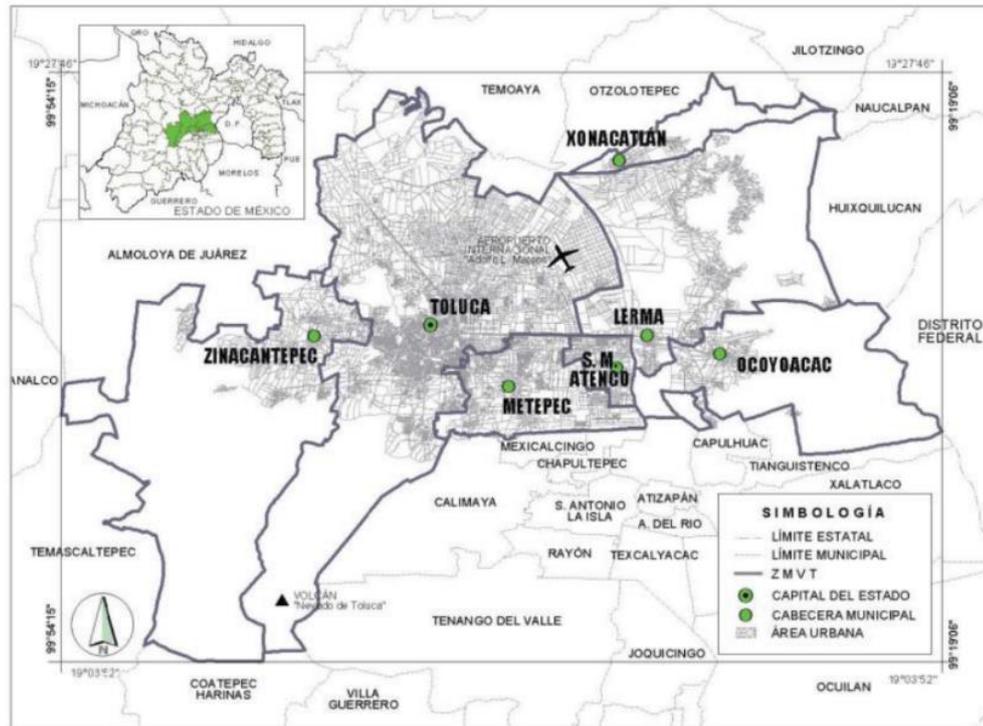


Figura 1.2. Localización de municipios, monitoreo ambiental

Fuente: (GEMa, 2005)

1.8. Meteorología en la ZMVT

1.8.1. Clima

En la ZMVT se presentan tres tipos de climas (Figura 1.3); (1) clima templado húmedo abarca la mayor parte de los municipios y presenta verano largo, lluvia invernal inferior a 5%, es isotermal y la temperatura máxima se manifiesta antes del solsticio de verano. (2) Clima semifrío subhúmedo que exhibe porcentajes de precipitación invernal menores a 5%, el verano, es característico de aquellas zonas con altitud considerable, con el volcán “Nevado de Toluca” y la Sierra de las Cruces. (3) Clima frío que es característico de las regiones altas, manifestándose sobre la zona de estudio en la parte alta del volcán “Nevado de Toluca” con una temperatura media anual entre -2 y 5 °C.

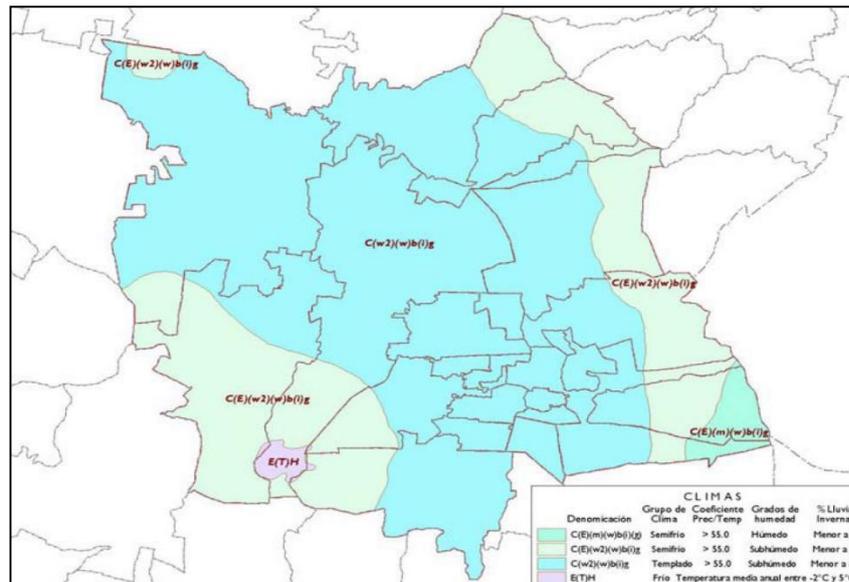


Figura 1.3 Tipos de climas que predominan en la ZMVT

Fuente: (Inventario de emisiones ZMVT, 2004)

En la ZMVT se presentan tres épocas climatológicas por la regularidad que guarda el tiempo atmosférico a lo largo del año:

1. Época seca-fría, que 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 presentan en los alrededores de la ZMVT, y que están directamente relacionadas con las bajas temperaturas registradas, periódicamente, y las nevadas, en forma ocasional por las temperaturas bajo cero registradas en esta época del año.
2. Época seca-cálida, comprendida entre los meses de marzo a mayo, se presenta un ascenso de la temperatura hasta llegar a los 15 ° C, siendo la temperatura promedio 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, está 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 por mantenerse entre un rango de 11 y 13 ° C.

Con base en una serie de datos, se presenta el Climograma que muestra el comportamiento de la temperatura promedio mensual y la precipitación pluvial sobre el espacio geográfico de la ZMVT. (Figura 1.4)

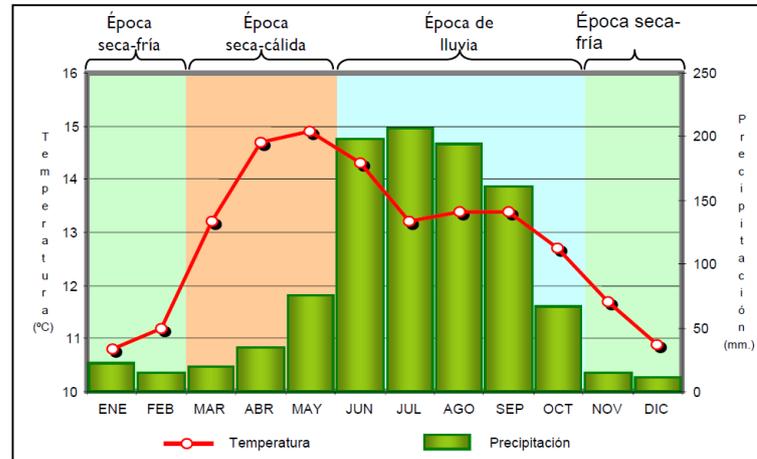


Figura 1.4 Climograma, estación climatológica ZMVT

Fuente: (Inventario de emisiones ZMVT, 2004)

1.8.2. Dinámica de vientos

Por su posición geográfica con respecto al territorio mexicano, la ZMVT se encuentra bajo la influencia de sistemas meteorológicos tropicales durante la época de lluvia. El paso constante de ondas y ciclones tropicales aportan la humedad más importante del año en forma de nublados y lluvias abundantes sobre la zona; lo cual contribuye a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera. Sin embargo, 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 ZMVT 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, provocando la acumulación de una densa nube tóxica sobre las zonas urbanas con mayor número de vehículos y generando poca visibilidad. (Secretaría del Medio Ambiente, 2012)

Una condición favorable de la ZMVT es que no se encuentra 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 lo tanto, la dispersión de los contaminantes mediante buena ventilación, la mayor parte del año.

El registro del comportamiento del viento a través de los años se refleja en la figura 1.5 de la rosa anual de vientos, que hace de manifiesto para el caso de la ZMVT una marcada dominancia de los vientos del sur y sureste.

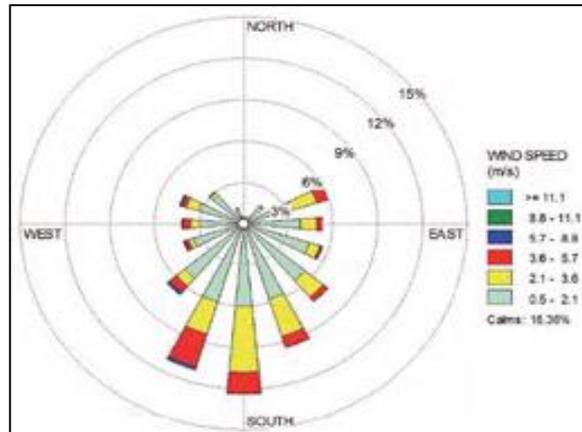


Figura 1.5 Rosa anual de vientos-ZMVT

Fuente: (Proaire Valle de Toluca, 2012)

1.9. Desarrollo Económico en la ZMVT

La ZMVT tiene una población económicamente activa del 49,9% del total de su población. La población ocupada por sector de actividad; corresponde al 3,4% en el sector primario; 35,9% en el sector secundario y 56,8% en el sector terciario. Estas cifras señalan una tendencia a la tercerización del empleo, por lo que las actividades primarias siguen siendo desplazadas. En el interior de la metrópoli se aprecia el surgimiento de centros generadores de empleo, destacando el municipio de Lerma en las actividades económicas terciaria y secundaria; San Mateo Atenco en el sector secundario y en el caso de Metepec, surge como generador predominante de nuevos empleos y servicios en los sectores secundario y terciario, compitiendo abiertamente con Toluca.

1.9.1. Sector económico primario

En las laderas de las montañas y en la planicie de la ZMVT, la actividad agrícola, en su mayoría es de temporal y en menor proporción la agricultura de riego. Gran parte del tipo del suelo es Feozem (suelo de alto contenido de materia orgánica), los cuales son susceptibles a la erosión moderada y alta, esta situación hace que se presenten con mayor facilidad la emisión de partículas de origen natural, arrastradas por la fuerza del viento.



Con respecto a la ganadería, se observa la invasión hacia áreas forestales, en donde se talan y se incendia la quema de vegetación, para la generación de pastos. Dicha actividad afecta la calidad del aire por la emisión de partículas durante la combustión y posteriormente por la erosión del suelo a consecuencia del corte y quema de cubierta vegetal.

1.9.2. Sector económico secundario

En las actividades del sector secundario interviene la industria manufacturera con 11 364 unidades económicas. En la ZMVT el asentamiento industrial se concentra básicamente en el municipio de Toluca, en donde existen alrededor de 3 464 unidades económicas, lo que representa el 30,49% de la planta industrial de la ZMVT. En la tabla 1.3 se presenta el número de unidades económicas por cada municipio de esta metrópoli.

Municipios	Unidades Económicas	Porcentaje
Almoloya de Juárez	198	1.8
Almoloya del Río	457	4.0
Atizapán	223	1.9
Calimaya	258	2.2
Capulhuac	194	1.7
Chapultepec	24	0.2
Lerma	740	6.5
Metepec	967	8.5
Mexicaltzingo	68	0.6
Ocoyoacac	337	2.9
Otzolotepec	399	3.6
Rayón	79	0.7
San Antonio la Isla	158	1.4
San Mateo Atenco	1,763	15.6
Temoaya	217	1.9
Tenango del Valle	455	4.0
Texcalyacac	38	0.4
Tianguistenco	486	4.3
Toluca	3,464	30.5
Xalatlaco	164	1.4
Xonacatlán	211	1.9
Zinacantepec	464	4.0
Total ZMVT	11,364	100

Tabla 1.3 Número y porcentaje de unidades manufactureras

Fuente: (Proaire Valle de Toluca, 2012)



Los efectos ambientales derivados de las actividades económicas generan emisiones de gases de combustión de hidrocarburos, provenientes de la industria metalmetálica, química y alimentaria, en hoteles, baños públicos y restaurantes, todos intrínsecamente contribuyen al deterioro de la calidad del aire, por la ausencia de sistemas de control de emisiones, o bien por falta de un continuo seguimiento que se cumplan con los programas de mejoramiento de la calidad del aire que están gestionando la administración ambiental, para un ahorro de materias primas y energía.

El número de compañías que tienen un concepto claro de que el cuidado del medio ambiente les representa una fuente de ahorro y competitividad, frente a industrias que no tienen ningún cuidado hacia el medio ambiente; es mayor. La prioridad de afrontar otras necesidades más inmediatas inhibe que sean llevadas a cabo muchas de las soluciones ambientales.

1.10. Sistema de monitoreo atmosférico en la ZMVT

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 - ZMVT), misma que inició operaciones en 1993 y desde entonces es administrada por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado México, a través de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica. A principios del año 2010, la RAMA-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:

- Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores.
- Crear las medidas necesarias para controlar la contaminación.
- Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.
- Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.
- Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte.

- Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos matemáticos de predicción.
- Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos.

La RAMA-ZMVT está integrada por dos subsistemas operativos:

1. Red automática de monitoreo atmosférico.
2. Red meteorológica.

Adicionalmente cuenta con un centro de Control y una unidad móvil de monitoreo.

La ZMVT se encuentra dividida para su monitoreo atmosférico en 3 regiones. En cada una de ellas se encuentran distribuidas las estaciones de monitoreo a largo y ancho del Valle de Toluca.

Las zonas y estaciones correspondientes se detallan a continuación.

Zona Centro:	Toluca Centro (CE)	Oxtotitlán (OX)	
Zona Norte:	Aeropuerto (AP)	San Cristóbal Huichochitlán (SC)	
Zona Sur:	Metepec (MT)	Ceboruco (CB)	San Mateo Atenco (SM)

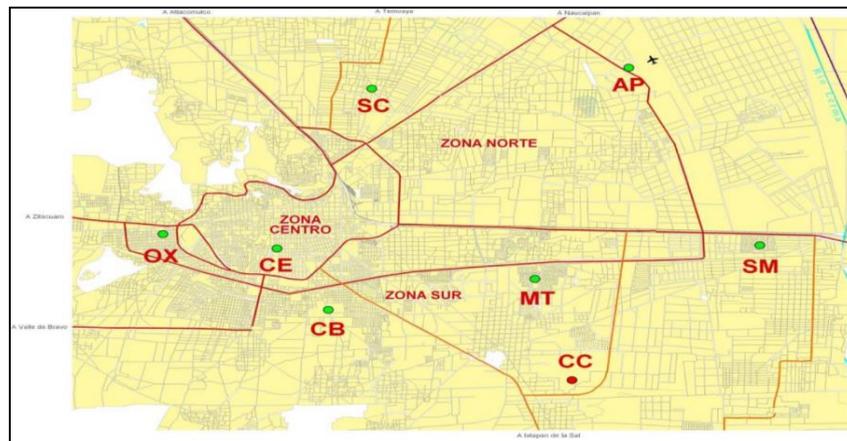


Figura 1.6 Localización de las estaciones de la RAMA-ZMVT

Fuente: (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZVMT, 2014)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

No.	Clave	Nombre estación	Zona	Ubicación física
1	OX	Oxtotitlán	CENTRO	Escuela Primaria "Carmen Serdán", calle Lago Caimanero esq. Laguna de la Asunción, Col. Nueva Oxtotitlán, Toluca, México.
2	CE	Toluca Centro	CENTRO	UAEM, Calle Venustiano Carranza esq. Mariano Matamoros, Toluca, México.
3	MT	Metepec	SUR	Av. J. Clouthier esq. Manzana, Col. Izcalli Cuauhtémoc V, Metepec, México.
4	CB	Ceboruco	SUR	Preparatoria No. 5 "Dr. Ángel María Garibay" de la UAEM, Km. 2.5 carretera a San Felipe Tlalmilolpán esquina Ceboruco, Metepec, México.
5	SM	San Mateo Atenco	SUR	Av. Hacienda de Tres Marias s/n, Fraccionamiento Santa Elena, San Mateo Atenco, México.
6	AP	Aeropuerto	NORTE	Centro Nacional de Capacitación y Adiestramiento de la Cruz Roja Mexicana, Boulevard Miguel Alemán, Toluca, México.
7	SC	San Cristóbal Huichochitlán	NORTE	Escuela Primaria "Manuel Hinojosa Giles", calle Guadalupe Victoria esq. Paseo de la Luz, San Cristóbal Huichochitlán, Toluca, México.
8	CC	Centro de Control		Conjunto SEDAGRO, edificio "C", Planta Baja, Puesta 101, Colonia Ex Rancho San Lorenzo, Metepec, México.

Tabla1.4 Ubicación e identificación de las estaciones de la RAMA-ZMVT

Fuente: (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2014)

Cada estación de monitoreo es un recinto metálico climatizado, que alberga en su interior los equipos analizadores automáticos y una torre meteorológica, donde están instalados los sensores, con energía eléctrica regulada; contando con el equipo necesario para efectuar las mediciones de los contaminantes derivados de las actividades económicas y naturales en el valle. Los sistemas de adquisición de datos, están basados en una plataforma PC y una topología de red LAN interna y comunicación con el Centro de Control CC.

1.11. Descripción de los contaminantes criterios monitoreados en la RAMA de la ZMVT y las técnicas de medición utilizadas para cada contaminante.

Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. El termino criterio se refiere a sustancias representativas del total de las emisiones que se presentan en áreas industriales, urbanas o rurales. Por lo cual, se realiza una medición periódica y constante, para determinar la calidad del aire en una zona determinada.

Los contaminantes criterio son:

- Partículas menores a 10 micrones (PM₁₀)
- Ozono (O₃)
- Bióxido de Nitrógeno (NO₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Bióxido de Azufre (SO₂)



Para cada contaminante criterio la Secretaría de Salud de México ha desarrollado guías y normas técnicas. Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos y proteger de los efectos perjudiciales a la salud. Las normas mexicanas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un periodo de tiempo definido; estas normas se detallarán en los siguientes puntos de este capítulo.

1.11.1. Partículas menores a 10 micrones (PM₁₀).

Las PM₁₀ son una mezcla de partículas sólidas y líquidas (vapor) que se encuentran suspendidas en el aire, emitidas directamente desde la fuente (formación directa), mediante la polinización de las plantas e incendios forestales; o bien son formadas por la condensación de contaminantes gaseosos (formación indirecta), por fuentes antropogénicas (quema de combustibles, fertilización de campos agrícolas, formando una compleja mezcla de partículas sólidas y vapores con sustancias orgánicas e inorgánicas en suspensión, incluyendo frecuentemente sustancias ácidas como sulfatos y nitratos. (SEMARNAT, 2013)

Las PM₁₀ se pueden dividir, por su tamaño, en las fracciones gruesa, fina y ultrafina, siendo la fracción gruesa la compuesta por partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2,5 y 10 μm (PM_{2,5-10}); la fracción fina que incluye aquellas partículas con diámetro aerodinámico menor a 2,5 μm (PM_{2,5}) y finalmente, la fracción ultrafina que incluye a las partículas menores de 1 μm .

Las partículas más perjudiciales para la salud son las de 10 micrones 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. (OMS, 2014)

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM₁₀ por metro cúbico (m³) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Las PM_{10} son emitidas en la ZMVT principalmente, por los suelos erosionados y zonas agrícolas, la resuspensión de polvo de vías sin pavimentar y de las actividades de la construcción, así como por las emisiones vehiculares. (Proaire Valle de Toluca, 2012)

El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto a las partículas menores a $10\ \mu m$ (PM_{10}) es el valor normado para la protección de la salud de la población en la norma NOM-025-SSA1-1993.

La técnica que utilizan los equipos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT, para cuantificar la concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ es la atenuación por Radiación Beta. Es un método equivalente federal (FEM) para el monitoreo continuo de partículas, certificado por la USEPA (Agencia de Protección al ambiente de los Estados Unidos).

En la atenuación de rayos beta, se emplea un elemento radiactivo como carbono 14 (^{14}C) que emite electrones de alta energía, (conocidos como rayos beta). La radiación emitida se hace pasar a través de un punto de la cinta de fibra de vidrio limpia. Los rayos beta son detectados y cuantificados por un detector de centelleo sensible para asociarlos a una lectura cero o peso inicial. La atenuación de la señal de la radiación se utiliza para determinar la masa de las partículas depositadas en la cinta. La concentración volumétrica de partículas se determina considerando la cantidad del flujo, la presión y temperatura. (NOM-035-SEMARNAT, 1993)

1.11.2. Ozono (O_3)

El ozono es un compuesto gaseoso incoloro; es un contaminante secundario que posee la capacidad de oxidar materiales se estén en contacto a nivel del suelo y que se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO_2) y varios compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por vehículos, los disolventes y la industria; en presencia de la luz solar. Es decir en un área donde se encuentren estos compuestos en el aire la mayor formación de ozono será cuando los períodos de tiempo estén soleados (OMS, 2014).

El ozono puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones de las vías respiratorias; cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar; y efectos sistémicos en órganos blandos



como el hígado. Su concentración y distribución en la ZMVT, refleja un comportamiento horario típico asociado a la influencia directa de las emisiones generadas durante la actividad diaria de los habitantes de la zona, la meteorología y como la capacidad oxidativa de la atmósfera. (Proaire Valle de Toluca, 2012)

El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al ozono (O_3), es el valor normado para la protección de la salud de la población en la norma NOM-020-SSA1-1993. La técnica que utilizan los equipos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT, para cuantificar la concentración de O_3 es la Espectrometría de Absorción en el Ultravioleta. Esta técnica se basa en la propiedad del ozono de absorber la radiación ultravioleta de un rango específico de longitud de onda.

La técnica consiste en hacer pasar la luz ultravioleta (UV) en una cámara de muestreo vacía y medir la intensidad de luz que pasa por ella, posteriormente se llena la cámara con la muestra de aire y se hace incidir la luz UV nuevamente, se mide la intensidad de luz que pasa y mediante la diferencia entre las intensidades de luz obtenidas con la cámara vacía y la cámara con muestra se obtiene la concentración de Ozono en el aire. (NOM-036-SEMARNAT, 1993)

1.11.3. Bióxido de Nitrógeno (NO_2)

El bióxido de nitrógeno (NO_2), junto con las partículas suspendidas son los responsables de generar la capa café-rojiza que se puede visualizar frecuentemente en muchas áreas urbanas con altos índices de contaminación atmosférica. Este gas pertenece a los óxidos de nitrógeno (NO_x), este es un término genérico comúnmente empleado para referirse a un grupo de gases altamente reactivos, que con diferentes cantidades de oxígeno y nitrógeno, como el óxido nítrico (NO) y bióxido de nitrógeno (NO_2). (Cortina Januchs, 2012)

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible es quemado a altas temperaturas y/o cuando este contiene compuestos nitrogenados. Las principales fuentes antropogénicas de NO_x son los vehículos automotores, plantas de generación de electricidad, fuentes de combustión en diferentes industrias de la zona, también fuentes comerciales y residenciales que queman combustibles para la generación de calor o energía. Los NO_x pueden formarse también en fuentes naturales, por la



descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y en menor grado en tormentas eléctricas. (SEMARNAT, 2013)

El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al Bióxido de Nitrógeno (NO_2), es el valor normado para la protección de la salud de la población en la norma NOM-023-SSA1-1993. La técnica que utilizan los equipos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT, para cuantificar la concentración de NO_2 se llama Quimioluminiscencia; la técnica de quimioluminiscencia (producción de luz a partir de una reacción química), consiste en hacer reaccionar dos compuestos químicos para formar un intermediario en estado excitado (alta energía) que al regresar a su estado basal, libera energía en forma de fotones de luz. La intensidad de la luz emitida es proporcional a la concentración del contaminante en la muestra. (NOM-037-SEMARNAT, 1993)

1.11.4. Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, inflamable y altamente tóxico, que en concentraciones altas puede ser letal, pues impide el transporte del oxígeno a la sangre, lo que puede ocasionar una reducción significativa en la dotación de oxígeno al corazón; siendo particularmente peligroso para las personas con problemas de salud del corazón y vías respiratorias.

El CO se forma en la naturaleza mediante la oxidación del metano (CH_4), que es un gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La principal fuente antropogénica de monóxido de carbono es la combustión incompleta de hidrocarburos, como la gasolina, la madera y el carbón, entre otros; por falta de oxígeno. (SEMARNAT, 2013)

Una manera de reducir el CO en la atmósfera, es que los automóviles sean calibrados técnicamente y debidamente para así, asegurar una mezcla adecuada del combustible con el oxígeno. Por ello, los programas como el de Verificación Vehicular y la introducción de convertidores catalíticos en algunas ciudades de México como el Distrito Federal y en el Ecuador tanto en Quito (Corpaire) y como en Cuenca (Cuencaire), han sido especialmente útil para controlar el monóxido de carbono.



El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al monóxido de carbono (CO) es el valor normado para la protección de la salud de la población en la norma NOM-021-SSA1-1993. La técnica que utilizan los equipos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT, para cuantificar la concentración de CO se llama Espectrometría de Absorción en el Infrarrojo. En esta técnica se pasa la muestra de aire en una cámara, donde es incidida por radiación infrarroja, en el extremo opuesto de la cámara se encuentra un detector de radiación infrarroja, esta medición que se compara con una medición que se lleva a cabo en otra cámara con aire cero (libre de CO), ambas mediciones se restan y el resultado es la cantidad de CO presente en la atmósfera (este método también es llamado por correlación en el infrarrojo). (NOM-034-SEMARNAT, 1993)

1.11.5. Bióxido de Azufre (SO₂)

El SO₂ pertenece a la familia de los óxidos de azufre (SO_x) que son gases incoloros que se forman al quemar azufre y tienden a disolverse fácilmente en agua. La fuente primaria de SO_x es la quema de combustibles fósiles, que contienen azufre en su composición, como el combustóleo y el carbón. Otras fuentes en particular son los gases de los escapes de los automóviles, las refinerías de petróleo, los procesos de fabricación del papel y en las industrias químicas. Sin embargo, dentro de los SO_x, se incluyen a otros compuestos de azufre de origen natural, como el ácido sulfhídrico (H₂S) y el di-metilsulfuro (CH₃SCH₃) proveniente de erupciones volcánicas y de la brisa marina.

La exposición a SO₂ produce irritación e inflamación aguda o crónica de las mucosas conjuntival y respiratoria. El SO₂ puede transformarse en otros productos, tales como partículas finas de sulfato (SO₄) y niebla de ácido sulfúrico (H₂SO₄). Se ha visto que bajo la combinación de partículas y SO₄, suele aumentar el riesgo en la salud al incrementar la morbilidad y mortalidad de enfermos crónicos del corazón y vías respiratorias. (SEMARNAT, 2013)

El SO₂ tiene relación directa como componente de la lluvia ácida, cuyos efectos son nocivos tanto en las grandes ciudades, acelerando la corrosión de edificios, monumentos, puentes y reduciendo significativamente la visibilidad en el interior de



las ciudades; como en el campo, produciendo acidez de lagos, ríos y aumentando el nivel de erosión de los suelos. (Cortina Januchs, 2012)

El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al bióxido de azufre (SO_2) en México es el valor normado para la protección de la salud de la población en la norma NOM-022-SSA1-1993. La técnica que utilizan los equipos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT, para cuantificar la concentración de SO_2 se llama Fluorescencia Pulsante en el Ultravioleta. Esta técnica emplea la propiedad que tienen las moléculas de dióxido de azufre de emitir luz (fluorescencia), cuando éstas son excitadas por luz ultravioleta.

La medición de bióxido de azufre es afectada por compuestos que fluorescen de la misma manera. Algunos compuestos orgánicos poliaromáticos como el naftaleno y el óxido de nitrógeno tienen un intervalo espectral similar al del dióxido de azufre. Para reducir esta interferencia estos compuestos se remueven empleando una membrana de difusión. (NOM-038-SEMARNAT, 1993)

1.12. Normas mexicanas de calidad del aire, que regulan los contaminantes monitoreados

Las normas mexicanas de calidad del aire fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de grupos con mayor susceptibilidad. Las normas de calidad del aire son publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación.



En la tabla 1.5 se detalla las normas de calidad del aire vigentes en México.

NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE VIGENTES		
CONTAMINANTE	Concentración y tiempo promedio de exposición	Para protección de la salud de la población susceptible
OZONO	0,095 ppm promedio de 1 hora	0,070 ppm Promedio móvil de 8 hrs. tomado como el máximo en un periodo de 1 año
MONOXIDO DE CARBONO	11 ppm Promedio móvil de 8 hrs.	1 vez al año
PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES	210 µg/m ³ Percentil 98 promedios de 24 hrs.	75 µg/ m ³ Media aritmética anual
PARTICULAS SUSPENDIDAS DE FRACCION RESPIRABLE PM-10	75 µg/ m ³ Promedio de 24 hrs.	40 µg/ m ³ Media aritmética anual
PARTICULAS SUSPENDIDAS DE FRACCION RESPIRABLE PM2.5	45 µg/ m ³ Percentil 98 promedios de 24 hrs.	12 µg/ m ³ Media aritmética anual
BIOXIDO DE AZUFRE	0,11 ppm Promedio de 24 hrs. 1 vez al año	0,025 ppm Media aritmética anual
BIOXIDO DE NITROGENO	0,21 ppm Promedio de 1 hr.	1 vez al año

Tabla 1.5 NOMs de calidad del aire vigentes

Fuente: (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZVMT,2014)

1.13. Unidades de medición y cantidad de decimales para los contaminantes.

En la tabla 1.6 se indica las unidades de medición y cantidad de decimales para cada contaminante monitoreado en por la RAMA-ZMVT.

Cada contaminante es monitoreado continuamente en cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ZMVT, obteniendo mediciones de la concentración en el aire cada minuto, luego tales mediciones, en un mínimo del 75% de las sesenta mediciones realizadas en una hora deben ser correctas, para utilizar y calcular el promedio de todas las mediciones de una hora, para reportarlo y almacenarlo en la base de datos de la red automática de monitoreo atmosférico. Las unidades de concentración deben ser correctamente especificadas en cada contaminante, ya que



los equipos de medición reportan sólo concentraciones de los contaminantes como datos numéricos, que al desconocer las unidades no se podría realizar ningún análisis de la información con facilidad.

Contaminante	Criterio adicional	Unidades	Número de decimales
Material particulado (PM₁₀)	Promedio cada hora	Microgramos por metro cubico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sin cifras
Monóxido de carbono (CO)	Promedio cada hora	Partes por millón (ppm)	Dos cifras
Ozono (O₃)	Promedio cada hora	Partes por millón (ppm)	Tres cifras
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	Promedio cada hora	Partes por millón (ppm)	Tres cifras
Dióxido de azufre (SO₂)	Promedio cada hora	Partes por millón (ppm)	Tres cifras

Tabla 1.6 Unidades de medición y cantidad de decimales para los contaminantes.

Fuente:(NOM - Marco Normativo, 2007.)

1.14. Características de la base de datos (2000 al 2013).

Cada estación de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT, convierte la señal analógica de los sensores a una señal digital, le dan un pretratamiento y envían las concentraciones promedio de cada minuto, a través de una línea telefónica conectada a la unidad de centro de control. En este centro se localiza un mapa sinóptico, el cual representa a la ZMVT; en la parte superior se encuentran dos visualizaciones alfanuméricas en donde se indica el contaminante y la unidad de medida de éste. En el centro de control se almacenan cada uno de los valores numéricos de las concentraciones de los contaminantes y las variables meteorológicas monitoreadas, el CC procesa la información recibida procesando la información para obtener un promedio cada hora del total de los valores recibidos en una hora.

El archivo generado por el centro de control informático de la red automática de monitoreo atmosférico de la zona metropolitana del valle de Toluca; es almacenado en una carpeta la que se define con el nombre de DBH_ seguido del año de monitoreo. Dentro de esta carpeta están el archivo de cada uno de los contaminantes y variables meteorológicas monitoreadas en ese año.



Cada uno de estos archivos está definido con el nombre de BDH, separado por un guion bajo, luego el nombre del contaminante o variable meteorológica y finalmente el año en el que se generó el archivo. Este archivo contendrá los valores de las concentraciones promedio de cada hora que se registra de un contaminante o una variable meteorológica en cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico, también se registra la fecha y la hora en la que se reporta o se almacena el dato recibido en el centro de control.

1.15. Forma de presentación de los datos de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas, en la base de datos de la RAMA-ZMVT

Las señales digitales pretratadas en cada una de las estaciones de monitoreo, llegan al centro de control automáticamente cada minuto. Estos datos se van almacenando continuamente en una hoja de cálculo generado por el centro de control. Esta hoja de cálculo es un archivo, que recibe un tratamiento de los datos registrados. El tratamiento que recibe el total de los datos captados en una hora, es el cálculo de un valor promedio de concentración del contaminante o variable meteorológica en una hora continua de monitorización. (INECC, 2013)

El archivo final que genera el Centro de control, es una hoja de cálculo que consta de una columna FECHA, la que registra la fecha de la medición en cada una de las filas; una siguiente columna es la hora, la que registra la hora de la medición en cada fila; luego esta una columna con una clave para cada una de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT, en cada fila se registra la concentración promedio en una hora y fecha, de cierto contaminante o variable meteorológica medido en esa estación.

Los datos que se muestran en el archivo final (Anexo 1.1), son datos numéricos que representan la concentración promedio en cada hora de monitoreo, estos datos al estar correctamente medidos y registrados en la base de datos se presentan de acuerdo con el número de decimales para cada contaminante. En el caso de que las mediciones sean incorrectas o no exista medición, en la columna y en la fila correspondiente para la estación de monitoreo, dependiendo del contaminante medido, se genera un número negativo especificado como -9,999 para el NO₂, O₃,



SO₂; -99,99 para el CO; y -9999 para PM₁₀.

1.16. Discusión

En el Ecuador se encuentra vigente el Plan Nacional de Calidad del Aire (PNCA), que surge con el fin de cumplir con la Constitución de la República del Ecuador, la cual establece que el Estado protegerá el derecho de la población a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice un desarrollo sostenible; la gestión ambiental de la calidad del aire en el país presenta profundas falencias tales como: la falta de seguimiento de convenios suscritos, dispersión legislativa, dispersión de jurisdicción y competencias, debilidad institucional y presupuestaria del Ministerio del Ambiente (MAE). En el país no se cuenta con información precisa del estado de la calidad del aire, esto se debe a que la gestión en este sector continúa desarrollándose, por lo mismo se cuenta con pocas investigaciones sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas. Estos temas no han sido incluidos en los programas de desarrollo urbano y no se han llevado a cabo estudios epidemiológicos relacionados con la contaminación del aire.

Los indicadores de calidad del aire en México no han sido actualizados, y muchas de las redes de monitoreo ambiental existentes no se encuentran funcionando correctamente, por lo cual la calidad de los datos obtenidos para el inventario de emisiones de las ciudades no son del todo confiables.

La estructura vial en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, actualmente carece de vías periféricas que ayuden al descongestionamiento vehicular en las horas de afluencia en la zona central de los municipios de la zona, otra falencia es la saturación de transporte urbano como consecuencia de un diseño inadecuado de las rutas, los horarios; incrementando considerablemente la presencia de partículas de gases contaminantes a la atmósfera. La demanda energética puede incrementarse a causa de ciertos factores como la distancia recorrida, el incremento en la flota vehicular, el congestionamiento de las carreteras, la edad promedio del parque vehicular y la tecnología para el control de las emisiones.



Cada una de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT, cuenta con equipos de medición para cada contaminante atmosférico, los cuales determinan la concentración de los contaminantes en el aire mediante diferentes técnicas de medición para cada contaminante atmosférico y variable meteorológica. Cada equipo de medición genera una señal analógica que es transformada en digital y pretratada en cada estación de monitoreo, para ser enviada a través de una conexión telefónica con el Centro de Control, este genera una hoja de cálculo para cada contaminante y variable meteorológica; se realiza un tratamiento de los datos recibidos; y obtiene un valor promedio para cada hora; este valor numérico es almacenado en un nuevo archivo que detalla los valores promedio de cada hora y fecha, que reporta cada una de las estaciones de monitoreo.



CAPÍTULO 2.

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE MONITOREO ATMOSFERICO DE LA ZMVT

2.1. Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento para realizar el análisis de las bases de datos de monitoreo ambiental de la ZMVT, mediante la realización de los cálculos de los promedios anuales, mensuales y diarios, para obtener las gráficas de evolución de los contaminantes monitoreados en el periodo de estudio comprendido entre el año 2000 y el 2013.

Se describe qué son los diagramas de caja y los valores outliers debido a que en este trabajo de investigación se realiza un análisis de los promedios horarios y diarios de las concentraciones de los contaminantes criterio monitoreados en la ZMVT, mediante el uso de diagramas de caja para presentar el comportamiento de los valores atípicos u outliers de las concentraciones promedio horarias para el año 2013.

Por último se describe el método de regresión lineal multivariante, los métodos de verificación de la efectividad de los valores obtenidos con la predicción y el procedimiento que se realizó para generar un modelo de regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diario de PM₁₀ utilizando los datos de PM₁₀ y las variables meteorológicas que fueron monitoreadas en el año 2011 por la RAMA-ZMVT.

2.2. Procedimiento para realizar el análisis de las bases de datos

El procedimiento a seguir se divide en los siguientes pasos:

- Obtención de la base de datos de monitoreo ambiental de la RAMA-ZMVT.
- Ordenamiento y agrupación de la base de datos por contaminante y por estación en los periodos mencionados.
- Procesamiento de los datos en Excel (cálculo del promedio diario, mensual, anual de concentración)



2.2.1. Obtención de la base de datos de monitoreo ambiental de la ZMVT

La base de datos de monitoreo atmosférico de la ZMVT, fue entregada al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA), para que se realicen trabajos de investigación con la información de los registros de las concentraciones atmosféricas de los contaminantes criterio y de variables meteorológicas; las bases de datos de monitoreo atmosférico utilizadas en este trabajo de tesis son las bases de datos comprendidas entre los años 2000 – 2013.

2.2.2. Ordenamiento y agrupación de la base de datos proporcionada por la RAMA-ZMVT

Las bases de datos de cada año de monitoreo vienen especificadas en una carpeta de archivos, con el nombre de DBH seguido del año; cada carpeta de archivos almacena los registros de las concentraciones atmosféricas de cada uno de los contaminantes y variables meteorológicas de ese año. El procedimiento de ordenamiento y agrupación de las bases de datos de monitoreo atmosférico se puede ver en el Anexo 2.1.

2.2.3. Cálculo del promedio diario, mensual y anual de concentración para la ZMVT y cada estación de monitoreo atmosférico.

Para calcular la concentración diaria o promedio diario, promedio mensual y anual se calcula a partir de las concentraciones horarias o de los promedios móviles de 8 horas (dependiendo del tiempo promedio especificado en las NOMs), con la restricción, en general, de por lo menos el 50% de los registros verificados (12 o más concentraciones al día). En el caso de partículas y ozono, se aplica un criterio de suficiencia de 75% para calcular la concentración diaria. (INECC, 2015)

2.2.4. Cálculo del promedio anual de concentración de los contaminantes criterio para la ZMVT.

Al tener en cada una de las hojas de cálculo de la base de datos, los valores promedio de las concentraciones horarias, se realiza la extracción de estos valores hacia una nueva hoja de cálculo mediante una macro en Excel, es decir se crea una hoja de cálculo en la que están registrados los valores promedios de cada hora, para



cada uno de los años del periodo de estudio se tiene una columna de datos en la hoja de cálculo. Finalmente utilizando la herramienta de tablas dinámicas de Excel, se calcula el promedio anual para cada año y para cada contaminante tal como se expresa en la tabla 2.1, es evidente los NA presentes en la tabla de valores del promedio anual, esto es debido a que en los años 2009 y 2010 se realizó el mantenimiento y actualización de algunos equipos de medición y solamente se monitoreaban las variables meteorológicas y PM_{10} ; en el caso del NO_2 no se realiza ninguna medición hasta el año 2011.

PROMEDIOS POR AÑO					
AÑO	CO	O3	NO2	PM10	SO2
2000	1,45	0,030	NA	33	0,009
2001	1,41	0,025	NA	41	0,010
2002	1,21	0,026	NA	53	0,010
2003	1,25	0,026	NA	75	0,009
2004	1,13	0,026	NA	77	0,009
2005	1,84	0,031	NA	88	0,015
2006	1,92	0,031	NA	73	0,014
2007	2,00	0,027	NA	71	0,010
2008	1,45	0,019	NA	73	0,006
2009	NA	NA	NA	66	NA
2010	NA	NA	NA	65	NA
2011	1,01	0,028	0,026	80	0,008
2012	1,16	0,028	0,030	71	0,010
2013	1,21	0,027	0,035	67	0,008

Tabla 2.1 Valores de los promedios anuales calculados para cada contaminante

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT

2.2.5. Cálculo del promedio mensual de concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la ZMVT entre el 2000-2013.

Para obtener los valores de las concentraciones promedio mensual de PM_{10} monitoreado en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en el archivo de Excel en el que constan todos los años de monitoreo de PM_{10} entre el año 2000 al 2013; se creó una nueva hoja de cálculo en el archivo de Excel, en la cual se añadió como salida todas las tablas dinámicas provenientes de cada hoja de cálculo que representa cada año de monitoreo atmosférico de los contaminantes criterio, en cada tabla dinámica se obtuvo mediante un adecuado orden de los campos de la tabla dinámica filas y columnas, ya sea como columnas de valores o filtros como etiquetas. El orden correcto de los campos de cada tabla dinámica, nos permite obtener rápidamente los valores en la forma deseada para cada uno de los contaminantes y cada una de las etiquetas seleccionadas que se presentan como resultados.



Para cada uno de los años se obtiene los promedios mensuales de concentración de cada CC en el aire, los resultados obtenidos en cada tabla dinámica, se copian para generar una nueva hoja de cálculo, en la cual, se añaden todos los valores de cada año, uno a continuación del otro, con dos objetivos: a) para que los promedios mensuales de concentración de contaminantes del aire se presenten como una serie de datos en un periodo de tiempo determinado y b) se puedan visualizar fácilmente los patrones de comportamiento a partir de una gráfica de evolución de concentración en el tiempo de monitoreo atmosférico. En el Anexo 2.2 se muestra la tabla de datos de los valores mensuales de concentración de los contaminantes atmosféricos de la ZMVT del periodo de estudio (2000-2013).

2.2.6. Cálculo del promedio diario (promedio de 24 horas) de la concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la ZMVT entre el 2000-2013.

Para el cálculo del promedio diario o promedio de 24 horas, para cada contaminante, en una hoja de cálculo de un archivo de la base de datos de un contaminante se realizó mediante fórmulas matemáticas de Excel; una fórmula que considera los datos de todas las siete estaciones, omite valores negativos y letras, y comprueba el número de día que se especifica en la columna días del año. Esta comprobación se realiza con la columna días de la base de datos. Esta columna se añadió antes de la columna de los registros de la hora de medición en la base de datos, para obtener el día del año mediante una fórmula en la primera celda y arrastrada hasta el total de los datos, la suma de una unidad numérica (1) al valor anterior, cada vez que al verificar si, el valor de la hora especificada se encuentra en la hora 1 del día siguiente, empezando desde cero. Por lo cual se va a tener 24 filas con el mismo número de día hasta llegar al día 365 del año o al día 366 en caso de ser un año bisiesto.

Todos los valores calculados de los promedios anual, mensual, diario; nos servirán en ítems siguientes para determinar si los valores obtenidos están bajo o sobre el límite máximo permisible para cada contaminante atmosférico, impuesto por las NOMs.



2.3. Diagrama de caja

Un diagrama de cajas permite analizar el comportamiento de todas las concentraciones registradas en un año de monitoreo de los contaminantes en cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA- ZMVT. En cada estación de monitoreo se representan las concentraciones en diagramas de caja (figura 2.1), en la que se representa el valor mínimo, el percentil 25, la mediana, el promedio anual, el percentil 75, los límites superior e inferior de los bigotes; el valor máximo de los valores de las concentraciones y los valores atípicos de cada uno de los contaminantes monitoreados entre el 2011 al 2013.

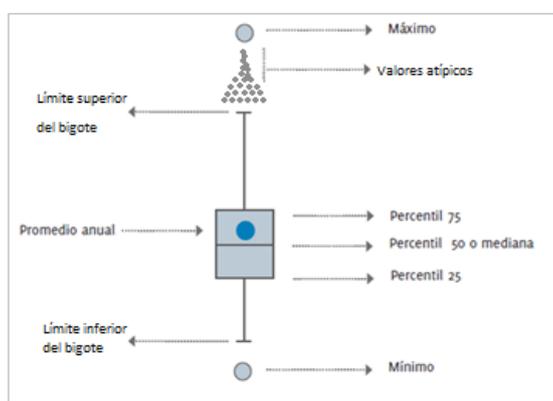


Figura 2.1. Representación de los valores que se presentan en un diagrama de caja

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta que el Rango Intercuartílico (RI) es la diferencia entre el percentil 75 (3^{er} cuartil) y el percentil 25 (1^{er} cuartil), por lo cual existen límites interiores y límites exteriores. Los primeros son barreras hasta las cuales se permiten datos, por estar muy cerca del valor mínimo registrado. Estos son los límites que definen los extremos de los bigotes. Los segundos límites indican cuándo un dato se aleja en exceso del resto y, siendo un valor atípico porque sobrepasa esta barrera.

Para elaborar un diagrama de caja se realizó el siguiente procedimiento, se ingresaron los datos en el orden adecuado en el Programa estadístico Minitab, este programa nos permite graficar fácilmente los diagramas de cajas y visualizar los valores atípicos. Pero para identificar el comportamiento de los valores atípicos hay que realizar el cálculo de cada valor estadístico que se necesita para elaborar un diagrama de caja en Excel.



En Excel se realizó el cálculo de los cuartiles o percentiles especificados a través de las formulas disponibles, la obtención de los valores mínimo y máximo, el promedio anual, y la mediana del grupo de mediciones registradas por cada estación de monitoreo.

Para el cálculo de los límites de los bigotes se utilizó las siguientes fórmulas:

Límite inferior inferior = Límite del bigote inferior = $Q1 - 1,5*(RI)$

Límite inferior superior = Límite del bigote superior = $Q3 + 1,5*(RI)$

2.4. Método de predicción de Regresión Lineal Multivariante

El análisis de regresión lineal multivariante es un método matemático-estadístico que permite establecer relaciones matemáticas entre un conjunto de variables X_1, X_2, \dots, X_k y una variable dependiente Y . (Januchs, 2012)

Los objetivos de un modelo de regresión pueden ser dos:

- Obtener una ecuación que permita predecir el valor de Y , una vez conocidos los valores X_1, X_2, \dots, X_k , que se conocen como modelos predictivos.
- Cuantificar la relación entre X_1, X_2, \dots, X_k y la variable Y , con el fin de conocer o explicar mejor la relación entre ellos. Se trata de modelos explicativos.

La ecuación general de la regresión multivariante corresponde con:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} \quad (2.1)$$

Donde Y_i es la variable dependiente (variable a predecir), β_0 es una constante, β_n coeficiente que representa la relación entre las variables (pesos), X_i variables independientes o parámetros de predicción y n es el número de variables predictoras.

El método de regresión lineal multivariante, es una aplicación estadística bastante usual en problemas de predicción de los contaminantes ambientales como PM_{10} y los distintos parámetros meteorológicos que intervienen, sin tomar en cuenta los procesos químicos y físicos que determinan la calidad del aire. (Januchs, 2012)



2.5. Evaluación de la predicción

Un aspecto importante al verificar el desempeño de un método de predicción es tener una métrica adecuada que permita comparar el desempeño de diferentes modelos, es decir se compara el valor obtenido al utilizar un modelo de predicción contra el valor o dato real de la variable que se está prediciendo.

- Media del Error Absoluto (MAE – Mean Absolute Error, por sus siglas en inglés), cuantifica los errores residuales, mide la precisión de un pronóstico mediante el promedio de la magnitud de los errores absolutos de cada error. El MAE resulta de gran utilidad cuando se desea medir el error del pronóstico en las mismas unidades de la serie original.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_p - Y_o| \quad (2.2)$$

- Error Cuadrático Medio (MSE-Mean Square Error, por sus siglas en inglés), mide las diferencias entre el valor real y el estimado, si el MSE es un valor pequeño, las previsiones serán más exactas que si el MSE es un valor grande.

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_p - Y_o)^2 \quad (2.3)$$

- Porcentaje del Error Medio Absoluto (MAPE-Mean Absolute Percent Error, por sus siglas en inglés), se calcula encontrando el error absoluto en cada periodo, dividiendo éste entre el valor real observado para ese periodo y después promediando estos errores absolutos de porcentaje. representa el porcentaje total del error de las predicciones. (Hanke, W Wichern, Mues Zepeda , & Guerrero Ushakova, 2006)

$$\text{MAPE} = \frac{100 \sum_{i=1}^n |Y_o - Y_p| / Y_o}{N} \quad (2.4)$$



2.6. Definición del procedimiento para generar el modelo de regresión lineal multivariante.

Para desarrollar el modelo matemático para predecir la concentración del promedio diario de PM₁₀ se utilizó la información disponible de la base de datos del año 2011, se decidió utilizar esta base de datos debido a que es el año en que inicia el funcionamiento de la estación de Ceboruco, y los equipos de medición registraban los datos con mayor confiabilidad. (Ambiente, 2015)

El presente modelo de predicción de concentración promedio diario de PM₁₀, con el uso de las variables meteorológicas, tomando como base la información proporcionada por la RAMA-ZMVT. El modelo propuesto (MP) se basa en una regresión lineal multivariante.

El procedimiento se divide en los siguientes pasos:

2.6.1. Cálculo del promedio cada hora de concentración de PM₁₀ y de las variables meteorológicas para la ZMVT

Las concentraciones horarias de PM₁₀ y los valores de las variables meteorológicas registradas a cada hora del día en cada estación de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT, se sintetizan en un solo valor, que va a ser un promedio que representa el valor o la concentración promedio de esa hora en el día; es decir se obtiene un valor promedio de las mediciones registradas cada hora en las siete estaciones utilizando la siguiente fórmula:

$$x_h = \frac{\sum_{E=1}^7 x_{E,h}}{n_E} \quad (2.5)$$

De donde:

x_h = promedio de las mediciones para la hora t

n_E = número de datos válidos de la hora t

$x_{E,h}$ = valor de concentración correspondiente a la hora h dentro de la estación E .

Para utilizar esta fórmula en Excel se le agrega una condición, la cual va a calcular el valor del promedio diario siempre y cuando se cumpla con los criterios establecidos.



2.6.2. Cálculo de los valores mínimos de las variables meteorológicas

Para calcular el valor mínimo de los promedios horarios para la ZMVT, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Min_d = \min U_{h=0}^{24} x_{h,d} \quad (2.6)$$

De donde:

Min_d = Valor mínimo correspondiente a un día

$U_{h=0}^{24} x_{h,d}$ = valores promedio de concentración horaria correspondiente al total de mediciones h dentro del día d.

Al utilizar esta fórmula se obtienen los valores mínimos de los promedios horarios en un día de monitorización de las variables y los contaminantes en la ZMVT; estos valores mínimos se agregan en una nueva columna de datos, en cada archivo a ser utilizado.

2.6.3. Cálculo de los valores máximos de las variables meteorológicas

Para calcular el valor mínimo de los promedios horarios para la ZMVT, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Max_d = \max U_{h=0}^{24} x_{h,d} \quad (2.7)$$

De donde:

Max_d = Valor máximo correspondiente a un día

$U_{h=0}^{24} x_{h,d}$ = valores promedio de concentración horaria correspondiente al total de los promedios dentro del día d.

Al utilizar esta fórmula se obtienen los valores máximos de los promedios horarios en un día de monitorización de las variables y los contaminantes en la ZMVT; estos valores máximos se agregan en una nueva columna de datos, en cada archivo a ser utilizado.

Los cálculos realizados de los promedios diarios, valores mínimos y máximos diarios son realizados en cada hoja de cálculo de PM10, HR, RS, TMP, VV y DV; archivos de la base de datos del año 2011 proporcionada por la RAMA-ZMVT. Al tener



todos los cálculos realizados se generó una hoja de Excel que contenga los valores promedios diarios (AVG), los valores mínimos y máximos diarios ordenados en columnas de la siguiente manera AVG-PM₁₀, Min HR, AVG-HR, Max-HR; Min-RS, AVG-RS, Max-RS; Min-TMP, AVG-TMP, Max-TMP; Min-VV, AVG-VV, MAX-VV; AVG-DV; y además se agregó una columna de la concentración de PM₁₀ del día anterior (PM₁₀/Da). (Tabla 2.1)

AVG-PM10	MIN-TMP	AVG-TMP	MAX-TMP	MIN-HR	AVG-HR	MAX-HR	MIN-VV	AVG-VV	MAX-VV	MIN-RS	AVG-RS	MAX-RS	AVG-DV	AVG-PM10/Da
374	1	1	1	15	38	56	0.3	2	3	40	345	725	195	-
71	0	0	0	25	51	81	0.3	2	3	54	549	906	183	374
90	0	0	0	24	55	62	0.2	1	2.9	69	281	896	163	71
116	0	0	0	12	51	79	0.3	1	2	70	590	904	181	90
141	4.3	20.5	2.8	14	42	71	0.2	1	2.1	2	477	906	239	116
144	4.4	21	21	12	42	66	0.2	1	2	1	486	902	252	141

Tabla 2.2 Promedios diarios, valores mínimos y máximos de variables utilizadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del año 2011 de la RAMA-ZMVT

2.6.4. Interacción entre las variables meteorológicas

Para obtener la interacción entre las variables meteorológicas, se multiplicó los valores promedio diarios entre dos variables meteorológicas, es decir se multiplicaron los valores diarios obtenidos de una variable meteorológica con otra; a continuación se exponen las combinaciones de variables que se realizaron: D (TMP*HR), D (TMP*VV), D (TMP*RS), D (HR*VV), D (HR*RS), D (VV*RS). En la interacción no se considera la variable de la Dirección del viento (DV) debido a que en los análisis realizados los coeficientes de correlación lineal son inferiores a 0,028, omitiendo estas interacciones.

Las columnas de las interacciones entre las variables meteorológicas se agregan al archivo de la tabla 2.2, teniendo un archivo con todas las variables que pueden ser significativas para generar el modelo de regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la ZMVT. (Anexo 2.3)



2.6.5. Obtención de los coeficientes de correlación lineal entre el promedio diario de PM_{10} con los promedios diarios de las variables meteorológicas y la interacción entre variables meteorológicas.

Los coeficientes de correlación (r) lineal se calcularon en Excel, con el uso de la herramienta de análisis de datos, obteniendo un cuadro de datos que especifican todas las correlaciones lineales entre las diferentes variables presentes en el archivo (Anexo 2.4). Los valores de correlación varía entre -1 y 1, si la correlación es positiva; entonces cuando la variable aumenta, se espera la concentración de PM_{10} también aumente y si la correlación es negativa, entonces cuando la variable aumenta, se espera que la concentración de PM_{10} disminuya. El objetivo de los coeficientes de correlación es identificar las variables meteorológicas y sus interacciones, que presenten valores de correlación mayores que 0,5 o menores que -0,5 con los datos de los promedios diarios de PM_{10} . Las variables con valores de correlación que están entre -0,3 y 0,3 son consideradas muy bajas, lo cual no indican que no sean significativas en el modelo, ya que pueden presentar una correlación curva o diferente, pero para generar este modelo de predicción solo se consideran los valores de correlación lineal con valores de R superiores a 0,25.

2.7. Conclusión

La organización y reagrupación de los archivos de las bases de datos de monitoreo ambiental de la ZMVT, permitió realizar los cálculos de los promedios anuales, mensuales, móviles de 8 horas y diarios en las diferentes hojas de cálculo que mediante macros o procesos manuales se obtuvieron los valores necesarios que nos servirán para generar las gráficas de comportamiento para cada contaminante criterio monitoreado, los promedios anuales, mensuales y diarios; se calcularon para cada una de las estaciones de monitoreo y un valor promedio que representa el valor promedio para la ZMVT.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de los valores promedio de concentración de los contaminantes criterio; anual, mensual, diaria, 8 horas móviles; se realizaron bajo los criterios de suficiencia de datos que establece el INECC, para el cálculo de las concentraciones diarias utilizando las concentraciones horarias.



Al generar el modelo de regresión lineal multivariante se trabaja con la base de datos del año 2011, se decide trabajar con este año debido a que la RAMA-ZMVT, en el año 2010 se realizaron procesos de mantenimiento y actualización de los equipos de monitoreo ambiental. Se realizará una modelación de las variables para generar una regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diario de PM_{10} utilizando la concentración de PM_{10} del día anterior, las variables meteorológicas y la interacción entre estas; a su vez se encontró los valores de correlación lineal entre todas las variables, siendo la correlación de interés la que presente un valor mayor a 0,25 y un menor a -0,25 del valor de correlación lineal entre la concentración promedio diario de PM_{10} con todas las otras variables implicadas en el cuadro de las posibles variables a ser consideradas para generar el modelo de regresión lineal multivariante.

También se describen en este capítulo el método de predicción de regresión lineal y los métodos de verificación de la efectividad de los valores que se pudieran obtener al aplicar algún modelo de predicción de valores futuros; en este trabajo de investigación será el caso de comparar dos modelos de regresión propuestos cual genera menor error al predecir un valor de concentración promedio diario de PM_{10} .



CAPÍTULO 3.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA ZMVT ENTRE LOS AÑOS DEL 2000 AL 2013

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan las gráficas de evolución de los contaminantes monitoreados en el periodo de estudio comprendido entre el año 2000 y el 2013; estas gráficas sirvieron para entender el comportamiento de los datos, para verificar el cumplimiento de las NOMs para cada contaminante definidas en el capítulo 1, con el fin de identificar la tendencia de los datos comprendidos en el periodo de estudio para cada uno de los contaminantes monitoreados por la RAMA-ZMVT.

La base de datos utilizada en es este trabajo comprende la información de los 14 años, de las siete estaciones de monitoreo en la ZMVT.

3.2. Gráficas de evolución de los contaminantes criterio en la ZMVT entre los años 2000 al 2013

Para fines del presente trabajo de investigación se decidió presentar el análisis del comportamiento anual, mensual, así como por día del año y con ello, poder conocer la tendencia y comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos en la ZMVT como una serie de tiempo en el periodo de estudio comprendido entre los años 2000 al 2013.

3.2.1. Material particulado menor a diez micrones (PM₁₀)

La evolución del comportamiento del promedio anual de las PM₁₀ indica que es el principal contaminante que genera problemas en la ZMVT, a partir del año 2002 tal como se visualiza en la figura 3.1, que para cada año se muestra el valor promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico y el promedio para la ZMVT, en esta gráfica se considera el valor fijado por la NOM-025/1993 (50 µg/m³) y por la MON-025/2014 (40 µg/m³), para el promedio anual de concentración de PM₁₀ con este límite de concentración fijado, se puede tener una visión más clara de la problemática que representan las PM₁₀ debido a la tendencia creciente sobre el límite fijado por la NOM-025, la cual, a partir del año 2002 rebasa el valor fijado en todas las



estaciones de la RAMA-ZMVT; siendo la estación de monitoreo atmosférico de San Cristóbal Huichochitlán la que reporta los promedios anuales más altos de concentración de PM₁₀ con un pico de valores más altos en los años 2005 y 2011.



Figura 3.1 Evolución del promedio anual de PM₁₀ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

La evolución del comportamiento del promedio mensual de las PM₁₀ para el año 2011 (figura 3.2) indica que el comportamiento de los promedios mensuales obtenidos a partir de los valores de la concentración de cada hora registrados en la base de datos; como se aprecia en la gráfica la evolución mensual que presenta un fuerte componente estacional; concentraciones bajas durante la época de lluvias como consecuencia del lavado atmosférico; concentraciones intermedias durante la época seca-cálida influenciadas por la presencia de vientos de mayor intensidad; y concentraciones máximas durante la temporada seca-fría, provocado por las condiciones atmosféricas desfavorables para la dispersión de los contaminantes, principalmente durante la temporada seca-fría.

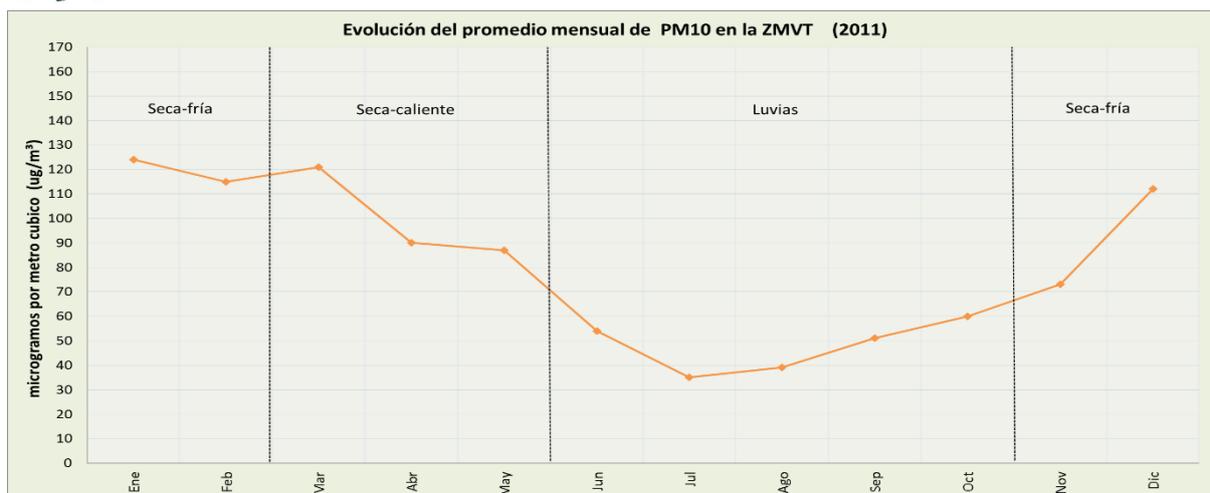


Figura 3.2 Evolución del promedio mensual de PM₁₀ en la ZMVT (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT (2011)

Los valores de las concentraciones promedio mensuales del año 2011 indican que el comportamiento de tendencia y estacionalidad para los años antecesores y predecesores de los cuales se tienen datos disponibles son similares y los cuales se presentan en la figura 3.3; en la cual se puede identificar que los promedios mensuales más altos se presentan entre los dos últimos meses del 2004 hasta el cuarto mes del 2005 y de igual manera hasta el cuarto mes del 2011.

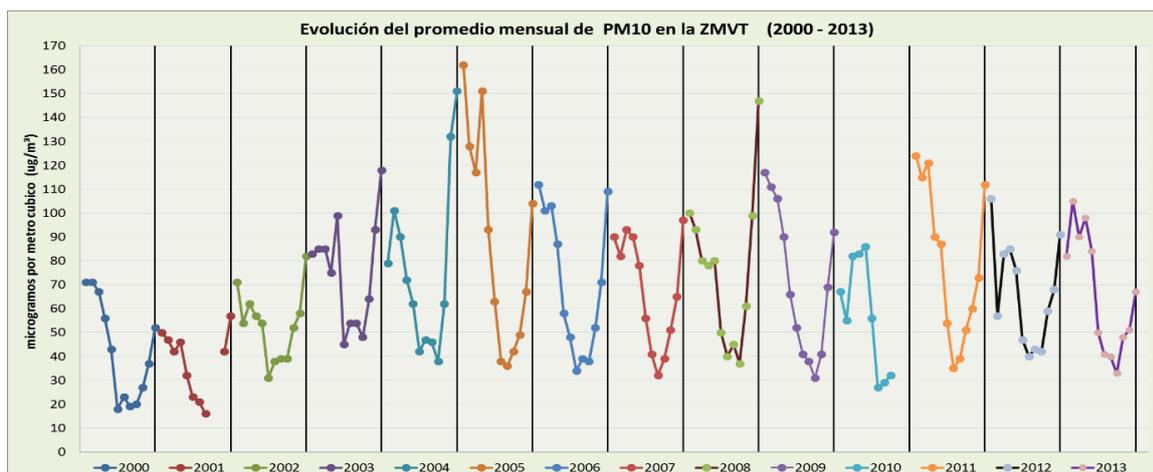


Figura 3.3 Evolución del promedio mensual de PM₁₀ en la ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013



3.2.2. Monóxido de Carbono (CO)

En la figura 3.4 se muestra la tendencia que ha tenido el monóxido de carbono durante los últimos 15 años, excluyendo los años 2009 y 2010 años en los que no existen datos de medición. Como se puede ver la concentración promedio anual para todas las estaciones y la ZMVT ha mantenido un nivel constante de tendencia hasta el año 2004, a partir del 2005 se registran los valores más altos registrados por la RAMA-ZMVT pero muy por debajo del límite máximo permisible según el valor fijado en la NOM-021/1993 para el promedio móvil de 8 horas (11 ppm). Los años siguientes desde el 2006 al 2008 presentan una tendencia decreciente teniendo un valor de 2,12 ppm en el 2005 y un valor de 1,42 ppm en el 2008. En los años 2009 y 2010 no hay medición de CO. El 2011 presenta un valor del promedio anual de 1,01 ppm, dándose por entendido que la tendencia desde el 2006 continúa. Luego del año 2011 con un valor de 1,01 ppm presenta una tendencia creciente hasta el 2013 con un valor de 1,23 ppm. Todos los valores registrados de las concentraciones de CO por las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, se encuentran muy por debajo de la NOM-021/1993, sin embargo en la figura sólo se muestran los promedios anuales y la norma mexicana para este contaminante no es anual. Debido a las concentraciones de CO muy por debajo del límite máximo, no representa riesgo alguno para la salud humana.

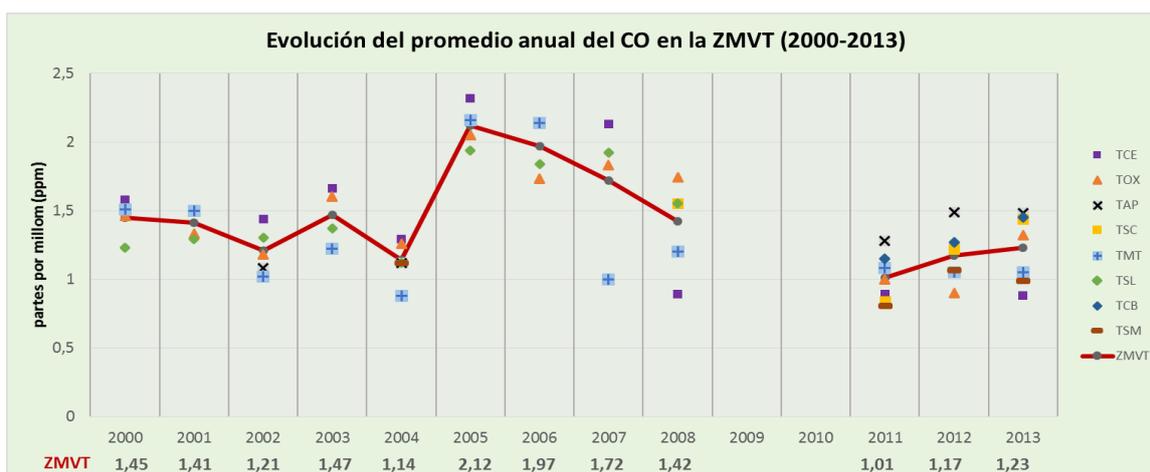


Figura 3.4 Evolución del promedio anual de CO en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013



La evolución del comportamiento del promedio mensual del CO para el año 2011 (figura 3.5) indica que el comportamiento de los promedios mensuales obtenidos a partir de los valores de la concentración de cada hora registrados en la base de datos; como se aprecia en la gráfica la evolución mensual presentan una distribución estacional homogénea a lo largo del 2011. Las concentraciones máximas se registran en la época seca-fría, especialmente en diciembre y enero, lo cual está asociado al incremento en la intensidad de actividades comerciales y sociales características de las fiestas de fin de año.

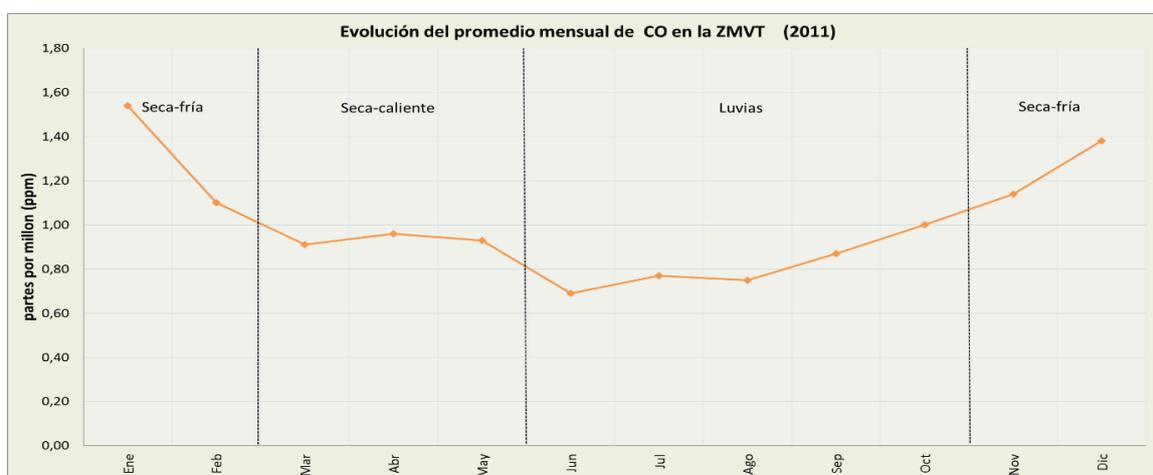


Figura 3.5 Evolución del promedio mensual de CO en la ZMVT (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT (2011)

Las máximas concentraciones de monóxido de carbono en la ZMVT se registran entre los meses de diciembre y enero, siendo los años 2005, 2006 y 2007 en los que se registran las concentraciones máximas, las cuales son aproximadamente un 40% inferiores a lo que establece la NOM de protección a la salud correspondiente. En la figura 3.6 se muestran los promedios mensuales de CO en la ZMVT a partir del año 2000 hasta el 2013, excluyendo los años 2009 y 2010. Éstos presentan un comportamiento de tendencia homogénea muy similar como se describe en la figura 3.5.

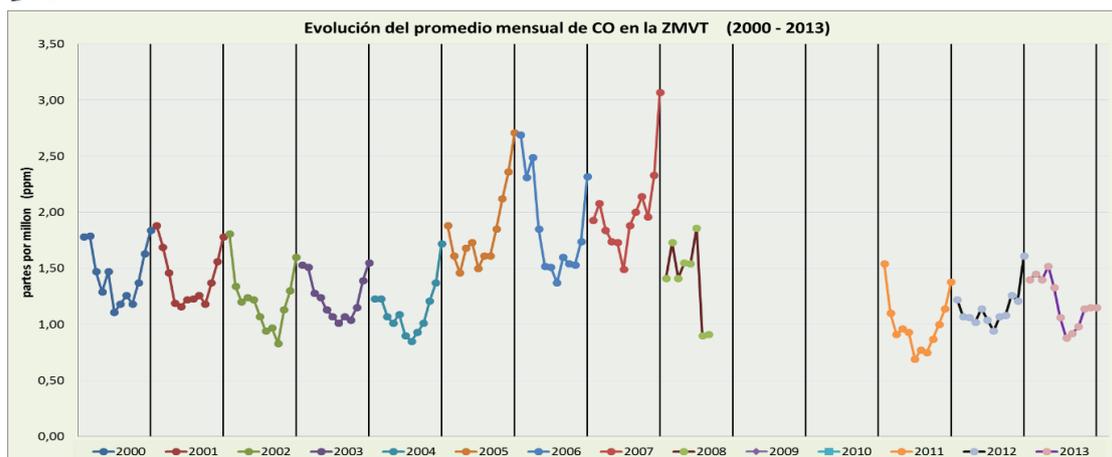


Figura 3.6 Evolución del promedio mensual de CO en la ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

3.2.3. Ozono (O₃)

El ozono se ha mantenido alrededor de un promedio de concentración anual de las 0.027 ppm para la ZMVT, aun y cuando existen fluctuaciones en las diferentes estaciones de la RAMA; el O₃ es otro contaminante de importancia en la ZMVT después de las PM₁₀ y PM_{2,5}, en lo relativo a concentraciones altas. En la figura 3.7 se puede ver que en el año 2006 se registran las concentraciones máximas en el período 2000 al 2013, excluyendo los años 2008 por falta de mediciones de O₃, y 2009 y 2010 porque no existen datos de medición. También se identifica que la estación de San Cristóbal Huichochitlán registra el promedio anual de concentración de mayor valor a diferencia de las otras estaciones.

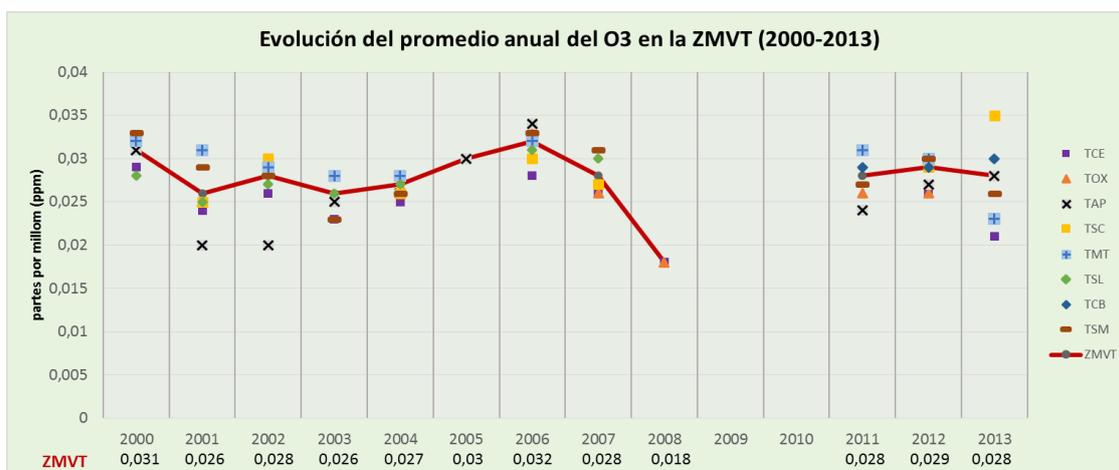


Figura 3.7 Evolución del promedio anual de O₃ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013



En la figura 3.8 se presentan los promedios mensuales de concentración de O_3 , en la que se puede ver la tendencia estacional, apreciándose un comportamiento muy homogéneo a lo largo del año, las concentraciones máximas se registran en el mes de mayo en la época seca-caliente con valores intermedios entre la época seca-fría y con un menor valor de los promedios de concentración de O_3 en la época de lluvia. Los valores promedio en cada uno de los meses se encuentran por debajo del valor de 0,11 ppm para el promedio de 1 hora y de 0,08 ppm para el promedio móvil de 8 horas, sin embargo debido a las fluctuaciones de las concentraciones horarias se considera para realizar un análisis de comportamiento de los datos de concentraciones horarias con el uso de diagramas de cajas.

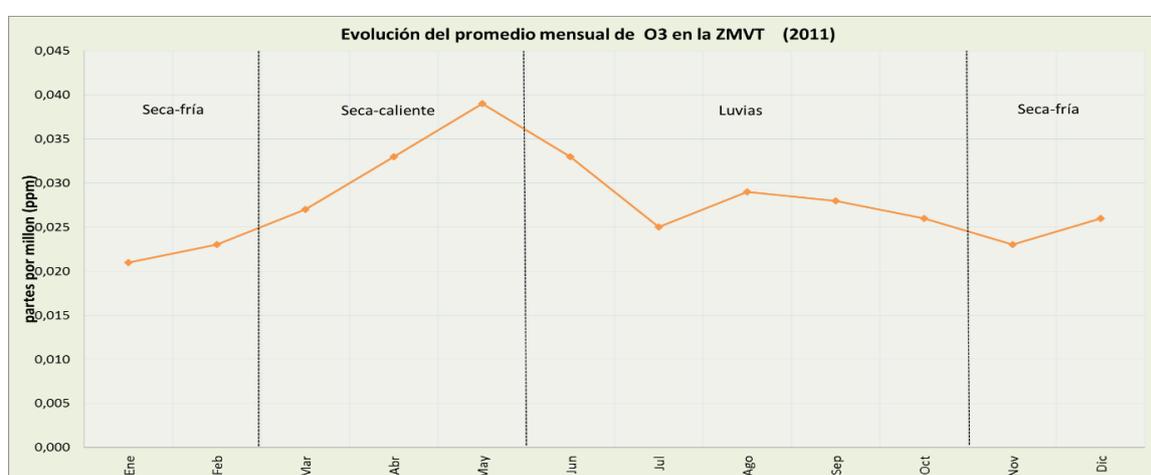


Figura 3.8 Evolución del promedio mensual de O_3 en la ZMVT (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT (2011)

La tendencia de los promedios mensuales de concentración de O_3 para los años del 2000 al 2007 y del 2011 al 2013, presentan el mismo patrón de comportamiento descrito en la figura 3.8; en la figura 3.9 se distingue que los valores máximos de concentración se registran en el 2005 y que presentan una disminución paulatina en los años 2006 al 2013, de los máximos en cuanto a la magnitud de los promedios horarios por ende en los promedios mensuales de concentración, observándose una disminución de los promedios mensuales durante el 2011 al 2013, en comparación con los años 2000 al 2005.

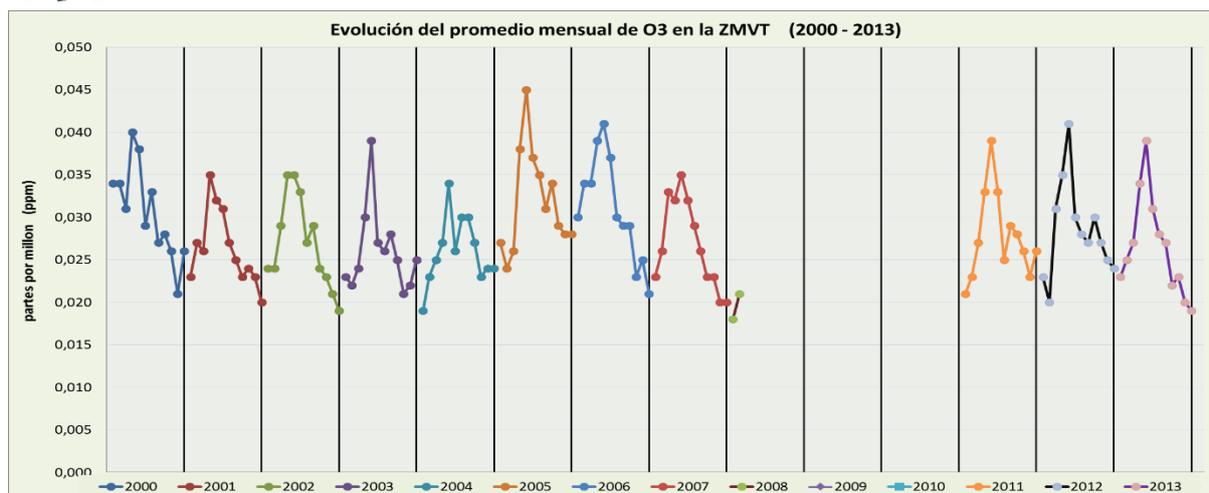


Figura 3.9 Evolución del promedio mensual de O₃ en la ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

3.2.4. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) las mediciones por la red automática de monitoreo atmosférico de Toluca, para el dióxido de nitrógeno (NO₂), se registran y están disponibles los datos desde el año 2011 en adelante, las concentraciones registradas en cada una de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT a partir del 2011 indican una tendencia creciente ligeramente pronunciada en aumento de los promedios de cada hora tal como se puede ver en la gráfica 3.10 en la cual la estación de monitoreo del aeropuerto presenta las concentraciones de NO₂ más altas frente a las otras estaciones. Los valores de la concentración promedio de NO₂ cada hora son utilizadas para el cálculo del promedio anual de concentración en cada estación.

Los promedios anuales de concentración de NO₂ no tienen un valor crónico fijado para su comprobación, las concentraciones anuales mantienen un promedio de 0,030 ppm sin embargo se encuentran muy por debajo de las 0,21ppm que es el valor fijado para la exposición aguda en la NOM-023/1993 que regula la concentración de NO₂ en la atmosfera. Es importante que se realice un monitoreo continuo para comparar cada hora las concentraciones del contaminante.

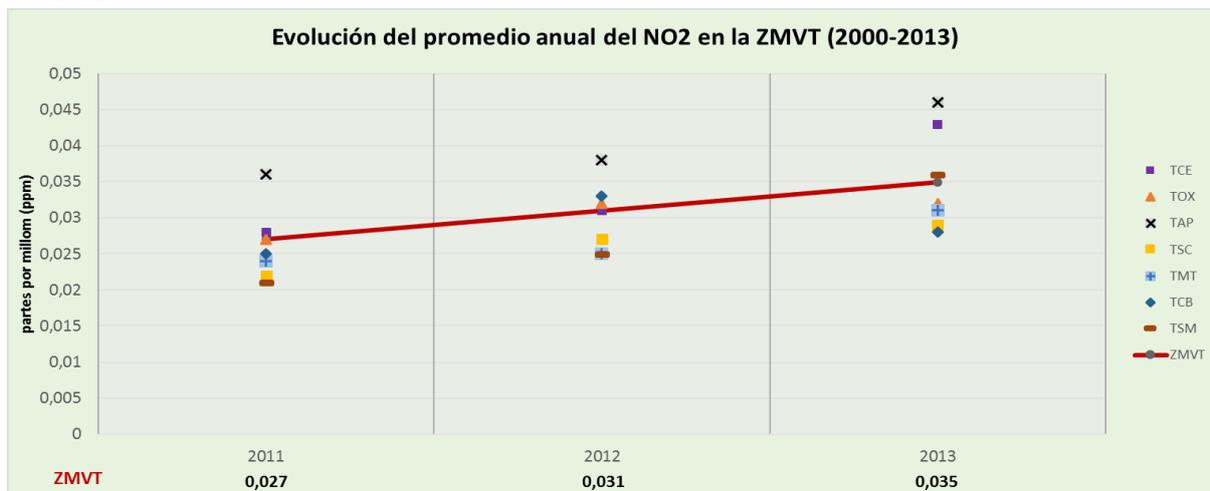


Figura 3.10 Evolución del promedio anual de NO₂ en las estaciones de la RAMA- ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

La gráfica 3.11 muestra el comportamiento del promedio mensual de NO₂ obtenido con base en los valores registrados de la concentración del promedio de cada hora por la RAMA-ZMVT. A lo largo del 2011 se aprecia una tendencia estable a lo largo de las diferentes épocas del año, en la época de lluvias se registran los promedios de concentración más bajos; y las máximas concentraciones se presentan durante los meses de invierno en la temporada seca-fría especialmente en diciembre. Ningún valor rebasa el valor límite de 0,21 ppm establecido por la NOM-023. La concentración máxima registrada es de aproximadamente un 60% por debajo del límite establecido, a lo largo de los años 2011 y 2013.

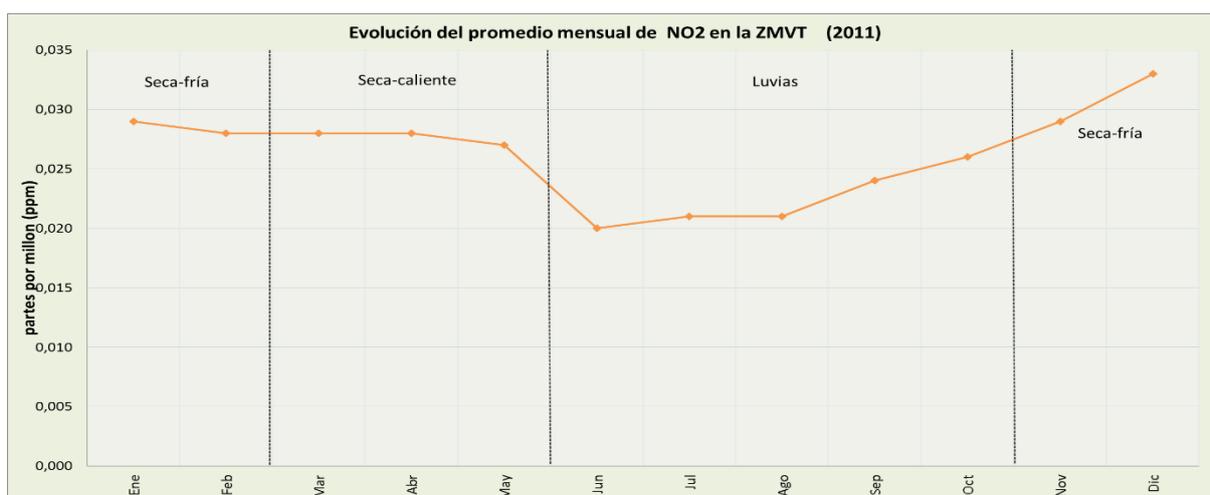


Figura 3.11 Evolución del promedio mensual de NO₂ en la ZMVT (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT (2011)



El comportamiento de los promedios mensuales de concentración de NO₂ a lo largo del periodo de estudio se presenta en la gráfica 3.12, en la cual claramente se puede ver la tendencia creciente del aumento de concentración del contaminante en la ZMVT presentando el año 2013 un comportamiento diferente a los años anteriores.



Figura 3.12 Evolución del promedio mensual de NO₂ en la ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

3.2.5. Dióxido de azufre (SO₂)

Los promedios anuales de dióxido de azufre (SO₂) obtenidos a partir de las mediciones cada hora en cada una de las estaciones de la RAMA, que se presentan en la gráfica 3.13, a lo largo del periodo de estudio presentan un comportamiento estable desde el año 2000 al 2003. A partir del 2004 presenta una tendencia creciente hasta alcanzar los valores máximos de concentración del contaminante en el año 2006; después del 2006 la tendencia de las concentraciones disminuye paulatinamente hasta el 2008; el comportamiento tal parece que regresa a ser estable desde el 2008 en adelante, ya que en los años 2011 al 2013 las concentraciones son bajas y no presentan una tendencia pronunciada del incremento de la presencia del contaminante en la atmosfera. A pesar de que en los años 2006 al 2007 los datos alcanzan los valores máximos registrados por la RAMA, en ninguna ocasión se rebasa el valor de 0,025 ppm fijado por la NOM-022/2010. La zona de la estación de monitoreo del aeropuerto es la más problemática para este contaminante, esto es debido a que es una zona industrial.

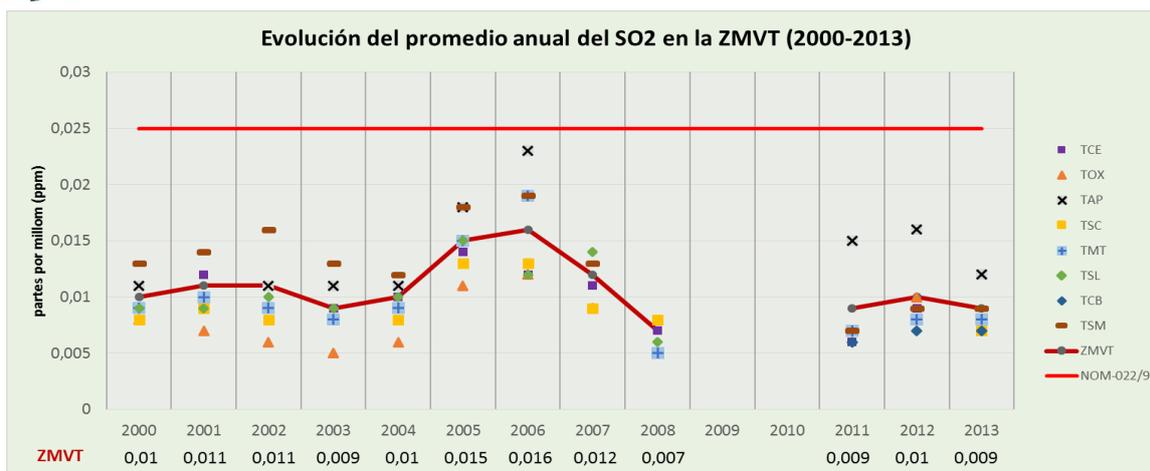


Figura 3.13 Evolución del promedio anual de SO₂ en las estaciones de la RAMA- ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

El comportamiento de los promedios mensuales de concentración de SO₂ obtenidos en el año 2011 se presentan en la gráfica 3.14 en la cual se puede ver que existe un comportamiento estable de los datos durante las diferentes épocas del año, presentando las concentraciones más altas en los meses de invierno entre los meses de noviembre a febrero, o entre los meses de mayo a junio; que son los meses en los que se registran una mayor concentración del contaminante debido al incremento de la actividad industrial y comercial en la ZMVT.

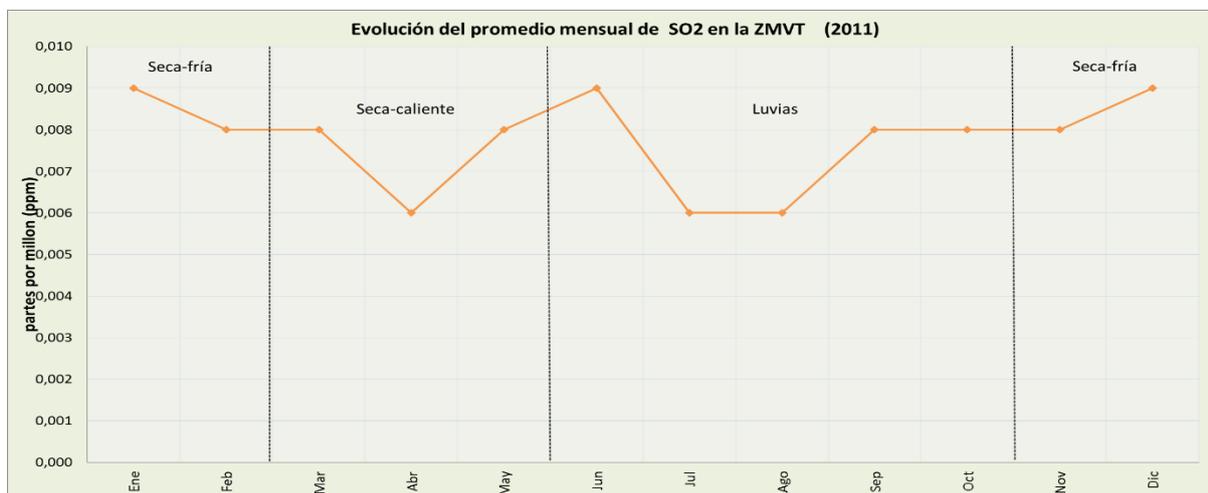


Figura 3.14 Evolución del promedio mensual de SO₂ en la ZMVT (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT (2011)



El comportamiento de los promedios mensuales de concentración de SO_2 a lo largo del periodo de estudio se presenta en la gráfica 3.15, en la cual claramente se puede ver un comportamiento estable de los datos desde el año 2000 hasta inicios del 2005, año en el cual se presentan una tendencia en aumento de la concentración del contaminante hasta alcanzar las concentraciones máximas registradas en mes de enero del 2006, después se presenta una considerable disminución en la concentración hasta los últimos meses del año 2008, tal parece que en los años 2009 y 2010, que no existen registros de medición del contaminante, los datos de las concentraciones registradas se mantienen estables con un comportamiento regular de altos o bajos niveles de concentración del contaminante en la aire monitoreado en la ZMVT, de acuerdo con los meses y épocas del año.



Figura 3.15 Evolución del promedio mensual de SO_2 en la ZMVT (2000-2013)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2000-2013

3.3. Análisis del comportamiento de la concentración promedio de cada hora de los contaminantes monitoreados en la RAMA-ZMVT e identificación de datos atípicos a partir del año 2011 al 2013.

Para el análisis del comportamiento de las mediciones horarias de concentración de los contaminantes monitoreados se utilizó los diagramas de caja para la representación de los datos registrados en cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico de la Zona metropolitana del Valle de Toluca.



3.3.1. Identificación y análisis del comportamiento de valores atípicos de las mediciones de los contaminantes registradas en el año 2013 a través del uso de Diagramas de Cajas

Material particulado menor a 10 micrones (PM₁₀)

En la gráfica 3.17 se presentan a través de diagramas de cajas las concentraciones promedio horaria de PM₁₀ registradas en el año 2013 en cada una de las estaciones de monitoreo. Claramente se puede ver que la estación con registros de concentraciones altas de PM₁₀ es la estación de San Cristóbal, ya que el límite el percentil 75 tiene un valor de 118 µg/m³, su promedio anual es de 96 µg/m³ y el valor máximo de concentración promedio en una hora de 801 µg/m³.

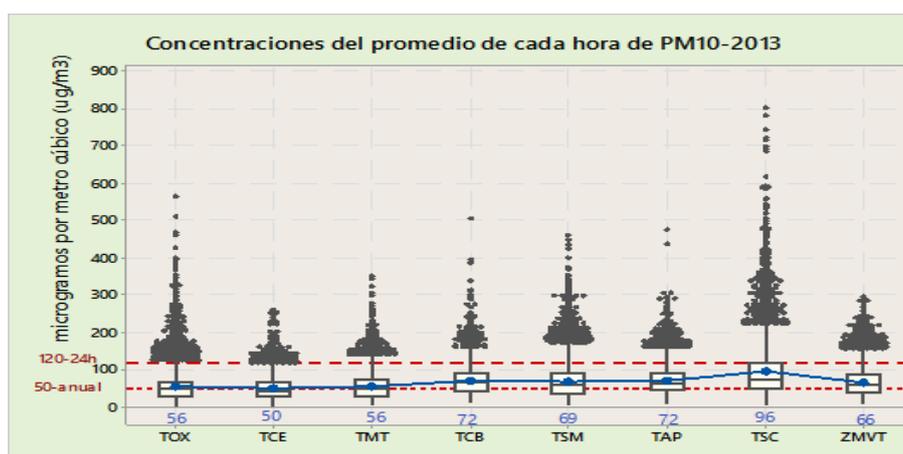


Figura 3.17 Diagrama de Cajas de las concentraciones promedio horaria de PM₁₀ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

En cada una de las estaciones se presentan valores atípicos que sobrepasan los límites de los bigotes y el máximo permitido por la NOM-025. Estos valores se pueden presentar debido a fallas de los equipos, malas mediciones o debido a episodios de contaminación que se presentan en ciertas horas del día en cada una de las estaciones de monitoreo.

El comportamiento de los valores atípicos de las mediciones del promedio horario de PM₁₀ en el año 2013 en las horas del día, se presentan en la gráfica 3.18, en la cual se puede diferenciar claramente que las concentraciones altas de PM₁₀ se presentan entre las 8h00 a 12h00 y de 15h00 a 20h00 en la mayoría de las estaciones se registran los valores más altos a las 10h00 y a las 18h00, siendo estas horas en



las que se desarrolla la actividad económica de la ZMVT. La estación de San Cristóbal registra las concentraciones más altas a las 09h00, 12h00 y 18h00 y registrando constantemente concentraciones superiores a los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

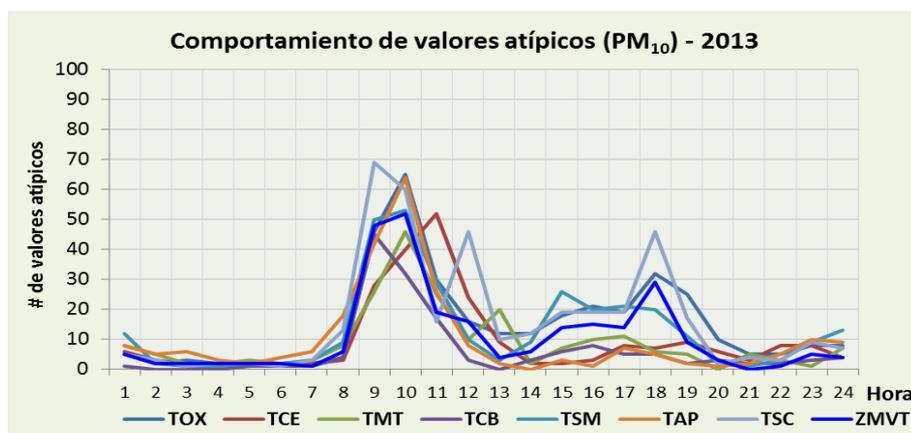


Figura 3.18 Representación de los valores que se presentan en un diagrama de caja
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

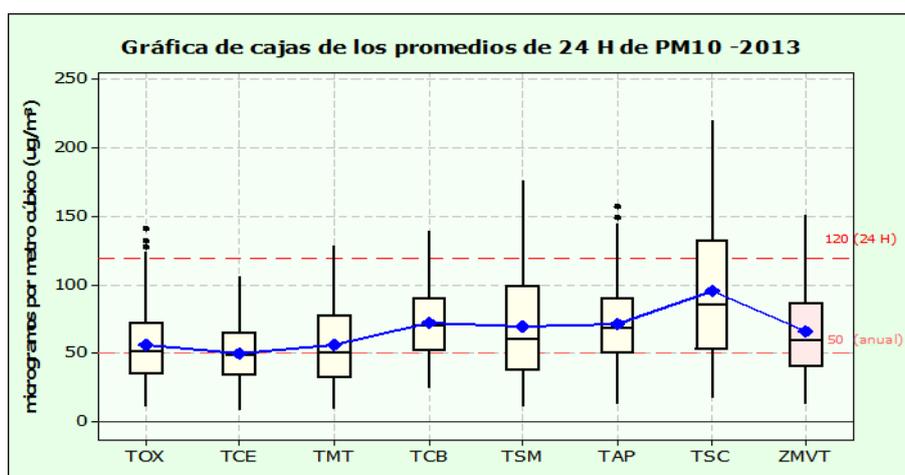


Figura 3.19 Diagrama de Cajas de las concentraciones promedio de 24H de PM10 -2013
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

En la gráfica 3.19 se puede ver que la estación con mayor número de veces que sobrepasa el valor límite del valor de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la NOM-025, en el año 2013 es la estación de San Cristóbal con más del 25 % del total de los datos, siendo estos valores superiores al límite máximo de concentración del promedio de 24H de PM_{10} .



Ozono (O₃).

En la gráfica 3.20 se presentan a través de diagramas de cajas las concentraciones promedio horaria de O₃ registradas en el año 2013 en cada una de las estaciones de monitoreo. Se puede ver que las estaciones con registros de concentraciones altas de O₃ son las estaciones de Ceboruco y la de San Cristóbal, sobrepasando al menos una vez el valor de 0,11 ppm para la concentración máxima en una hora establecida en la NOM-020. En la estación de Toluca Centro se presenta la mayor cantidad de valores atípicos, indicando que el 98,26% de los datos tienen una concentración menor a 0,06 ppm.

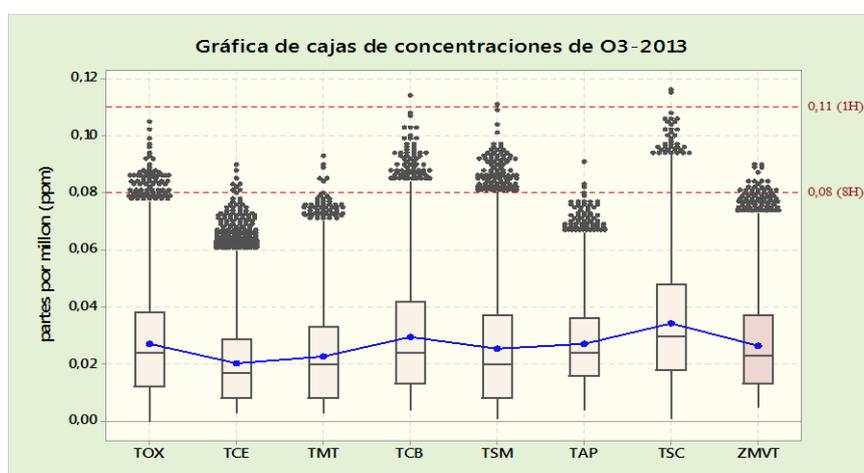


Figura 3.20 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de O₃ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

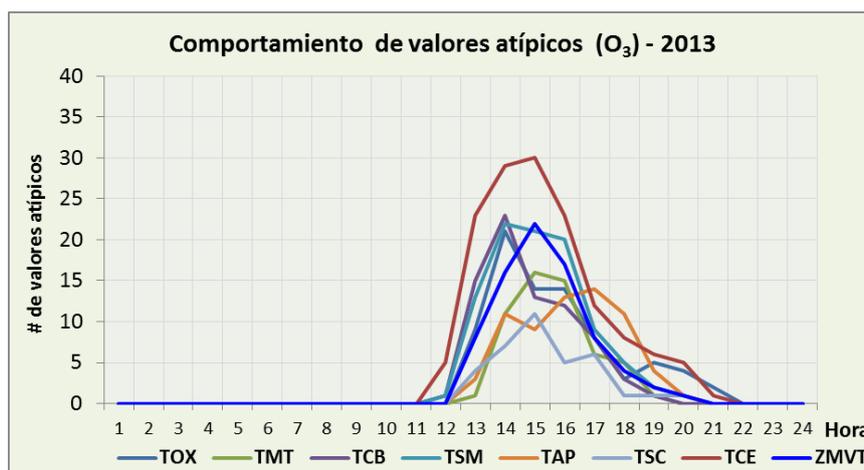


Figura 3.21 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de O₃ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013



El comportamiento de la presencia de valores atípicos en los años anteriores presenta el mismo patrón para los años anteriores, con la única diferencia en la variación del total de valores atípicos, ya que pueden presentarse tanto un aumento de valores atípicos o menos valores atípicos.

Dióxido de Carbono (CO).

En la gráfica 3.22 se presentan a través de diagramas de cajas las concentraciones promedio horaria de CO registradas en el año 2013 en cada una de las estaciones de monitoreo. Se puede ver que las estaciones con registros de concentraciones altas de CO son las estaciones de Ceboruco, Aeropuerto y San Cristóbal, estando todas estas concentraciones muy debajo del límite máximo establecido en la NOM-021 de 11ppm para un promedio móvil de 8 horas. Todas las estaciones de monitoreo presentan valores atípicos de las mediciones de concentraciones horarias.

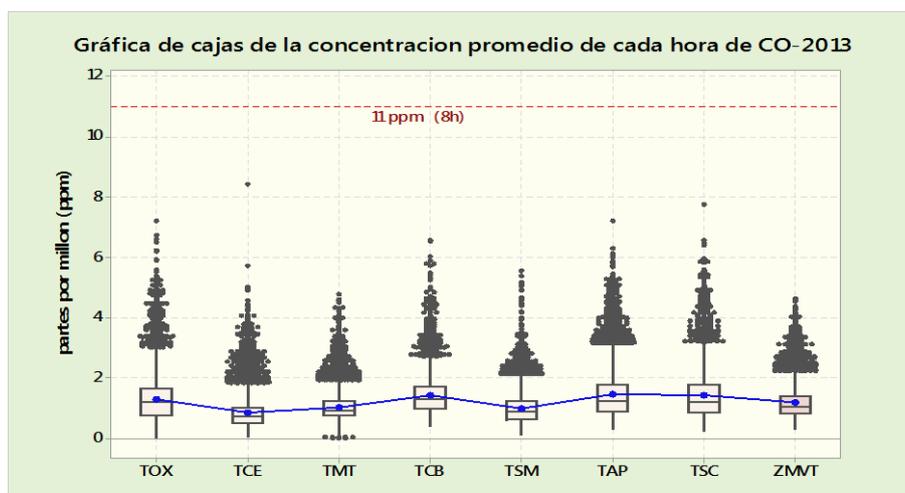


Figura 3.22 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de CO -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

En la gráfica 3.23 se presentan los promedios móviles de 8 horas, para el valor diario de concentración del CO, se presenta el máximo valor de los promedios móviles de 8 horas calculados para cada estación de monitoreo, claramente se puede ver que los promedios máximos alcanzan valores inferiores a 6ppm, razón por la cual se puede decir que el CO no rebasa la NOM-021.

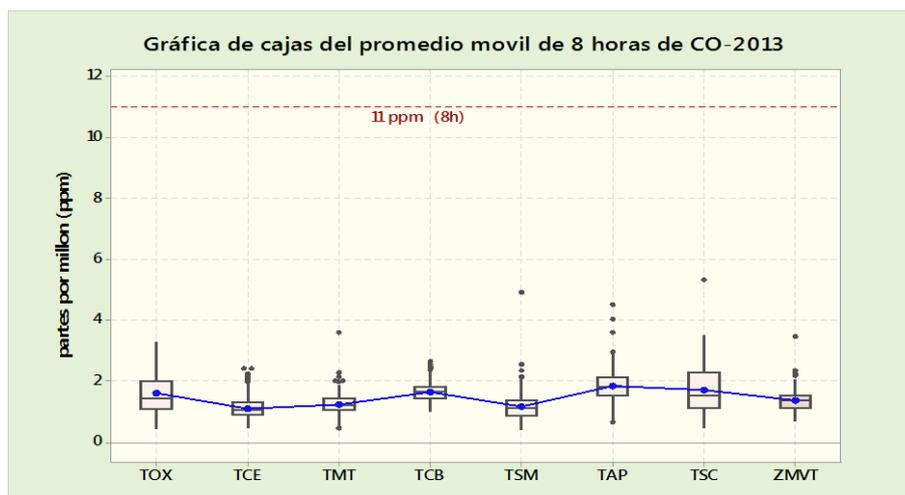


Figura 3.23 Diagramas de Cajas del promedio móvil de 8 horas de CO -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

En la gráfica 3.24 se presenta el comportamiento de los valores atípicos de CO a lo largo del día, en la que se puede ver en la grafica que la mayor frecuencia de valores atípicos se presentan entre las 6h00 a 11h00, con un máximo de concentraciones altas entre las 8h00 a 9h00; en todas las estaciones, con lo que se puede decir que en ese horario la presencia de CO en el aire es alta, este comportamiento de las concentraciones de CO es causado por el tráfico vehicular que se presenta en las horas de movilidad y circulación vehicular.

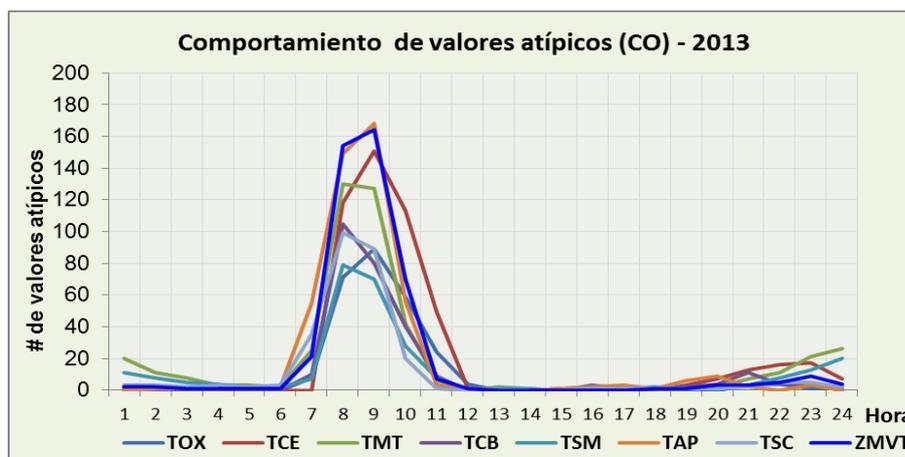


Figura 3.24 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de CO -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013



Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

En la gráfica 3.25 se presentan a través de un diagrama de cajas las concentraciones promedio horaria de NO₂ registradas en el año 2013 en cada una de las estaciones de monitoreo. Se puede ver que las estaciones con registros de concentraciones altas de NO₂ son las estaciones de Toluca Centro y Aeropuerto, estando todas las concentraciones registradas muy debajo del límite máximo establecido en la NOM-023 de 0,21ppm para el promedio de 1 hora. Todas las estaciones de monitoreo presentan valores atípicos o concentraciones altas que sobrepasan el límite superior del bigote correspondiente a las concentraciones de NO₂ registradas.

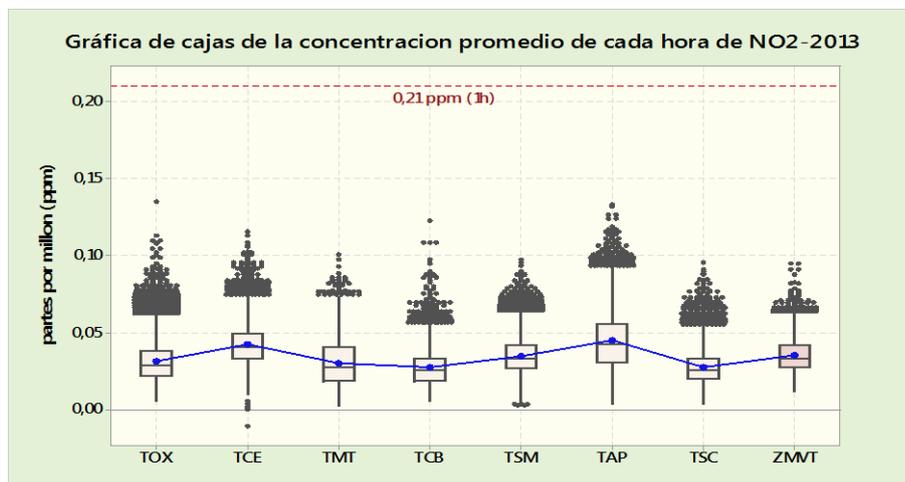


Figura 3.25 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de NO₂ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

En la gráfica 3.26 se presenta el comportamiento de los valores atípicos de NO₂ en cada hora del día, en la gráfica se puede ver que la mayor frecuencia de valores atípicos se presentan entre las 8h00 a 12h00, con un máximo de concentraciones altas a las 10h00, en todas las estaciones; con lo que se puede decir que a esa hora la concentración de NO₂ en el aire es alta en todas las estaciones de monitoreo. Este comportamiento de las concentraciones de NO₂ es causado por el tráfico vehicular característico de la ZMVT.

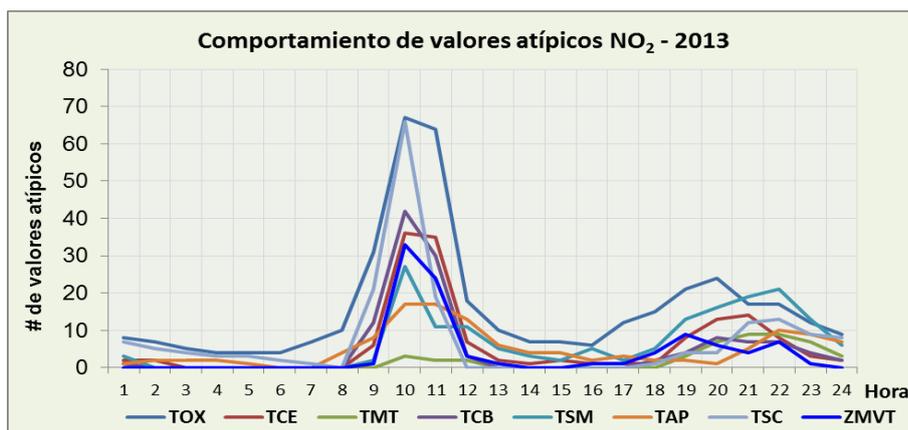


Figura 3.26 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de NO₂ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

Dióxido de Azufre (SO₂).

En la gráfica 3.27 se presentan a través de diagramas de cajas las concentraciones promedio horaria de SO₂ registradas en el año 2013 en cada una de las estaciones de monitoreo. Se puede ver que la estación con registros de concentraciones altas de SO₂ es la estación del Aeropuerto, estando todas las concentraciones registradas muy por debajo del límite máximo establecido en la NOM-022 de 0.11ppm para el promedio de 24 horas y 0,08 ppm para el promedio móvil de 8 horas, el comportamiento de los promedios móviles de 8 horas calculados se presentan en la gráfica 3.28.

Todas las estaciones de monitoreo presentan un número elevado de valores atípicos o concentraciones por fuera del límite superior del bigote de las mediciones horarias, siendo la estación de Metepec la que presenta un 8,98% de valores atípicos o concentraciones altas que sobrepasan el límite superior del bigote correspondiente al total de las concentraciones de NO₂ registradas por la RAMA-ZMVT.

En la gráfica 3.29 se presenta el comportamiento de los valores atípicos de SO₂ en cada hora del día, en la gráfica se puede ver que la mayor frecuencia de valores atípicos se presentan entre las 7h00 a 12h00, con un máximo de concentraciones altas a las 09h00, en todas las estaciones; con lo que se puede decir que a esa hora la concentración de SO₂ en el aire es alta en todas las estaciones de monitoreo, este comportamiento de las concentraciones de SO₂ es causado por el tráfico vehicular característico de la ZMVT.

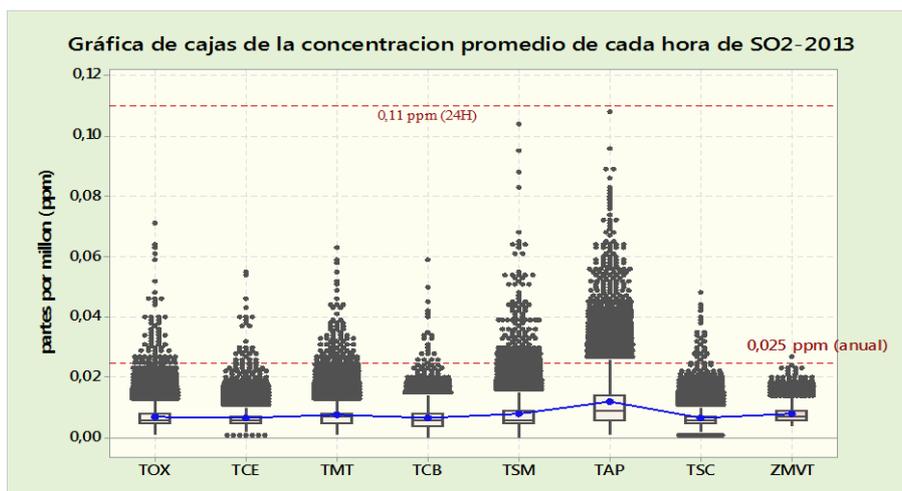


Figura 3.27 Diagramas de Cajas de las concentraciones promedio horaria de SO₂ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

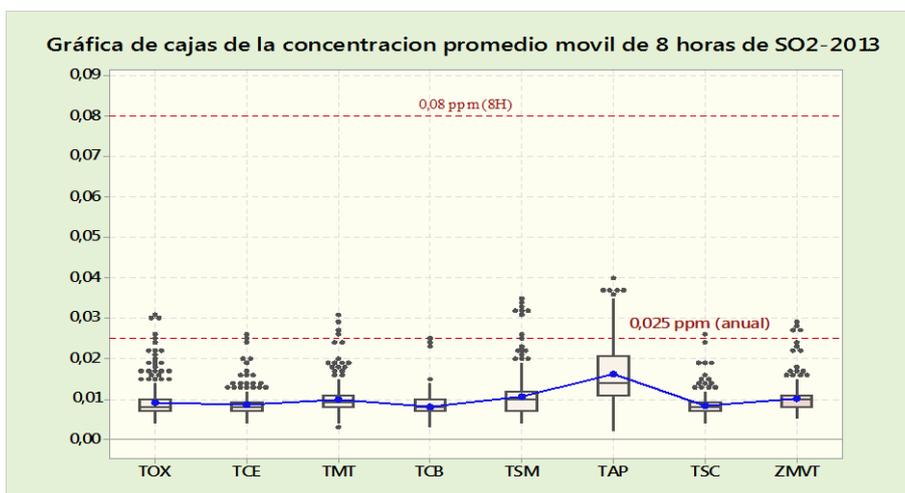


Figura 3.28 Diagramas de Cajas del promedio móvil de 8 horas de SO₂ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013

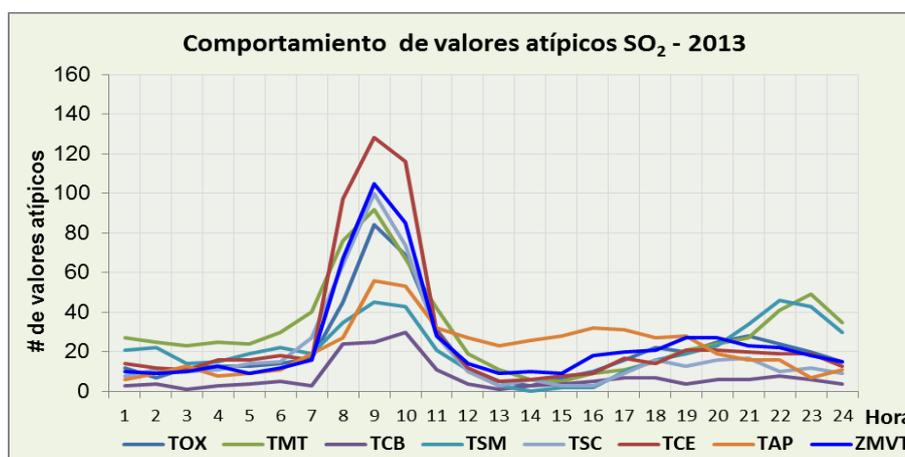


Figura 3.29 Comportamiento de los valores atípicos de las concentraciones de SO₂ -2013

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RAMA-ZMVT 2013



3.4. Problemática con el contaminante de mayor presencia en la ZMVT.

Partículas menores a 10 micrones (PM₁₀).

En la ZMVT se presenta un grave problema con las partículas menores a 10 micrómetros, debido a que desde el año 2002 hasta el 2013, que se cuenta con datos disponibles, se ha violado el valor máximo permisible de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el promedio de concentración anual obtenido, tal como se indica en la figura 3.1.

El ozono es otro de los contaminantes monitoreados en la ZMVT, que ha presentado cierto nivel de incremento en el promedio anual de concentración, pero sin llegar a sobrepasar el valor máximo permitido en la NOM.

La tendencia de los promedios anuales de concentración de PM₁₀, es creciente a partir del año 2001 con un valor promedio anual de la 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ZMVT, sin violar la NOM-025 anual. Esta tendencia se presenta hasta el 2005, en este año todas las estaciones tienen los promedios anuales por encima de los 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo cual un promedio anual de concentración en la ZMVT de 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir del 2006 las concentraciones de PM₁₀ tienden a disminuir ligeramente hasta el año 2009, año en el que presenta una concentración promedio anual de 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En los siguientes años se presenta nuevamente una tendencia creciente en los años 2010 y 2011 que registran promedios de 67 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, esta tendencia creciente se convierte en decreciente para los años 2012 y 2013 con promedios anuales de 73 y 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo que nos conlleva a decir que a partir del año 2002 se está sobrepasando los límites establecidos en la NOM-025 para el promedio anual de concentración de PM₁₀ (figura 3.7).

Para el caso de los promedios de 24 horas de PM₁₀ se puede decir que las concentraciones altas se presentan en la temporada seca-fría y seca caliente entre los meses de noviembre a mayo; y que las concentraciones bajas se presentan en la temporada de lluvias, esto es debido a que la concentración de PM₁₀ en la atmósfera es proporcional con el nivel de lluvias o humedad relativa. Este comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ en la atmósfera es el mismo comportamiento para todo los años (figura 3.2 / 3.3).



Con la presentación de los promedios horarios de concentración de PM_{10} registrados en cada estación en el año 2013, a través de un diagrama de cajas se fundamenta para decir que la estación de San Cristóbal es la que presenta un grave problema con este contaminante ya que el 75% de las mediciones de todo el año son superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y aproximadamente el 25% del total de las mediciones con valores superiores a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 3.17) con lo cual se puede establecer que en años anteriores hasta el 2003, los datos presentan un comportamiento similar, ya que los promedios anuales son incluso superiores al obtenido en el 2013 (figura 3.1). A su vez con el uso de esta gráfica se determinan los valores atípicos, que representados en una gráfica de comportamiento (figura 3.18), se puede ver que las concentraciones altas de PM_{10} en la ZMVT se presentan a las 10h00 y a las 18h00.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se presentó el comportamiento de las concentraciones promedio de cada hora, de 8 horas, de 24 horas, mensual y anual; de cada uno de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), estos contaminantes son: partículas menores a 10 micrones (PM_{10}), Ozono (O_3), Bióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Bióxido de Azufre (SO_2). Con base en los resultados de los análisis realizados a las bases de datos de monitoreo ambiental entre los años 2000 al 2013, se puede decir que los años con un mayor índice de contaminación atmosférica se presentaron entre el 2005 al 2007, ya que la tendencia y comportamiento de las concentraciones promedio de los contaminantes criterio entre estos años presentaron concentraciones altas en comparación de los años anteriores y de los años posteriores, determinando que han sido los años más críticos en los niveles de contaminación del aire de la ZMVT.

Las partículas menores a 10 micrones (PM_{10}), es el contaminante que registra concentraciones promedio horarias con valores en ciertas ocasiones superiores a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrando los valores máximos en la mañana entre las 09H00 a 10H00 y en la tarde entre 17H00 a 19H00, estos valores registrados influyen a que el promedio de 24 horas sea un valor superior al límite máximo diario permitido por la NOM-025, es por esto que a lo largo de un año continuo de monitoreo, los promedio diarios de PM_{10} sobrepasan el valor máximo permitido de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo en un mayor número



de veces en las épocas seca-fría y seca-cálida. Para los promedios anuales de concentración de PM_{10} obtenidos a partir de la base de datos del periodo de estudio como se puede ver en la figura 3.1, se sobrepasa el valor máximo anual permitido de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a partir del año 2002 con un promedio de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, después del 2002, la tendencia de la concentración anual de PM_{10} incrementa hasta alcanzar un valor máximo de concentración anual de $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2005, sobrepasando el valor máximo anual desde el año 2002 hasta el 2013, y siendo la estación de monitoreo de San Cristóbal la que registra los valores más altos de concentración de PM_{10} desde el año 2001 hasta el año 2013, que se tiene la información disponible.

El Ozono (O_3) ha mantenido un comportamiento homogéneo de los promedios de concentración anual entre los años de estudio, ya que en promedio presenta un valor anual de 0,027 ppm para la mayoría de los años; las concentraciones de O_3 presentan un ligero incremento en el año 2006, entre el año 2011 al 2013 (ver figura 3.7) en la que se puede ver que se presenta una disminución de las concentraciones de O_3 . El comportamiento de los promedios mensuales de concentración de O_3 , indican que se registran concentraciones altas de O_3 es la época seca-caliente, especialmente en el mes de mayo. Las concentraciones horarias que se registran en cada una de las estaciones de monitoreo ambiental de la ZMVT, en muy pocas veces sobrepasan el límite máximo horario de 0.11 ppm (ver figura 3.20), presentándose concentraciones altas de O_3 entre las 14h00 a 15h00 (ver figura 3.21); con el límite para el promedio móvil de 8 horas no se han registrado promedios que sobrepasen los límites establecidos en la NOM-020.

Para el caso de las concentraciones de CO , NO_2 y SO_2 luego de los análisis realizados, se observa que en la ZMVT las concentraciones promedio horario, 8 horas, diario, mensual y anual se han mantenido muy por debajo de los límites que establecen su respectiva NOMs para cada contaminante, estos límites se han mantenido en todos los años del periodo de estudio.

Por lo que se puede decir que en la ZMVT las PM_{10} son el principal problema de contaminación atmosférica, debido a que no se cumplen con los límites de la norma NOM-025.



CAPÍTULO 4.

MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA PREDECIR EL PROMEDIO DIARIO DE CONCENTRACIÓN DE PM10 EN LA ZMVT, CON BASE EN LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

4.1. Introducción

La información de la red automática de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se utiliza para modelar las concentraciones promedio de 24 horas (promedio diario) de las partículas menores a 10 micrones (PM₁₀), mediante un modelo de regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diaria del contaminante PM₁₀. Se presentan dos modelos que se pueden utilizar para cualquier estación de monitoreo de la ZMVT. Los modelos propuestos utilizan información real de la concentración de PM₁₀ y de las variables meteorológicas monitoreadas por la RAMA-ZMVT. Estos datos sirven para predecir la concentración promedio diaria de PM₁₀, que se ha reportado como un contaminante de riesgo para la región.

4.2. Presentación grafica de la correlación obtenida

Para presentar la correlación que tienen las variables meteorológicas y sus interacciones con los datos de PM₁₀, se extrajeron los valores de correlación de las variables con el promedio diario de PM₁₀ (Anexo 2.4). En la figura 4.1 se presentan las correlaciones obtenidas para PM₁₀ con las otras variables.

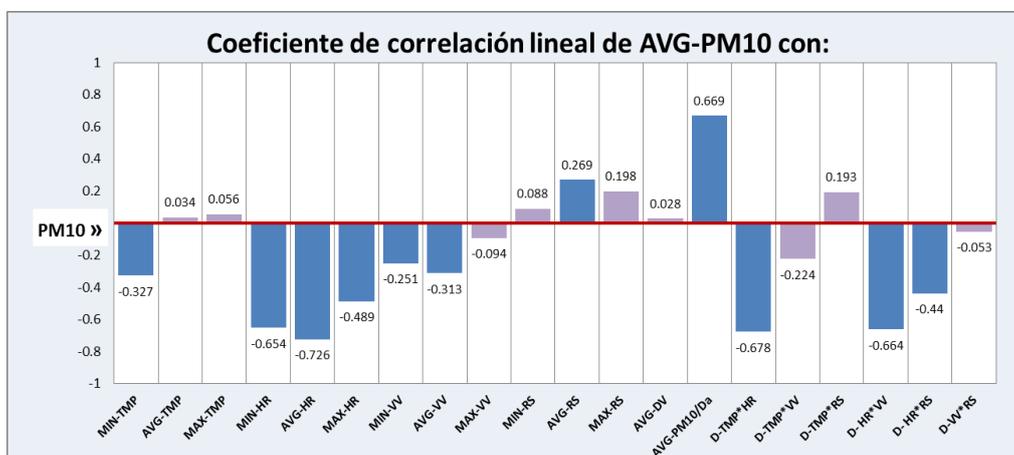


Figura 4.1 Coeficiente de correlación de AVG-PM10 con las variables meteorológicas e interacciones.

Elaboración propia con base en los datos de la RAMA-ZMVT 2011



En la gráfica 4.1 se puede ver claramente que las variables que mejor explican la variabilidad de las concentraciones diarias de PM_{10} son: los valores mínimos de temperatura ambiente (TMP); los valores mínimos, los promedios y los máximos valores diarios de humedad relativa (HR); los valores mínimos y los promedios de la velocidad del viento; los promedios diarios de radiación solar (RS); la concentración de PM_{10} del día anterior (AVG- PM_{10}/Da); la interacción entre TMP y HR, HR y VV, Hr y VV. Todas estas variables mencionadas se utilizaron para ser ingresadas en el programa estadístico de Minitab como las variables predictoras y como variable de respuesta se usó el promedio diario de PM_{10} .

4.3. MODELO 1:

4.3.1. Selección de las variables que se van a utilizar en los modelos de predicción

Para definir las variables que se van a ser las definitivas en el modelo de regresión se realiza la selección de los mejores subconjuntos de variables que es una herramienta de Minitab. Una vez que se ha generado los mejores subconjuntos de variables, se busca el mejor subconjunto de variables con base en el valor más alto de R^2 ajustado. Se selecciona como criterio el mayor valor de R^2 ajustado porque el valor no tiene que crecer al introducir nuevas variables regresoras y con un menor índice de Cp de Mallows. Se selecciona el menor valor del Cp de Mallows porque se define como el menor error cuadrático medio de predicción para los puntos observados cuando se utiliza un modelo con varios parámetros o variables regresoras. (Fernández, Junio, 2006)

En el anexo 4.1 se presenta el proceso realizado en Minitab, en el cual se seleccionan las variables regresoras que son consideradas en los modelos de predicción. Al establecer las variables se genera la regresión para obtener los valores de los coeficientes para cada una de las variables regresoras y a su vez eliminar las variables regresoras que presentan un valor del p-value superior al alfa establecido, en este caso de estudio el valor de alfa utilizado fue del 5%.



4.3.2. Presentación de los resultados del modelo 1

- Ecuación matemática del modelo 1.

AVG-PM10 =

$$57,2 - 9,188(AVG.VV) - 0,0279(TMP * HR) + 0,00174(TMP * RS) + 0,687(AVG.PM_{10}/Da) \quad (4.9)$$

De donde:

AVG.VV = promedio diario de los valores registrados de la velocidad del viento

TMT*HR = interacción entre los valores diarios de la temperatura ambiente y la humedad relativa

TMT*RS = interacción entre los valores diarios de la temperatura ambiente y la radiación solar

AVG.PM₁₀/Da = promedio diario de PM₁₀ del día anterior

- Resumen del modelo de predicción

El modelo de predicción presenta un valor de R² de 83.6%, un valor de R² ajustado de 83,4%.

4.4. MODELO 2:

4.4.1. Identificación de los días de la semana correspondientes a cada día del año, para calcular el promedio de concentración referente a cada día de la semana durante todo el año.

En la tabla 4.1 se presentan los promedios de concentración para cada día de la semana del total de los días del año 2011.

Promedio de AVG D - PM 10	
Día	Total
domingo	69
lunes	78
martes	82
miércoles	85
jueves	85
viernes	82
sábado	83

Tabla 4.1 Promedios diarios de la concentración de PM₁₀.

Elaboración propia –Datos RAMA-ZMVT 2011

Claramente se puede ver que los promedios más bajos se presentan los días domingo y lunes, lo cual nos permite no considerar los promedios diarios registrados en estos días. Por lo cual para un siguiente modelo de predicción se trabajará con los promedios diarios de los días martes, miércoles, jueves, viernes y sábado ya que



estos son los días de la semana con los promedios altos. Debido a que la concentración del día anterior de PM_{10} repercute mucho en la concentración del día actual, se decide no considerar los días domingo y lunes, para la generación del nuevo modelo.

El procedimiento a seguir para generar el nuevo modelo es el mismo que se describió en los pasos anteriores.

4.4.2. Presentación de la ecuación del modelo 2

- Ecuación matemática del modelo 2

AVG- PM_{10} =

$$75,9 - 0,391(AVG.HR) - 0,57(MIN.HR) + 0,0139(VV * RS) + 0,586(AVG.PM_{10}/Da) \quad (4.10)$$

De donde:

AVG.HR = promedio diario de los valores registrados de humedad relativa

MIN*HR = valores mínimos diarios de humedad relativa

VV*RS = interacción entre los valores diarios de la velocidad del viento y la radiación solar

AVG. PM_{10}/Da = promedio diario de PM_{10} del día anterior

- Resumen del modelo de predicción

El modelo de predicción presenta un valor de R^2 de 90.2 % y un valor de R^2 ajustado de 90.0 %.

4.5. Evaluación de los modelos de predicción con el uso de la medición de los errores (MAE, MSE y MAPE).

En la tabla 4.2 se presentan los resultados de los indicadores que se utilizan para verificar la efectividad de las predicciones, al ejecutar los modelos de regresión lineal multivariante para realizar las predicciones de los valores de las concentraciones promedio diario de PM_{10} en la ZMVT.

Se puede ver claramente que los valores de predicción con el MP2 son más valores más cercanos a las concentraciones reales en comparación del MP1; esto debido a que los valores del MAE, MSE y MAPE presentan una diferencia muy distante frente a los valores obtenidos del MP2. Por lo cual se puede decir que en caso realizar la predicción de la concentración diaria de PM_{10} se debería efectuar con el MP 2.



Evaluación de los modelos de predicciones				
Año	Modelo	MAE	MSE	MAPE
2011	1	47	2860	87
	2	14	386	20
	Dif	33	2474	67
2012	1	35	1418	73
	2	14	287	24
	Dif	21	1131	49
2013	1	35	1403	77
	2	11	194	20
	Dif	24	1209	57

Tabla 4.2 Resultados de la evaluación de los modelos de predicción.

Fuente: Elaboración propia

4.6. Resultados

Los datos que se utilizan para predecir el promedio diario de concentración de PM_{10} en la ZMVT serán los valores de las variables meteorológicas que pueden ser obtenidos con certeza ya que cada variable meteorológica tienen sus modelos estandarizados de predicción, que emiten diariamente los posibles valores mínimos, promedios y máximos de las variables meteorológicas como la HR, la TMP, la RS y la VV, que estamos utilizando para predecir la concentración promedio diaria de PM_{10} .

En la figura 4.2 se presenta el resumen de los modelos de regresión lineal multivariante, a su vez se puede decir que en los dos modelos es muy importante conocer la concentración promedio del día anterior de PM_{10} , ya que en cada caso hay una correlación positiva es decir si la concentración de PM_{10} del día anterior es alta, muy posiblemente el valor de la predicción sea también alta, así también los valores de la HR, la VV presentan una correlación negativa es decir en caso de que aumenten estos valores, la concentración de PM_{10} disminuirá.



			Modelo 1: (Promedio Diario de todos los días)		
Variables	Mod 1	Mod 2	$AVG-PM_{10} =$ $57.2 - 9.188 (AVG-VV) - 0.0279 (TMP*HR)$ $+ 0.00174 (TMP*RS) + 0.687 (AVG-PM_{10}/D_a)$		Resumen del modelo R-cuad. = 83.6% R-cuad. (ajustado) = 83.4% R-cuad. (pred) = 83.13%
•AVG-HR		✓			
•MIN-HR		✓			
•AVG-VV	✓				
•TMP*HR	✓				
•TMP*RS	✓				
•VV*RS		✓			
•PM ₁₀ (d-1)	✓	✓			
			Modelo 2: (Excluyendo domingo y lunes)		
Variables	Mod 1	Mod 2	$AVG-PM_{10} =$ $75.9 - 0.391 (AVG-HR) - 0.57 (MIN-HR)$ $- 0.0139 (VV*RS) + 0.586 (AVG-PM_{10}/D_a)$		Resumen del modelo: R-cuad. = 90.2% R-cuad. (ajustado) = 90.0% R-cuad. (pred) = 89.74%

Figura 4.2 Resumen de los modelos de predicción de AVG-PM₁₀ -2011.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3 se presentan las curvas de ajuste de los valores obtenidos con los modelos de predicción frente a los valores reales de la concentración promedio diaria de PM₁₀ para el 2011. En estas gráficas se puede ver claramente que el modelo con la curva con mayor ajuste a los datos reales, es el MP 2. Todos los datos presentan el comportamiento de los datos a lo largo de los días del año también se incluye el valor máximo permitido en la NOM-025 para el promedio diario de PM₁₀. Las curvas de ajuste para los años 2012 y 2013 se pueden ver en el Anexo 4.3.

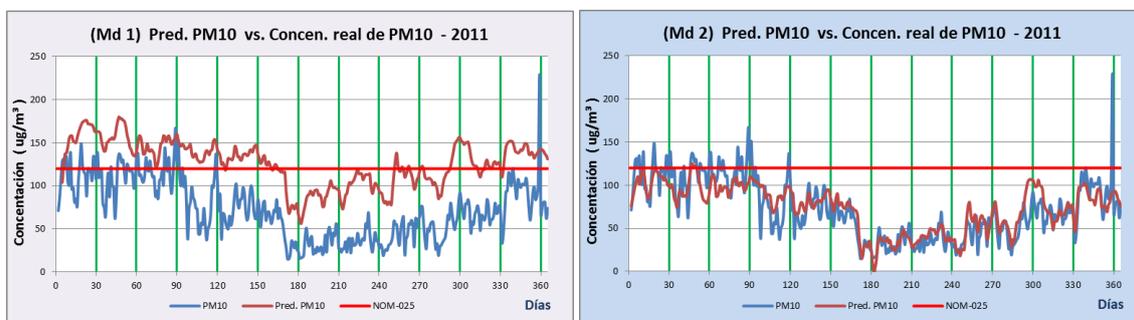


Figura 4.3 Curvas de ajuste de los modelos de predicción.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos RAMA-ZMVT 2011

4.7. Conclusión

Los modelos de predicción de la concentración promedio diaria de PM₁₀ u otros contaminantes son muy importantes para las zonas geográficas implicadas, ya que al poder predecir la concentración de algún contaminante se pueden tomar medidas de acción inmediatas o empezar a trabajar en planes de acción para evitar que la población se exponga directamente a altas concentraciones de los contaminantes que



se pueden predecir, siendo nuestro caso el modelo 2 de regresión lineal multivariante nos permiten saber con un 90% de seguridad el valor de la concentración diaria al tener la información necesaria para ejecutar el modelo; permitiendo informar a la población el valor promedio de concentración de PM_{10} que se tendría al siguiente día.

En este trabajo de investigación se realizó un modelo de regresión lineal multivariante debido a que los datos y variables meteorológicas presentan valores muy altos de correlación lineal, permitiendo predecir con un alto grado de confiabilidad la concentración promedio diaria de PM_{10} en la ZMVT, solamente al utilizar variables meteorológicas y la concentración promedio diaria del día anterior de PM_{10} .

Con base en los resultados obtenidos de la evaluación de los dos modelos propuestos de regresión lineal multivariante, se obtiene que el mejor modelo con el que se podría predecir la concentración promedio diaria de PM_{10} , es el modelo 2 debido a que los tres indicadores utilizados (Tabla 4.2) para evaluar los modelos propuestos presentan valores notablemente inferiores al otro modelo propuesto y el criterio de selección del mejor modelo es que estos valores sean lo más pequeños posibles.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en esta tesis, le permitirán a la autoridad ambiental evaluar la efectividad de las políticas de calidad del aire implementadas en la ciudad y también servirán como punto de partida para la implementación de nuevas estrategias con respecto a la reducción de los contaminantes con mayor incidencia en la región.

5.1. Conclusiones

En la ZMVT como otras grandes urbes presentan la problemática de contaminación atmosférica. Actualmente la ZMVT tiene una población de 2'166 024 millones de habitantes; lo que le convierte en la quinta Metrópoli con mayor población en México. Así mismo la ZMVT presenta un aumento considerable de vehículos automotores, siendo estos la principal fuente de emisión de gases contaminantes.

En el capítulo 3 se presentó el comportamiento de las concentraciones promedio de cada hora, de 8 horas, de 24 horas, mensual y anual; de cada uno de los contaminantes atmosféricos monitoreados en la ZMVT.

Las partículas menores a 10 micrones (PM_{10}), es el contaminante que registra concentraciones promedio horarias con valores en ciertas ocasiones superiores a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrando los valores máximos en la mañana entre las 09H00 a 10H00 y en la tarde entre 17H00 a 19H00, estos valores registrados influyen a que el promedio de 24 horas sea un valor superior al límite máximo diario permitido por la NOM-025, es por esto que a lo largo de un año continuo de monitoreo, los promedios diarios de PM_{10} sobrepasan el valor máximo permitido de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo en un mayor número de veces en las épocas seca-fría y seca-cálida. Para los promedios anuales de concentración de PM_{10} obtenidos a partir de la base de datos del periodo de estudio como se puede ver en la figura 3.1, se sobrepasa el valor máximo anual permitido de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a partir del año 2002 con un promedio de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, después del 2002, la tendencia de la concentración anual de PM_{10} incrementa hasta alcanzar un valor máximo de concentración anual de $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2005, sobrepasando el valor máximo anual desde el año 2002 hasta el 2013, y siendo la estación de



monitoreo de San Cristóbal la que registra los valores más altos de concentración de PM_{10} desde el año 2001 hasta el año 2013, que se tiene la información disponible.

El Ozono (O_3) ha mantenido un comportamiento homogéneo de los promedios de concentración anual entre los años de estudio, ya que en promedio presenta un valor anual de 0,027 ppm para la mayoría de los años; las concentraciones de O_3 presentan un ligero incremento en el año 2006, entre el año 2011 al 2013 (ver figura 3.7) en la que se puede ver que se presenta una disminución de las concentraciones de O_3 . El comportamiento de los promedios mensuales de concentración de O_3 , indican que se registran concentraciones altas de O_3 es la época seca-caliente, especialmente en el mes de mayo. Las concentraciones horarias que se registran en cada una de las estaciones de monitoreo ambiental de la ZMVT, en muy pocas veces sobrepasan el límite máximo horario de 0.11 ppm (ver figura 3.20), presentándose concentraciones altas de O_3 entre las 14h00 a 15h00 (ver figura 3.21); con el límite para el promedio móvil de 8 horas no se han registrado promedios que sobrepasen los límites establecidos en la NOM-020.

Para el caso de las concentraciones de CO , NO_2 y SO_2 luego de los análisis realizados, se observa que en la ZMVT las concentraciones promedio horario, 8 horas, diario, mensual y anual se han mantenido muy por debajo de los límites que establecen su respectiva NOMs para cada contaminante, estos límites se han mantenido en todos los años del periodo de estudio.

Con base en los resultados de los análisis realizados a las bases de datos de monitoreo ambiental entre los años 2000 al 2013, se puede decir que los años con un mayor índice de contaminación atmosférica se presentaron entre el 2005 al 2007, ya que la tendencia y comportamiento de las concentraciones promedio de los contaminantes criterio entre estos años presentaron concentraciones altas en comparación de los años anteriores y de los años posteriores, determinando que han sido los años más críticos en los niveles de contaminación del aire de la ZMVT. Por lo que se puede decir que en la ZMVT las PM_{10} son el principal problema de contaminación atmosférica, debido a que no se cumplen con los límites de la norma NOM-025.



En el capítulo 4 se desarrolló los modelos de predicción de la concentración promedio diaria de PM_{10} que son muy importantes para las zonas geográficas implicadas, ya que al poder predecir la concentración del contaminante se pueden tomar medidas de acción inmediatas o empezar a trabajar en planes de acción para evitar que la población se exponga directamente a altas concentraciones de los contaminantes que se pueden predecir, siendo nuestro caso el modelo 2 de regresión lineal multivariante que nos permiten saber con un 90% de seguridad el valor de la concentración diaria al tener la información necesaria para ejecutar el modelo; permitiendo informar a la población el valor promedio de concentración de PM_{10} que se tendría al siguiente día.

El modelo propuesto de regresión lineal multivariante, se utilizaron los datos del año 2011. Se realizó una modelación de las variables para generar una regresión lineal multivariante para predecir la concentración promedio diario de PM_{10} utilizando la concentración de PM_{10} del día anterior, las variables meteorológicas y la interacción entre estas; a su vez se encontró los valores de correlación lineal entre todas las variables, siendo la correlación de interés la que presente un valor mayor a 0,25 y un menor a -0,25 del valor de correlación lineal entre la concentración promedio diario de PM_{10} con todas las otras variables implicadas en el cuadro de las posibles variables a ser consideradas para generar el modelo de regresión lineal multivariante.



5.2. Recomendaciones

Debido a que la contaminación atmosférica en el Ecuador, en México y en la mayoría de otros países es generada principalmente por la flota vehicular, siendo el mayor responsable de las emisiones de los principales contaminantes del aire y por lo tanto de enfermedades respiratorias en la población, es evidente la necesidad de buscar combustibles ecológicos o mejorar la calidad de los combustibles ya existentes; para que vehículos de mayor tecnología puedan circular y funcionar adecuadamente y de esta manera empezar a reducir el grado de emisiones de contaminantes al aire y ayudar con la salud de nuestro planeta.

En vista que la contaminación del aire se agrava continuamente, en ciudades y países con alto índice de flota vehicular, industrias y fuentes naturales de contaminación atmosférica; es recomendable empezar o continuar con el desarrollo de un inventario de emisiones a través del monitoreo y seguimiento continuo del comportamiento de los contaminantes presentes en el aire; ya que la calidad del aire, está directamente relacionada con la salud de la población.

En el Ecuador se encuentra vigente el Plan Nacional de Calidad del Aire (PNCA), que surge con el fin de cumplir con la Constitución de la República del Ecuador, la cual establece que el Estado protegerá el derecho de la población a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice un desarrollo sostenible; la gestión ambiental de la calidad del aire en el país presenta profundas falencias tales como: la falta de seguimiento de convenios suscritos, dispersión legislativa, dispersión de jurisdicción y competencias, debilidad institucional y presupuestaria del Ministerio del Ambiente (MAE).

A su vez al tener la información necesaria de la concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados se puede generar diversos tipos de investigaciones relacionados con la calidad del aire, evaluar la eficacia de los programas y normas de mejoramiento de la calidad del aire, y a su vez realizar la debida planificación para reducir la concentración de gases y partículas contaminantes presentes en el aire.



5.3. Referencias bibliográficas

Ballester, F. (03 de Marzo 2005). Contaminación Atmosférica, cambio climático y salud. Unidad de Epidemiología y Estadística-Revista Española de Salud, 159-175.

Cortina Januchs, M. G. (2012). APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL A LA PREDICCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. Salamanca-México.

EPA. (05 de Junio 2015). Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/air/urbanair/>

EPA. (20 de Septiembre 2013). Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/climatechange/ccs/>

Fernández, J. M. (Junio, 2006). Modelos Estadísticos Aplicados. Publicaciones de la UDC, monografía 101.

GEMa. (10 de Junio 2005). Gobierno del Estado de México. Obtenido de Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano: http://portal2.edomex.gob.mx/sedur/planes_de_desarrollo/planes_regionales/valle_de_toluca/index.htm

Gobierno del Estado de México, Secretaria del Medio Ambiente, & Programa para mejorar la calidad del aire. (2012). Proaire del Valle de Toluca. México-Toluca.

Hanke, J. E., W Wichern, D., Mues Zepeda, A., & Guerrero Ushakova, E. (2006). Pronósticos en los Negocios. En J. E. Hanke, D. W Wichern, A. M. Mues Zepeda, & E. Guerrero Ushakova, Pronósticos en los Negocios. México: Pearson Educación.

INECC, I. N. (07 de Mayo 2015). SEMARNAT. Obtenido de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://www.inecc.gob.mx/dica/556-calaire-metodologia>

INECC, M. (05 de Julio 2013). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www.inecc.gob.mx/dica/556-calaire-metodologia>

Instituto Nacional de Ecología. (20 de Octubre 2014). Obtenido de Instituto Nacional de Ecología. Sistema nacional de información de la calidad del aire.: <http://sinaica.ine.gob.mx/>

Ministerio del Ambiente. (2010). Plan Nacional de la Calidad de Aire. Quito: MAE.

Nations United. (20 de Mayo 2012). United Nations Framework Convention on Climate Change. Obtenido de La puerta Climática de Doha: http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_puerta_climatica_de_doha/it_ems/7477.php



Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM 020 SSA1 - Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 30 de octubre de 2002. Criterio para evaluar el límite permisible para la concentración de ozono descargado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM 021 SSA1 - Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 23 de diciembre de 1994. Criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al monóxido de carbono descargado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM 022 SSA1 - Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 8 de septiembre de 2010. Criterio para evaluar el límite permisible para la concentración de dióxido de azufre descargado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM 023 SSA1 - Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 23 de diciembre de 1994. Criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al dióxido de nitrógeno descargado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM 025 SSA1 - Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 26 de septiembre de 2005. Criterio para evaluar el límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 descargado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomsa.html>

NOM-034-SEMARNAT. (1993). Norma Oficial Mexicana que establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. México.

NOM-035-SEMARNAT. (1993). Norma Oficial Mexicana, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. México.

NOM-036-SEMARNAT. (1993). Norma Oficial Mexicana, que establece los Métodos de medición de concentración de Ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. México.

NOM-037-SEMARNAT. (1993). Norma Oficial Mexicana, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. México.

NOM-038-SEMARNAT. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-038-SEMARNAT-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de



bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. México.

OMS. (12 de Noviembre 2014). Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/indoor-air-pollution/es/>

OMS. (20 de Marzo 2014). Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Proaire (Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca) 2012-2017.pdf. (s. f.), descargado de: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>

RAMA-ZMVT. (10 de Julio 2011). Gobierno del Estado de México. Obtenido de Red automática de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca: http://portal2.edomex.gob.mx/rama/contaminacion_atmosferica/index.htm

Riojas Rodríguez, H., Schilman, A., López Carrillo, L., & Finkelman, J. (2013). La salud ambiental en México. Situación actual y perspectivas futuras. México.

Sans, F. R. (1989). Ingeniería Ambiental: Contaminación y Tratamientos. Barcelona, España: MARCOMBO.

Secretaria del Ambiente, (7 de Abril 2015). Gobierno del Estado de México. Obtenido de http://portal2.edomex.gob.mx/sma/cuida_medioambiente/publicaciones_sma/aire_limpio_toluca/index.htm

Secretaria del Medio Ambiente, G. d. (2012). Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca (2012-2017). México.

Secretaria del Medio Ambiente. (2004). Inventario de Emisiones ZMVT. Toluca.
Secretaria del Medio Ambiente. (7 de Abril de 2015). Gobierno del Estado de México. Obtenido de http://portal2.edomex.gob.mx/sma/cuida_medioambiente/publicaciones_sma/aire_limpio_toluca/index.htm

SEMARNAT. (05 de Julio 2013). Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>

Troposfera. (Abril, 2015). Troposfera portal temático de contaminación atmosférica. Obtenido de <http://www.troposfera.org/conceptos/calidad-aire/>



5.4. ANEXOS

Anexo 2.1

En las siguientes graficas se muestra las carpetas de archivos que son las base de datos de monitoreo ambiental, de las concentraciones registradas de cada uno de los contaminantes criterio, que son monitoreados constantemente hora a hora en la ZMVT.

Carpetas de archivos de las bases de datos del periodo de estudio.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
BDH_2000	25/12/2014 16:58	Carpeta de archivos
BDH_2001	25/12/2014 16:58	Carpeta de archivos
BDH_2002	25/12/2014 16:58	Carpeta de archivos
BDH_2003	25/12/2014 16:58	Carpeta de archivos
BDH_2004	25/12/2014 16:58	Carpeta de archivos
BDH_2005	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2006	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2007	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2008	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2009	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2010	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2011	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2012	25/12/2014 16:59	Carpeta de archivos
BDH_2013	25/12/2014 17:00	Carpeta de archivos

Fuente: RAMA-ZMVT

Contenido de la carpeta de archivos del año 2000

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
BDH_CO_2000	17/04/2013 18:48	Hoja de cálculo d...
BDH_DV_2000	10/04/2013 14:25	Hoja de cálculo d...
BDH_HR_2000	18/04/2013 11:47	Hoja de cálculo d...
BDH_NO2_2000	17/04/2013 18:52	Hoja de cálculo d...
BDH_O3_2000	10/07/2013 18:40	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2000	25/02/2015 13:16	Hoja de cálculo d...
BDH_RS_2000	17/04/2013 17:19	Hoja de cálculo d...
BDH_SO2_2000	17/04/2013 18:58	Hoja de cálculo d...
BDH_TMP_2000	18/04/2013 12:45	Hoja de cálculo d...
BDH_VV_2000	11/04/2013 11:08	Hoja de cálculo d...

Fuente: RAMA-ZMVT

El reordenamiento de las hojas de cálculo de las bases de datos en el periodo de estudio, se realizó manualmente, con la finalidad de una rápida identificación de la ubicación de los archivos necesarios para realizar el análisis estadístico de cada uno de los contaminantes criterio. Lo que se hizo fue generar una carpeta de archivos con el nombre de DBH seguido del CC o la variable meteorológica y al final se indica el



periodo de estudio (2000 – 2013), es decir se agrupó en una carpeta la información correspondiente de un CC o variable meteorológica a partir de los años de estudio y monitorización ambiental de los cuales se tienen datos (Figura 3.3). Cada carpeta de archivos contiene la información de cada año de monitorización de cada elemento; un ejemplo, es la carpeta DBH-PM10 2000-2013, esta carpeta tiene los registros de PM10 medido en las 7 estaciones (Figura 3.4).

Carpeta de archivos reordenadas y agrupadas

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
DBH DV 2000-2013	25/12/2014 17:16	Carpeta de archivos
DBH HR 2000-2013	25/12/2014 17:16	Carpeta de archivos
DBH RS 2000-2013	25/12/2014 17:16	Carpeta de archivos
DBH VV 2000-2013	25/12/2014 17:16	Carpeta de archivos
DBH-CO-2000-2013	25/12/2014 17:17	Carpeta de archivos
DBH-NO2-2011-2013	25/12/2014 17:17	Carpeta de archivos
DBH-O3 2000-2013	25/12/2014 17:17	Carpeta de archivos
DBH-PM10 2000-2013	25/12/2014 17:17	Carpeta de archivos
DBH-SO2 2000-2013	25/12/2014 17:18	Carpeta de archivos
DBH-TMP 2000-2013	25/12/2014 17:18	Carpeta de archivos

Carpeta de archivos DBH-PM10 2000-2013

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
BDH_PM10_2000	17/04/2013 17:57	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2001	27/08/2014 11:16	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2002	27/08/2014 11:38	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2003	27/08/2014 11:52	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2004	27/08/2014 12:02	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2005	27/08/2014 12:12	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2006	27/08/2014 12:23	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2007	27/08/2014 12:33	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2008	27/08/2014 12:52	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2009	27/08/2014 13:04	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2010	27/08/2014 13:07	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2011	10/11/2014 14:32	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2012	27/08/2014 10:25	Hoja de cálculo d...
BDH_PM10_2013	27/08/2014 10:25	Hoja de cálculo d...

Tal como se indica la gráfica anterior se ordenaron todos los contaminantes y variables meteorológicas de la ZMVT para cada uno de los años del periodo de estudio, a partir de esta forma de ordenamiento de las hojas de cálculo, se parte para realizar los cálculos de promedios horarios, diarios, mensual y anual para la ZMVT, omitiendo los valores negativos que son días u horas en el que los equipos de medición no registraron ninguna medición de cierto CC o variable meteorológica.



El proceso para omitir los datos negativos se realizó de dos maneras la primera sería con la función de Excel de buscar y reemplazar, en buscar se digito el valor numérico negativo y en reemplazar se digito NA (no admitido), es decir al realizar algún cálculo de un promedio mediante una tabla dinámica se omiten las celdas NA y se consideran solo los valores positivos. La segunda forma de omitir los datos negativos es realizar un formula manual con un condicional que omita los valores negativos y realice el cálculo de cierto promedio sugerido por el autor, en esta modalidad se puede generar una macro que automatice el proceso y se pueda reproducir directamente en otras hojas de cálculo, ya que las claves que se manejan para cada hoja de cálculo en un archivo son similares o fáciles de replicar.

Ordenamiento de la base de datos por contaminante y por estación en los periodos mencionados.

Con base en la forma de ordenamiento de las hojas de cálculo, en el ítem anterior, es fácil realizar la extracción de los datos correspondientes a cada una de las estaciones para un año mencionado y generar una nueva hoja de cálculo, para cada contaminante y a su vez tener de forma ordenada desde el año 2000 hasta el 2013 todos los datos registrados por cierta estación. La información anterior se detalla en la siguiente figura, en la que se ven los valores de concentraciones promedio de PM10 de cada hora para cada año de monitoreo en la estación de monitoreo del Aeropuerto.

DBH-PM10 Aeropuerto

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
DBH-PM10 Aeropuerto (AP) 2000 - 2013																	
MES	DIA-M	DIA-A	HORA	PM10-00	PM10-01	PM10-02	PM10-03	PM10-04	PM10-05	PM10-06	PM10-07	PM10-08	PM10-09	PM10-10	PM10-11	PM10-12	PM10-13
1	1	1	1	NA	76	153	269	338	512	428	NA	NA	NA	NA	985	554	192
1	1	1	2	NA	131	267	334	354	702	522	NA	NA	NA	NA	985	440	NA
1	1	1	3	NA	151	554	297	886	871	645	NA	NA	NA	NA	985	629	NA
1	1	1	4	NA	198	543	251	999	952	585	NA	NA	NA	NA	985	907	NA
1	1	1	5	NA	212	409	314	1001	800	386	NA	NA	NA	NA	985	672	NA
1	1	1	6	NA	229	325	424	852	716	545	NA	NA	NA	NA	985	836	NA
1	1	1	7	NA	211	379	454	999	529	474	NA	NA	NA	NA	985	820	NA
1	1	1	8	NA	153	419	399	935	779	470	NA	NA	NA	NA	985	696	NA
1	1	1	9	NA	144	373	376	845	868	635	NA	NA	NA	NA	985	702	NA
1	1	1	10	NA	131	378	313	704	803	506	NA	NA	NA	NA	985	947	NA
1	1	1	11	NA	63	332	183	490	594	341	NA	NA	NA	NA	985	792	NA



En cada columna de la gráfica anterior esta detallado el contaminante monitoreado y el año, en la estación de monitoreo; en cada fila se encuentra detallado el valor de la concentración promedio del contaminante medido cada hora en la estación, un total del total de las mediciones realizadas en un año podremos obtener de la siguiente manera, en un día se realizan 24 mediciones y un año tiene 365 días; teniendo un total de 8760 concentraciones promedio registradas en cada estación.

Para facilitar ciertos cálculos en cada archivo se agregó, una columna que indica el mes, otra columna que indica el día del mes y finalmente una columna que indica el día del año; estas columnas fueron utilizadas para realizar el cálculo del promedio diario, el promedio mensual y anual, ya sea mediante tablas dinámicas o formulación en Excel.

Mediante una macro se realiza la reproducción de la secuencia de comandos y fórmulas para generar un archivo idéntico al detallado en la Figura 3.5, para cada una de las estaciones, teniendo así un ordenamiento rápido de los datos necesarios para estudiar el comportamiento y análisis de tendencia de los datos en cada estación.



Anexo 2.2

Tabla de los valores de los promedios mensuales obtenidos para cada contaminante criterio monitoreado en la ZMVT entre los años 2000-2013.

Promedios Mensuales de los Contaminantes Criterio monitoreados en por la RAMA-ZMVT							
AÑO	MESES	MES	CO	NO2	O3	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO2
2000	1	1	1.78		0.034	71	0.012
	2	2	1.79		0.034	71	0.013
	3	3	1.47		0.031	67	0.011
	4	4	1.29		0.040	56	0.009
	5	5	1.47		0.038	43	0.010
	6	6	1.11		0.029	18	0.008
	7	7	1.18		0.033	23	0.008
	8	8	1.26		0.027	19	0.009
	9	9	1.18		0.028	20	0.009
	10	10	1.37		0.026	27	0.010
	11	11	1.63		0.021	37	0.009
	12	12	1.84		0.026	52	0.010
2001	13	1	1.88		0.023	50	0.010
	14	2	1.69		0.027	47	0.010
	15	3	1.46		0.026	42	0.010
	16	4	1.19		0.035	46	0.009
	17	5	1.16		0.032	32	0.010
	18	6	1.22		0.031	23	0.010
	19	7	1.23		0.027	21	0.009
	20	8	1.26		0.025	16	0.009
	21	9	1.18		0.023		0.010
	22	10	1.37		0.024		0.011
	23	11	1.56		0.023	42	0.011
	24	12	1.78		0.020	57	0.011
2002	25	1	1.81		0.024	71	0.011
	26	2	1.34		0.024	54	0.011
	27	3	1.20		0.029	62	0.010
	28	4	1.24		0.035	57	0.011
	29	5	1.22		0.035	54	0.011
	30	6	1.07		0.033	31	0.010
	31	7	0.94		0.027	38	0.009
	32	8	0.97		0.029	39	0.009
	33	9	0.83		0.024	39	0.009
	34	10	1.13		0.023	52	0.009
	35	11	1.30		0.021	58	0.011
	36	12	1.60		0.019	82	0.009
2003	37	1	1.53		0.0230	83	0.0110
	38	2	1.51		0.0220	85	0.0110
	39	3	1.28		0.0240	85	0.0100
	40	4	1.24		0.0300	75	0.0090
	41	5	1.13		0.0390	99	0.0090



UNIVERSIDAD DE CUENCA

	42	6	1.07		0.0270	45	0.0070
	43	7	1.01		0.0260	54	0.0080
	44	8	1.07		0.0280	54	0.0080
	45	9	1.04		0.0250	48	0.0070
	46	10	1.15		0.0210	64	0.0080
	47	11	1.39		0.0220	93	0.0090
	48	12	1.55		0.0250	118	0.0120
	2004	49	1	1.23		0.019	79
50		2	1.23		0.023	101	0.011
51		3	1.07		0.025	90	0.011
52		4	1.01		0.027	72	0.009
53		5	1.09		0.034	62	0.009
54		6	0.90		0.026	42	0.006
55		7	0.85		0.030	47	0.007
56		8	0.93		0.030	46	0.008
57		9	1.01		0.027	38	0.007
58		10	1.21		0.023	62	0.010
59		11	1.37		0.024	132	0.013
60		12	1.72		0.024	151	0.014
2005	61	1	1.88		0.027	162	0.014
	62	2	1.61		0.024	128	0.014
	63	3	1.46		0.026	117	0.013
	64	4	1.68		0.038	151	0.015
	65	5	1.73		0.045	93	0.014
	66	6	1.50		0.037	63	0.015
	67	7	1.61		0.035	38	0.014
	68	8	1.61		0.031	36	0.014
	69	9	1.85		0.034	42	0.015
	70	10	2.12		0.029	49	0.017
	71	11	2.36		0.028	67	0.018
	72	12	2.71		0.028	104	0.017
2006	73	1	2.69		0.030	112	0.020
	74	2	2.31		0.034	101	0.019
	75	3	2.49		0.034	103	0.016
	76	4	1.85		0.039	87	0.016
	77	5	1.52		0.041	58	0.016
	78	6	1.51		0.037	48	0.017
	79	7	1.37		0.030	34	0.013
	80	8	1.60		0.029	39	0.012
	81	9	1.54		0.029	38	0.010
	82	10	1.53		0.023	52	0.009
	83	11	1.74		0.025	71	0.012
	84	12	2.32		0.021	109	0.011
2007	85	1	1.93		0.023	90	0.011
	86	2	2.08		0.026	82	0.012
	87	3	1.84		0.033	93	0.012
	88	4	1.74		0.032	90	0.009
	89	5	1.73		0.035	78	0.015
	90	6	1.49		0.032	56	0.013



UNIVERSIDAD DE CUENCA

	91	7	1.88		0.029	41	0.008
	92	8	2.00		0.026	32	0.009
	93	9	2.14		0.023	39	0.010
	94	10	1.96		0.023	51	0.011
	95	11	2.33		0.020	65	0.011
	96	12	3.07		0.020	97	0.011
2008	97	1	1.41		0.018	100	0.008
	98	2	1.73		0.021	93	0.009
	99	3	1.41			80	0.005
	100	4	1.55			78	0.006
	101	5	1.54			80	0.005
	102	6	1.86			50	0.005
	103	7	0.90			40	0.007
	104	8	0.91			45	0.006
	105	9				37	
	106	10				61	
	107	11				99	
	108	12				147	
2009	109	1				117	
	110	2				111	
	111	3				106	
	112	4				90	
	113	5				66	
	114	6				52	
	115	7				41	
	116	8				38	
	117	9				31	
	118	10				41	
	119	11				69	
	120	12				92	
2010	121	1				67	
	122	2				55	
	123	3				82	
	124	4				83	
	125	5				86	
	126	6				56	
	127	7				27	
	128	8				29	
	129	9				32	
	130	10					
	131	11					
	132	12					
2011	133	1	1.54	0.029	0.021	124	0.009
	134	2	1.10	0.028	0.023	115	0.008
	135	3	0.91	0.028	0.027	121	0.008
	136	4	0.96	0.028	0.033	90	0.006
	137	5	0.93	0.027	0.039	87	0.008
	138	6	0.69	0.020	0.033	54	0.009
	139	7	0.77	0.021	0.025	35	0.006



UNIVERSIDAD DE CUENCA

	140	8	0.75	0.021	0.029	39	0.006
	141	9	0.87	0.024	0.028	51	0.008
	142	10	1.00	0.026	0.026	60	0.008
	143	11	1.14	0.029	0.023	73	0.008
	144	12	1.38	0.033	0.026	112	0.009
2012	145	1	1.22	0.030	0.023	106	0.009
	146	2	1.07	0.026	0.020	57	0.008
	147	3	1.06	0.031	0.031	83	0.009
	148	4	1.02	0.030	0.035	85	0.009
	149	5	1.14	0.034	0.041	76	0.012
	150	6	1.04	0.029	0.030	47	0.010
	151	7	0.94	0.026	0.028	40	0.010
	152	8	1.07	0.026	0.027	43	0.010
	153	9	1.08	0.026	0.030	42	0.010
	154	10	1.26	0.030	0.027	59	0.012
	155	11	1.21	0.032	0.025	68	0.012
	156	12	1.61	0.038	0.024	91	0.011
2013	157	1	1.40	0.031	0.023	82	0.009
	158	2	1.45	0.032	0.025	105	0.008
	159	3	1.40	0.031	0.027	90	0.008
	160	4	1.52	0.037	0.034	98	0.009
	161	5	1.33	0.044	0.039	84	0.009
	162	6	1.06	0.040	0.031	50	0.009
	163	7	0.88	0.044	0.028	41	0.008
	164	8	0.92	0.038	0.027	40	0.008
	165	9	0.98	0.030	0.022	33	0.008
	166	10	1.14	0.032	0.023	48	0.009
	167	11	1.15	0.031	0.020	51	0.008
	168	12	1.15	0.035	0.019	67	0.009



Anexo 2.3

VARIABLES PARA GENERAR EL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIANTE PARA PREDECIR LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO DIARIA DE PM10 EN LA ZMVT.

Variables para seleccionar y generar el modelo de regresión lineal multivariante													
DIAS	AVG-PM10	AVG-PM10 / Da	AVG-HR	AVG-RS	AVG-TMP	AVG-VV	AVG-DV	D-TMP*HR	D-TMP*VV	D-TMP*RS	D-HR*VV	D-HR*RS	D-VV*RS
1	374		38	383		1.2	195	1	1	1	76	13110	690
2	71	374	51	549		1.1	183	0	0	0	102	27999	1098
3	87	71	55	281		0.9	163	0	0	0	55	15455	281
4	110	87	50	590		0.9	181	0	0	0	51	30090	590
5	129	110	42	477	12.1	0.7	239	861	20.5	9778.5	42	20034	477
6	131	129	41	486	12.5	0.8	252	882	21	10206	42	20412	486
7	120	131	44	437	11.2	0.8	155	913.5	20.3	8221.5	45	18225	405
8	134	120	51	361	10.5	1.1	182	918	36	6246	102	17697	694
9	105	134	38	441	9.9	1.1	199	668.8	35.2	7444.8	76	16074	846
10	101	105	32	374	9.6	0.7	158	617.1	18.7	7349.1	33	12969	393
11	139	101	41	447	10.4	0.8	189	770.8	18.8	7708	41	16810	410
12	96	139	54	437	9.8	0.7	218	916.9	17.3	7248.7	53	22207	419
13	98	96	67	365	8.3	0.9	272	1092.1	16.3	5672.4	67	23316	348
14	81	98	66	407	8.4	0.7	292	1016.4	15.4	5913.6	66	25344	384
15	85	81	59	298	9	0.5	225	870	14.5	4321	60	17880	298
16	76	85	51	462	8.6	0.5	227	795.6	15.3	7099.2	52	24128	464
17	109	76	45	457	9.2	0.6	227	756.8	17.2	7929.2	44	20284	461
18	128	109	43	434	10	0.5	225	851.4	19.8	8593.2	43	18662	434
19	149	128	38	494	9.7	0.6	199	695.4	18.3	8070.3	38	16758	441
20	123	149	35	463	10.3	0.7	276	647.5	18.5	8565.5	35	16205	463
21	116	123	36	449	10.9	0.7	255	676.8	18.8	8535.2	36	16344	454
22	113	116	35	455	10	0.7	220	623	17.8	8099	35	15925	455
23	88	113	40	493	9.2	0.8	236	700	17.5	8487.5	40	19400	485
24	120	88	43	429	9.3	0.8	214	731	17	7021	43	17759	413
25	116	120	42	437	9.1	0.7	229	726.6	17.3	7560.1	42	18354	437
26	118	116	42	451	9.3	0.8	245	714	17	7667	42	18942	451
27	106	118	42	431	10.2	0.7	256	777	18.5	7973.5	42	18102	431
28	134	106	45	380	10.5	0.6	227	814.5	18.1	6878	45	17100	380
29	129	134	49	390	10.1	0.8	208	808.5	16.5	6435	49	19110	390
30	108	129	50	462	9.5	0.8	207	885	17.7	8177.4	50	23100	462
31	139	108	47	446	10.4	0.8	228	864.8	18.4	8206.4	47	20962	446
32	110	139	44	420	10.6	0.8	233	836	19	7980	44	18480	420
33	115	110	48	472	10.3	1	200	864	18	8496	48	22656	472
34	119	115	58	314	10	0.9	214	890.9	15.1	4741.4	59	18526	314
35	80	119	56	238	10.4	0.8	223	817.6	14.6	3474.8	56	13328	238
36	75	80	59	283	11.3	0.7	243	920.4	15.6	4414.8	59	16697	283
37	64	75	47	313	10.6	0.8	250	742.6	15.8	4945.4	47	14711	313
38	96	64	44	460	10.4	0.8	221	862.4	19.6	9016	44	20240	460



UNIVERSIDAD DE CUENCA

39	115	96	52	406	10.7	0.7	235	928.2	18.2	7280	51	20400	400
40	87	115	57	450	11.4	0.6	261	1174.2	20.6	9537.8	57	26391	463
41	122	87	55	446	11.9	0.6	196	1012	18.4	8206.4	55	24530	446
42	100	122	54	460	11.9	0.5	195	1053	19.5	8736	54	24192	448
43	99	100	59	365	11.9	0.4	211	1126.9	19.1	6971.5	59	21535	365
44	62	99	53	461	11.7	0.4	282	948.7	17.9	8251.9	53	24433	461
45	87	62	39	536	11.5	0.5	295	776.1	19.9	10666.4	39	20904	536
46	126	87	34	536	11.5	0.6	245	707.2	20.8	11148.8	34	18224	536
47	137	126	34	530	11.8	0.7	242	737.8	21.7	11501	34	18020	530
48	135	137	38	542	12.4	1.1	263	813.2	42.8	11598.8	76	20596	1084
49	127	135	33	546	11.3	1.3	203	693	42	11466	66	18018	1092
50	130	127	35	538	12.4	1.3	225	727.6	42.8	11513.2	68	18292	1076
51	115	130	36	546	12.3	1.3	209	770.4	42.8	11684.4	72	19656	1092
52	103	115	44	486	11.8	1.3	248	888.8	40.4	9817.2	88	21384	972
53	125	103	50	471	12.5	1.5	283	1004.5	41	9655.5	98	23079	942
54	121	125	52	480	12.6	1.4	239	1045.2	40.2	9648	104	24960	960
55	117	121	53	419	12.8	1.3	219	998.4	38.4	7641.6	104	20696	796
56	118	117	50	482	13.1	1.5	232	1020	40.8	9832.8	100	24100	964
57	115	118	47	458	13.7	1.8	195	996.4	42.4	9222	94	20445	870
58	97	115	46	546	13.5	2.1	226	970.6	63.3	11520.6	138	25116	1638
59	104	97	41	517	14.4	2	254	910.2	44.4	10878	82	20090	980
60	135	104	40	508	14.6	1.5	294	888	44.4	11277.6	80	20320	1016
61	138	135	30	524	14.2	1.5	274	705	47	12314	60	15720	1048
62	112	138	29	531	13.8	1.3	232	669	44.6	11841.3	60	15930	1062
63	113	112	35	496	13.8	1.5	245	749	42.8	10614.4	70	17360	992
64	107	113	45	459	13.3	1.8	242	981	43.6	9613.8	90	19845	882
65	104	107	52	423	12.4	2	205	936	36	7614	104	21996	846
66	111	104	47	432	11.4	1.6	245	897.7	38.2	8251.2	94	20304	864
67	133	111	36	540	12	1.9	218	738	41	11070	72	19440	1080
68	120	133	27	560	12.5	1.9	268	569.7	42.2	11773.8	54	15066	1116
69	117	120	41	455	11.2	2.2	189	713.4	52.2	7917	123	18655	1365
70	129	117	42	446	11.1	1.9	275	793.8	37.8	8901.9	84	19782	942
71	117	129	38	465	11.9	1.6	255	733.4	38.6	8974.5	76	17670	930
72	110	117	41	415	12	1.7	255	799.5	39	8092.5	82	17015	830
73	111	110	45	435	11.7	1.8	244	846	37.6	8178	90	19575	870
74	88	111	58	297	10.3	2.2	286	957	49.5	4900.5	174	17226	891
75	94	88	49	350	11.7	1.7	246	885	35.4	6832.2	100	19300	772
76	85	94	37	477	13.4	1.8	274	754.8	40.8	9730.8	74	17649	954
77	106	85	24	575	13.6	2.2	241	518.4	64.8	12506.4	72	13896	1737
78	108	106	23	568	13.5	1.9	250	510.6	44.4	12765	46	13225	1150
79	117	108	27	577	14.5	2.3	242	599.4	66.6	12809.4	81	15579	1731
80	101	117	22	615	13.5	2	269	499.4	45.4	13960.5	44	13530	1230
81	144	101	41	571	13	1.8	248	902	44	12562	82	23411	1142
82	122	144	44	492	13.9	1.8	233	1008	44.8	11020.8	90	22140	984
83	117	122	30	607	14.6	1.9	270	693	46.2	14137.2	60	18360	1224
84	133	117	34	568	14.8	1.8	273	816	48	13632	68	19312	1136
85	105	133	46	513	15	1.6	252	1062.6	46.2	11850.3	92	23598	1026
86	91	105	46	436	15.5	1.3	211	1025.8	44.6	9722.8	92	20056	872
87	110	91	37	517	15.6	1.5	232	896.8	47.2	12201.2	76	19646	1034



UNIVERSIDAD DE CUENCA

88	140	110	31	468	15.9	1.4	224	696	46.4	10857.6	60	14040	936
89	167	140	31	521	15.4	1.8	233	728.5	47	12243.5	62	16151	1042
90	127	167	29	501	15	1.3	240	669.9	46.2	11573.1	58	14529	1002
91	151	127	31	457	14.6	1.9	226	666.5	43	9137.5	62	13175	850
92	110	151	34	418	15	1.7	223	737.8	43.4	8441.3	68	13226	778
93	100	110	38	464	14.8	1.5	218	817	43	9266.5	76	16378	862
94	121	100	38	483	14.4	1.4	270	851.2	44.8	10304	76	17480	920
95	99	121	37	536	16.2	1.8	262	865.8	46.8	11957.4	74	18907	1022
96	111	99	39	376	15.5	1.3	277	830.7	42.6	7625.4	78	13962	716
97	82	111	42	463	14.5	1.3	269	953.4	45.4	9307	84	17220	820
98	38	82	44	527	15.9	1.5	291	1057.8	49.2	12496.8	86	21844	1016
99	74	38	41	542	16.9	1.5	263	1029.1	50.2	13102.2	82	21402	1044
100	81	74	45	542	17	1.3	245	1143	50.8	13284.2	90	23535	1046
101	99	81	46	486	17.6	2.3	267	1152	76.8	11980.8	135	21060	1404
102	87	99	53	480	15.8	1.5	227	1203.1	45.4	10510.1	106	24539	926
103	83	87	49	564	16.8	1.3	294	1136.2	49.4	12769.9	92	23782	1034
104	74	83	47	535	16.5	1.6	284	1165.6	49.6	12871.2	94	24393	1038
105	73	74	50	385	15	1.6	258	1140	45.6	8550	100	18750	750
106	44	73	60	530	13.1	1.6	248	1272	42.4	10091.2	120	28560	952
107	44	44	67	458	12.5	1.2	285	1299.8	38.8	8555.4	134	29547	882
108	57	44	59	462	12.9	1.2	293	1206	40.2	8844	120	26400	880
109	55	57	56	451	13.1	1.3	239	1142.4	40.8	8772	112	24080	860
110	74	55	49	521	13.7	1.6	275	1078	44	10912	98	24304	992
111	54	74	41	589	15.2	1.6	262	943	46	12903	82	23001	1122
112	37	54	52	550	14.4	1.2	300	1138.8	43.8	11475.6	104	27248	1048
113	50	37	51	491	15.2	1.3	239	1116.9	43.8	10227.3	102	23817	934
114	54	50	58	459	14.5	1.1	263	1212.2	41.8	9133.3	116	25346	874
115	66	54	46	597	16.3	1.4	294	1108.6	48.2	13712.9	92	26174	1138
116	100	66	38	486	16.3	1.5	225	866.4	45.6	10556.4	76	17594	926
117	98	100	34	620	16.6	1.4	258	846.6	49.8	14715.9	68	20094	1182
118	115	98	34	590	16.6	1.8	234	822.8	48.4	13600.4	68	19108	1124
119	137	115	38	458	15.1	1.6	235	866.4	45.6	9940.8	76	16568	872
120	107	137	45	432	14.7	1.7	292	990	44	9064	90	18540	824
121	71	107	46	450	16	1.5	275	1035	45	10125	92	20700	900
122	90	71	50	516	15.9	1.9	261	1190	47.6	12280.8	100	25800	1032
123	38	90	62	457	13.7	1.9	208	1177.3	38.6	8820.1	122	27877	914
124	68	38	55	559	13.8	1.7	286	1122	40.8	11403.6	110	30745	1118
125	67	68	62	389	13.3	1.4	285	1289.6	41.6	8091.2	124	24118	778
126	58	67	60	401	13.6	1.6	287	1191.8	40.4	7676	118	22420	760
127	52	58	53	507	15.3	1.4	281	1224.3	46.2	11711.7	106	26871	1014
128	50	52	48	554	16.1	1.3	239	1147.2	47.8	13240.6	96	26592	1108
129	65	50	53	485	15.4	1.5	246	1252.8	46.4	11252	108	26190	970
130	54	65	59	571	15	1.6	301	1433.7	48.6	12854.7	118	31211	1058
131	60	54	55	535	17	1.4	225	1236.6	45.8	12045.4	108	28404	1052
132	76	60	45	547	17.4	1.5	284	1111.5	49.4	13510.9	90	24615	1094
133	94	76	37	598	17.4	1.4	275	972.8	51.2	15308.8	76	22724	1196
134	102	94	44	482	17.2	1.6	267	1073.6	48.8	11760.8	88	21208	964
135	81	102	57	506	16.6	1.7	193	1299.6	45.6	11536.8	114	28842	1012
136	74	81	50	553	16.8	1.7	263	1185.8	48.4	13382.6	98	27097	1106



UNIVERSIDAD DE CUENCA

137	84	74	56	562	16.1	1.9	278	1321.6	47.2	13263.2	112	31472	1124
138	85	84	52	577	16.2	1.9	209	1253.2	48.2	13905.7	104	30004	1154
139	98	85	46	589	16.2	1.5	211	1058	46	13547	92	27094	1178
140	92	98	47	532	16.4	1.7	227	1165.6	49.6	13193.6	94	25004	1064
141	70	92	50	526	16.4	1.5	258	1185	47.4	12466.2	100	26300	1052
142	60	70	49	502	17.2	1.5	257	1147.2	47.8	11997.8	96	24096	1004
143	66	60	53	584	17.9	1.5	262	1285.2	50.4	14716.8	102	29784	1168
144	89	66	48	600	18.3	1.6	247	1281.6	53.4	16607.4	96	29856	1244
145	100	89	47	566	18.2	1.5	261	1212.6	51.6	14448	94	26320	1120
146	93	100	45	435	17.6	1.5	249	1152	51.2	11136	90	19575	870
147	71	93	40	589	18	1.8	275	1029.6	52.8	15549.6	78	22971	1178
148	62	71	43	588	17.8	1.6	260	1118	52	15288	86	25284	1176
149	62	62	49	617	18.2	1.7	280	1298.5	53	16350.5	98	30233	1234
150	84	62	56	523	16.7	1.9	209	1316	47	12290.5	112	29288	1046
151	73	84	52	525	16.2	1.9	271	1196	46	12075	104	27300	1050
152	52	73	46	507	14.1	2.3	154	874	57	9405	138	22770	1485
153	66	52	49	519	14.5	1.7	295	1082.9	44.2	11182.6	98	24794	1012
154	80	66	44	508	15.5	1.4	259	998.8	45.4	11395.4	88	22088	1004
155	82	80	41	572	15.4	2	270	897.9	43.8	12242.1	82	22919	1118
156	60	82	51	434	14	2.1	288	943.5	55.5	7751.5	153	21369	1257
157	68	60	51	577	15.4	2.1	271	1132.2	44.4	12365.4	102	28407	1114
158	70	68	51	589	15.4	1.7	277	1218.9	47.8	12906	102	27540	1080
159	64	70	56	497	15.1	1.8	268	1237.5	45	10507.5	110	25685	934
160	56	64	62	475	15.9	1.4	240	1413.6	45.6	10556.4	124	28706	926
161	62	56	57	514	16.6	1.8	286	1333.8	46.8	11395.8	114	27759	974
162	72	62	51	548	16.7	1.7	243	1224	48	12840	102	27285	1070
163	70	72	51	520	15.8	1.5	261	1193.4	46.8	11583	102	25245	990
164	84	70	54	511	15.7	1.7	265	1215	45	10957.5	108	26298	974
165	62	84	58	472	16	1.6	276	1293.4	44.6	10035	116	26100	900
166	74	62	57	479	15.6	1.6	244	1293.9	45.4	10373.9	114	26049	914
167	64	74	58	490	15.9	1.7	209	1305	45	10507.5	116	27086	934
168	60	64	54	526	16	1.7	156	1177.2	43.6	10921.8	108	27054	1002
169	50	60	53	545	17	2	193	1180.4	45.4	11781.3	104	26988	1038
170	38	50	53	604	17	2	191	1224.3	46.2	13282.5	106	30475	1150
171	28	38	70	392	14.5	3.2	136	1309	74.8	7423.9	280	27790	1588
172	15	28	80	204	13	2.2	181	1256	47.1	3061.5	240	15600	585
173	15	15	76	421	14	2.9	177	1390.8	54.9	7338.3	228	30476	1203
174	20	15	76	254	13.6	1.4	271	1421.2	37.4	4899.4	152	19912	524
175	36	20	74	307	14.3	1.1	238	1435.6	38.8	5664.8	148	21608	584
176	33	36	76	278	13.8	1.4	286	1390.8	36.6	4904.4	152	20368	536
177	28	33	69	355	14.5	2.3	204	1317.9	57.3	6780.5	207	24495	1065
178	35	28	69	456	14.7	2	274	1421.4	41.2	8549	138	28635	830
179	26	35	65	456	14.8	2.1	313	1306.5	60.3	8924.4	195	28860	1332
180	24	26	75	255	13.9	2.5	297	1260	50.4	4233.6	225	18900	756
181	16	24	87	75	12.1	1.6	276	1131	26	949	174	6351	146
182	16	16	82	334	13.1	2.5	163	1287.4	47.1	5118.2	246	26732	978
183	17	16	77	406	13.6	1.9	169	1409.1	36.6	7246.8	154	30492	792
184	19	17	81	249	12.3	1.1	249	1466.1	36.2	4416.4	162	19764	488
185	40	19	68	255	13	1.3	169	1156	34	4233	136	16932	498



UNIVERSIDAD DE CUENCA

186	51	40	72	389	13.5	1.3	171	1425.6	39.6	7524	144	27360	760
187	38	51	74	351	13.8	1.1	252	1457.8	39.4	6737.4	148	25308	684
188	30	38	78	322	13.7	1.1	204	1536.6	39.4	6185.8	156	24492	628
189	38	30	74	431	13.8	1.2	276	1467.3	40.2	8120.4	146	29492	808
190	41	38	74	301	13.7	1.3	236	1361.6	36.8	5409.6	148	21756	588
191	21	41	75	276	13.5	1.2	230	1380	36.8	4839.2	150	19725	526
192	26	21	74	425	14.5	1.1	302	1496.5	41	8507.5	146	30295	830
193	22	26	73	478	14	1.6	165	1368	38	8873	144	33624	934
194	29	22	71	359	13.9	1.3	261	1339.2	37.2	6528.6	144	25272	702
195	24	29	81	156	12.8	1	246	1287.9	15.9	2416.8	81	12312	152
196	26	24	76	451	13.8	1.5	161	1413.6	37.2	8184	152	33440	880
197	29	26	75	278	12.8	1.6	239	1221	33	4471.5	148	20054	542
198	20	29	72	211	13.5	2.1	141	1188	49.5	3399	216	14832	618
199	25	20	70	379	14.7	1.9	168	1359.3	39.4	7289	138	25530	740
200	43	25	69	462	13.9	1.4	184	1386.9	40.2	8844	138	30360	880
201	23	43	68	543	14.3	2.1	139	1298.8	57.3	10123	204	36040	1590
202	45	23	72	341	13.1	1	252	1461.6	20.3	6759.9	72	23976	333
203	52	45	73	343	12.5	1.1	260	1496.5	41	6847	146	24382	668
204	44	52	66	484	13.9	1.2	244	1379.4	41.8	9885.7	132	31218	946
205	31	44	77	351	12.7	1.5	288	1432.2	37.2	6379.8	154	26411	686
206	45	31	70	358	14	1.4	256	1323	37.8	6596.1	140	24430	698
207	42	45	73	329	13.2	1.2	230	1401.6	38.4	6009.6	146	22849	626
208	56	42	74	339	13	1.3	214	1435.6	38.8	6421.4	148	24494	662
209	52	56	76	350	12.7	1.3	174	1421.2	37.4	6245.8	152	25384	668
210	27	52	75	486	14.2	1.7	149	1537.5	41	9737.5	150	35625	950
211	27	27	73	275	13.2	2.1	197	1248.3	51.3	4480.2	219	19126	786
212	23	27	64	347	13.7	2.6	140	1113.6	52.2	5898.6	192	21696	1017
213	27	23	65	277	13.8	2.4	224	1131	52.2	4819.8	195	18005	831
214	27	27	62	546	15.4	2.1	241	1264.8	61.2	10444.8	186	31744	1536
215	35	27	64	486	14.8	1.5	282	1267.2	39.6	9741.6	128	31488	984
216	23	35	67	507	14.8	1.9	179	1346.7	40.2	10190.7	134	33969	1014
217	38	23	67	507	14.9	1.4	211	1494.1	44.6	11306.1	134	33969	1014
218	39	38	69	461	13.9	1.2	281	1400.7	40.6	9358.3	138	31809	922
219	22	39	69	325	13.9	1.2	209	1290.3	37.4	6077.5	138	22425	650
220	39	22	73	367	12.9	1	243	1387	19	6973	73	26791	367
221	31	39	72	472	14.3	1.2	212	1489.2	40.8	9628.8	146	34456	944
222	31	31	64	583	15.1	1.6	194	1329.3	42.2	12301.3	126	36729	1166
223	33	31	68	524	14.3	1.2	220	1509.6	44.4	11521.8	136	35292	1038
224	45	33	67	583	14.8	1.3	240	1425.6	43.2	12592.8	132	38478	1166
225	37	45	68	413	13.9	1.4	182	1298.8	38.2	7888.3	136	28084	826
226	31	37	69	526	14.2	1.4	172	1407.6	40.8	10730.4	138	36294	1052
227	36	31	69	465	14.5	1.1	224	1373.1	39.8	9253.5	138	32085	930
228	39	36	69	391	14	1.6	226	1290.3	37.4	7311.7	138	26979	782
229	37	39	62	557	15.3	1.7	169	1357.8	43.8	12198.3	124	34534	1114
230	56	37	63	532	14.8	1.5	258	1329.3	42.2	11225.2	126	33516	1064
231	51	56	67	484	15	1.3	254	1440.5	43	10406	134	32428	968
232	69	51	66	451	15.4	1.2	230	1392.6	42.2	9516.1	132	29766	902
233	46	69	62	568	15.2	1.8	267	1345.4	43.4	12325.6	124	35216	1136
234	30	46	72	200	14.1	1.7	207	1231.2	34.2	3420	144	14400	400



UNIVERSIDAD DE CUENCA

235	23	30	74	357	14	1.8	163	1339.4	36.2	6461.7	148	26418	714
236	35	23	72	505	14.8	1.3	203	1512	42	10605	144	36360	1010
237	46	35	71	516	14.5	1.3	229	1498.1	42.2	10887.6	142	36636	1032
238	36	46	72	429	14	1.5	206	1396.8	38.8	8322.6	144	30888	858
239	37	36	72	377	14.6	1.2	284	1375.2	38.2	7200.7	144	27144	754
240	28	37	78	194	13.4	0.9	259	1404	18	3492	78	15132	194
241	32	28	73	331	13.6	1.4	242	1303.2	36.2	5991.1	144	23832	662
242	29	32	75	267	13	1.2	164	1387.5	37	4939.5	150	20025	534
243	19	29	76	384	13.6	2.2	162	1314.8	51.9	6660.5	228	29260	1155
244	24	19	79	259	13.8	1.3	192	1374.6	34.8	4437	158	20145	510
245	26	24	82	241	13.3	0.9	251	1558	19	4579	82	19762	241
246	25	26	80	255	13.7	1.4	320	1328	33.2	4233	160	20400	510
247	31	25	78	242	13.8	0.9	259	1474.2	18.9	4573.8	78	18876	242
248	32	31	66	436	13.5	2.3	123	1168.2	53.1	7717.2	198	28776	1308
249	35	32	69	256	12.8	1.9	128	1069.5	31	3968	138	17664	512
250	42	35	56	587	13.7	1.5	305	1197	42	12012	114	32604	1144
251	59	42	50	525	11.1	1.3	270	945	37.8	9922.5	100	26250	1050
252	55	59	44	605	11.9	1.4	238	860	40	12100	86	26015	1210
253	55	55	46	604	11.9	1.7	280	961.4	41.8	12623.6	92	27784	1208
254	39	55	61	224	12	1.7	298	988.2	32.4	3628.8	122	13664	448
255	31	39	66	468	14.4	1.7	157	1359.6	41.2	9640.8	132	30888	936
256	49	31	61	531	15.1	1.6	279	1305.4	42.8	11363.4	122	32391	1062
257	59	49	62	550	14.8	1.4	297	1419.8	45.8	12595	124	34100	1100
258	64	59	65	495	14.9	1.5	175	1384.5	42.6	10543.5	130	32175	990
259	20	64	74	417	14.1	1.6	212	1428.2	38.6	8048.1	148	30858	834
260	38	20	67	485	15	1.1	267	1447.2	43.2	10476	134	32495	970
261	42	38	59	570	15	1.4	252	1274.4	43.2	12312	118	33630	1140
262	56	42	60	511	13.9	1.3	278	1290	43	10986.5	120	30660	1022
263	55	56	63	425	14.4	1.6	292	1285.2	40.8	8670	126	26775	850
264	60	55	65	403	14.1	1.5	289	1306.5	40.2	8100.3	130	26195	806
265	53	60	66	371	14.2	1.7	271	1241.5	38.2	7086.1	130	24115	742
266	29	53	82	193	12.2	1.2	200	1180.8	28.8	2779.2	164	15826	386
267	62	29	69	307	13.8	0.9	301	1317.9	19.1	5863.7	69	21183	307
268	51	62	63	456	15.1	1	298	1341.9	21.3	9712.8	63	28728	456
269	61	51	63	435	15.1	1.2	303	1308.2	42.2	9178.5	124	26970	870
270	64	61	52	468	15.7	1.2	228	1149.2	44.2	10077.6	104	23712	912
271	76	64	63	474	14.7	1.1	240	1379.7	43.8	10117.8	126	29106	924
272	76	76	55	406	14.6	1.1	285	1166	42.4	8904	110	23100	840
273	55	76	61	416	13.4	1.5	280	1146.8	37.6	7896	122	25620	840
274	37	55	66	433	13.1	2	265	1174.8	35.6	7707.4	132	28578	866
275	27	37	65	529	13.1	2	263	1183	36.4	9627.8	130	34385	1058
276	50	27	64	442	13.2	1.6	293	1324.8	41.4	8321.4	128	25728	804
277	47	50	62	433	14.1	1.5	294	1308.2	42.2	8862	124	26040	840
278	55	47	63	394	14.8	1.4	303	1323	42	8064	126	24192	768
279	58	55	65	291	14.4	1.1	216	1313	40.4	5716.6	130	18395	566
280	58	58	76	229	12.6	1.1	229	1507.5	40.2	4482.3	150	16725	446
281	43	58	77	307	12.1	0.8	240	1455.3	18.9	5651.1	77	23023	299
282	26	43	78	221	12.8	0.8	304	1372.8	17.6	3801.6	78	16848	216
283	33	26	80	176	13	0.8	243	1408	17.6	3027.2	80	13760	172



UNIVERSIDAD DE CUENCA

284	19	33	81	292	12.2	2	147	1239.3	30.6	4360.5	162	23085	570
285	29	19	69	275	13.2	1.1	295	1235.1	35.8	4797.2	138	18492	536
286	31	29	76	202	12.1	1.2	305	1269.2	33.4	3289.9	152	14972	394
287	34	31	57	476	12.4	1.6	236	1014.6	35.6	8259.2	114	26448	928
288	37	34	58	488	12.1	1.5	259	1090.4	37.6	8948.8	116	27608	952
289	40	37	64	410	11.6	1.4	266	1203.2	37.6	7520	128	25600	800
290	51	40	63	413	12.6	1.2	300	1253.7	39.8	8019.7	126	25389	806
291	66	51	48	468	12.7	2.1	218	926.4	38.6	8800.8	96	21888	912
292	61	66	59	395	12.1	1.3	291	1138.7	38.6	7411.2	118	22656	768
293	80	61	61	440	12.8	1.1	203	1305.4	21.4	9180.6	61	26169	429
294	69	80	45	480	12.6	1.3	245	936	41.6	9505.6	90	20565	914
295	57	69	35	477	11.1	1.5	292	689.5	39.4	9160.5	70	16275	930
296	49	57	34	481	10.9	1.3	303	690.2	40.6	9764.3	68	16354	962
297	57	49	32	492	10.8	1.5	293	614.4	38.4	8832	64	14720	920
298	63	57	44	465	10.4	1.3	300	932.8	42.4	9624.8	88	19976	908
299	82	63	48	475	11	1	238	1012.8	21.1	9938.1	48	22608	471
300	92	82	51	468	11.6	1	240	1091.4	21.4	9758.4	51	23256	456
301	80	92	50	456	12.2	1.3	211	1010	40.4	8968.8	100	22200	888
302	70	80	51	454	12	1.1	241	1040.4	40.8	9037.2	102	22593	886
303	62	70	40	463	11.9	1.6	274	800	40	8380	80	16760	838
304	79	62	35	468	10.7	1.4	278	672	38.4	8140.8	70	14840	848
305	79	79	48	479	10.4	1.4	195	950.4	39.6	9484.2	96	22992	958
306	84	79	51	440	11.9	1	217	1071	21	9240	51	22440	440
307	75	84	54	406	12.7	1.4	217	1112.4	41.2	8363.6	108	21924	812
308	45	75	70	317	12.5	1	231	1337	19.1	6532.2	70	23940	342
309	58	45	65	330	12.5	1.2	233	1274	39.2	6468	130	21450	660
310	55	58	69	341	11.7	1.1	270	1400.7	40.6	6922.3	138	23529	682
311	67	55	67	344	12.8	0.9	237	1360.1	20.3	6983.2	67	23048	344
312	71	67	65	337	12.8	0.9	235	1306.5	20.1	6773.7	65	21905	337
313	77	71	66	319	13.3	1	260	1313.4	19.9	6348.1	66	21054	319
314	69	77	70	304	12.2	1.3	253	1253	35.8	5441.6	140	21280	608
315	48	69	73	359	11.5	1.4	149	1226.4	33.6	6031.2	146	26207	718
316	66	48	68	386	11.5	0.9	257	1244.4	18.3	7063.8	68	26248	386
317	64	66	67	451	12	1.1	221	1326.6	39.6	8632.8	134	29212	872
318	60	64	67	396	11.4	1.3	203	1259.6	37.6	7444.8	134	26532	792
319	65	60	60	453	11.6	1	223	1206	20.1	9105.3	60	27180	453
320	84	65	60	458	12.1	1.2	222	1224	40.8	9343.2	120	27480	916
321	78	84	61	369	11	1.7	224	1018.7	33.4	6529.7	122	23851	782
322	55	78	66	287	11.6	1.1	278	1234.2	37.4	5797	132	20460	620
323	61	55	64	364	13.4	1.1	222	1286.4	40.2	7316.4	128	23296	728
324	61	61	59	356	13.5	1	219	1221.3	20.7	7369.2	59	21004	356
325	66	61	59	399	12.8	0.9	205	1227.2	20.8	8299.2	59	23541	399
326	80	66	52	370	13.8	1.1	241	1081.6	41.6	7696	104	19240	740
327	68	80	59	425	12.6	1.5	268	1132.8	38.4	8160	118	25075	850
328	69	68	64	422	11.7	1.2	245	1267.2	39.6	8355.6	128	27008	844
329	77	69	61	398	12	1.1	275	1170	39	7761	120	23880	796
330	71	77	74	127	10.6	0.7	250	1050.8	14.2	1760.8	74	9176	124
331	34	71	77	179	8.8	1.6	295	970.2	25.2	2192.4	154	13398	348
332	42	34	64	408	7.6	1.3	324	928	29	5916	128	26112	816



UNIVERSIDAD DE CUENCA

333	66	42	42	457	8.9	1	224	722.4	17.2	7860.4	42	19194	457
334	93	66	41	449	9.1	0.9	252	762.6	18.6	8109.6	41	17876	436
335	94	93	46	443	9.8	1	304	869.4	18.9	7522.2	46	18308	398
336	115	94	47	423	10.6	0.9	214	940	20	7600	47	17860	380
337	111	115	48	421	11.4	0.9	223	1008	21	7938	48	18144	378
338	100	111	49	427	12.2	0.9	251	1053.5	21.5	8234.5	49	18767	383
339	120	100	52	400	12	0.9	240	1144	22	8382	52	19812	381
340	110	120	60	420	11.8	1.1	222	1233.1	41.8	8276.4	118	23364	792
341	97	110	62	382	10.7	1.3	192	1209	39	7254	124	23064	744
342	85	97	62	399	10.5	1	203	1122.2	18.1	6986.6	62	23932	386
343	107	85	59	399	10.8	1	263	1115.1	18.9	6766.2	59	21122	358
344	101	107	57	409	10.5	1	245	1054.5	18.5	7141	57	22002	386
345	98	101	57	412	9.7	0.9	209	1043.1	18.3	7118.7	57	22173	389
346	102	98	59	412	9.8	1.1	212	1067.9	36.2	7040.9	118	22951	778
347	102	102	49	453	10.1	1.2	219	960.4	39.2	8388.8	98	20972	856
348	101	102	43	420	10.8	1	237	860	20	8200	43	17630	410
349	109	101	48	403	10.9	1	236	931.2	19.4	7391.4	48	18288	381
350	97	109	55	368	11.1	0.9	224	1045	19	6783	55	19635	357
351	75	97	64	399	9.8	1.7	213	1036.8	32.4	6285.6	128	24832	776
352	60	75	58	421	10.6	1.3	229	1049.8	36.2	7402.9	116	23722	818
353	74	60	57	397	9.8	0.9	246	1014.6	17.8	6870.8	57	22002	386
354	92	74	58	394	9.7	1.3	233	1003.4	34.6	6643.2	116	22272	768
355	99	92	60	399	9.7	1.6	218	1020	34	6596	120	23280	776
356	84	99	56	414	10.5	1.1	227	1058.4	37.8	7616.7	112	22568	806
357	88	84	55	386	10.3	1.1	209	1017.5	37	6937.5	110	20625	750
358	102	88	52	383	9.8	1.1	228	1003.6	38.6	7198.9	104	19396	746
359	229	102	52	305	9.8	0.9	226	951.6	18.3	5416.8	52	15392	296
360	66	229	52	376	11.1	0.9	276	977.6	18.8	6880.8	52	19032	366
361	77	66	51	387	11.6	1	261	974.1	19.1	7181.6	51	19176	376
362	81	77	51	341	12	1	283	928.2	18.2	6042.4	51	16932	332
363	81	81	61	304	10.2	0.9	271	1091.9	17.9	5298.4	61	18056	296
364	62	81	61	324	10.4	1	265	1073.6	17.6	5702.4	61	19764	324
365	74	62	62	265	9.8	1.1	272	1066.4	34.4	4437.6	124	15996	516



Anexo 2.4.

Correlaciones lineales entre las variables para generar el modelo de regresión lineal.

	AVGD - PM10	MIN-TMP	AVG-TMP	MAX-TMP	MIN-HR	AVG-HR	MAX-HR	MIN-VV	AVG-VV	MAX-VV	D MIN-RS	DAVG-RS	D MAX-RS	AVG-DV	D-TMP*HR	D-TMP*VV	D-TMP*RS	D-HR*VV	D-HR*RS	D-VV*RS	PM10(-1d)	
AVGD - PM10	1.00																					
MIN-TMP	-0.33	1.00																				
AVG-TMP	0.03	0.37	1.00																			
MAX-TMP	0.06	0.33	0.67	1.00																		
MIN-HR	-0.65	0.23	-0.40	-0.26	1.00																	
AVG-HR	-0.73	0.23	-0.31	-0.25	0.86	1.00																
MAX-HR	-0.49	0.17	-0.15	-0.14	0.50	0.67	1.00															
MIN-VV	-0.25	0.34	0.09	0.20	0.18	0.04	-0.04	1.00														
AVG-VV	-0.31	0.40	0.19	0.18	0.20	0.11	0.08	0.55	1.00													
MAX-VV	-0.09	0.35	0.31	0.26	0.01	-0.06	-0.01	0.42	0.74	1.00												
D MIN-RS	0.09	-0.05	-0.08	0.00	-0.11	-0.09	0.00	0.06	0.02	0.04	1.00											
DAVG-RS	0.27	0.01	0.54	0.35	-0.68	-0.61	-0.30	0.10	0.16	0.27	0.34	1.00										
D MAX-RS	0.20	0.09	0.57	0.33	-0.60	-0.49	-0.25	0.08	0.20	0.31	0.18	0.85	1.00									
AVG-DV	0.03	0.15	0.27	0.21	-0.25	-0.15	-0.06	-0.06	-0.08	-0.07	-0.08	0.09	0.16	1.00								
D-TMP*HR	-0.68	0.44	0.32	0.15	0.57	0.79	0.58	0.07	0.21	0.11	-0.12	-0.23	-0.09	0.01	1.00							
D-TMP*VV	-0.22	0.49	0.61	0.47	-0.06	-0.08	-0.02	0.48	0.88	0.74	0.02	0.41	0.45	0.07	0.29	1.00						
D-TMP*RS	0.19	0.21	0.84	0.58	-0.62	-0.55	-0.28	0.14	0.21	0.34	0.20	0.89	0.80	0.20	0.00	0.57	1.00					
D-HR*VV	-0.66	0.39	-0.08	-0.04	0.67	0.68	0.46	0.45	0.78	0.47	-0.04	-0.26	-0.17	-0.19	0.61	0.56	-0.20	1.00				
D-HR*RS	-0.44	0.22	0.23	0.06	0.13	0.39	0.42	0.10	0.25	0.20	0.27	0.46	0.45	-0.09	0.60	0.31	0.38	0.42	1.00			
D-VV*RS	-0.05	0.30	0.48	0.36	-0.28	-0.30	-0.13	0.42	0.78	0.69	0.23	0.72	0.67	0.02	0.01	0.87	0.70	0.35	0.45	1.00		
PM10(-1d)	0.67	-0.28	0.04	0.09	-0.55	-0.65	-0.39	-0.19	-0.26	-0.08	0.08	0.27	0.17	0.01	-0.63	-0.18	0.17	-0.58	-0.38	-0.01	1.00	



Anexo 4.1

Proceso de selección de las variables a ser utilizadas en los modelos de regresión lineal.

Las variables usadas para generar el modelo propuesto son las que tienen un valor superior a 0.3 y un valor menor a -0.3 (figura 4.2) que se generó a partir de la base de Datos del 2011. Una vez ingresadas las variables a Minitab, mediante el uso de la herramienta de regresión, selección de mejores subconjuntos de variables. Se genera el siguiente cuadro de datos.

Vars	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	Cp de Mallows	S	A	P	P	M	1
2	76.1	76.0	72.1	18.237	X		X		
3	78.0	77.8	39.8	17.513	X	X	X		
4	79.2	78.9	21.4	17.078	X	X X	X		
5	80.0	79.7	8.7	16.761		X X	X	X X	
6	80.1	79.8	8.1	16.723		X X	X	X X X	
7	80.3	79.9	6.9	16.671		X X	X X	X X	X
8	80.5	80.0	6.4	16.634		X X	X X	X X	X X
9	80.6	80.1	5.6	16.591	X	X X	X X	X X	X X
10	80.8	80.2	5.1	16.555	X	X X X X X	X X	X X	X X
11	80.8	80.2	6.3	16.561	X X	X X X X X	X X	X X	X X
12	80.8	80.2	7.6	16.567	X X X	X X X X X	X X	X X	X X
13	80.8	80.1	9.4	16.587	X X X X X X X	X X	X X	X X	X X
14	80.9	80.1	11.3	16.608	X X X X X X X X	X X X	X X	X X	X X
15	80.9	80.0	13.1	16.627	X X X X X X X X X	X X X	X X	X X	X X
16	80.9	80.0	15.0	16.648	X X X X X X X X X X	X X X	X X X	X X X	X X X
17	80.9	79.9	17.0	16.672	X X X X X X X X X X X	X X X	X X X	X X X	X X X
18	80.9	79.9	19.0	16.697	X X X X X X X X X X X X	X X X	X X X	X X X	X X X

De todos los posibles subconjuntos de variables que generan un modelo de regresión, se elige al grupo de variables con el valor más alto de R-cuadrado ajustado, y un valor pequeño del Cp de Mallows. De esta manera se definen las variables que nos generan la ecuación de la regresión lineal multivariante.

Con el conjunto de variables se ejecuta el modelo de ajuste de regresión, para encontrar la ecuación y la ponderación de cada variable.



Coeficientes					
Término	Coef	EE del coef.	T	P	VIF
Constante	150.205	21.2931	7.05417	0.000	
MIN-HR	-0.368	0.1638	-2.24758	0.025	5.7257
AVG-VV	-21.655	4.2520	-5.09284	0.000	4.5744
MAX-VV	8.307	2.1090	3.93874	0.000	4.1247
MIN-RS	0.158	0.0997	1.58633	0.114	1.3742
AVG-RS	-0.231	0.0728	-3.17828	0.002	66.1455
PM10-1D	0.629	0.0812	7.74423	0.000	11.7930
TMP&HR	-0.101	0.0227	-4.46358	0.000	30.5701
TMP&RS	0.009	0.0027	3.26671	0.001	36.2570
HR&RS	0.001	0.0006	1.98907	0.047	16.4793
PM10*HR-1	-0.004	0.0016	-2.24897	0.025	7.4057

Coeficientes					
Término	Coef	EE del coef.	T	P	VIF
Constante	114.326	13.4629	8.49191	0.000	
MIN-HR	-0.340	0.1624	-2.09451	0.037	5.5667
AVG-VV	-22.900	4.2477	-5.39115	0.000	4.5107
MAX-VV	8.603	2.1022	4.09242	0.000	4.0492
AVG-RS	-0.097	0.0312	-3.12322	0.002	11.9596
PM10-1D	0.577	0.0766	7.53165	0.000	10.3589
TMP&HR	-0.063	0.0126	-5.01516	0.000	9.3118
TMP&RS	0.005	0.0018	2.94706	0.003	15.1131
PM10*HR-1	-0.002	0.0014	-1.42195	0.156	5.6807

En este caso al ejecutar el ajuste del modelo, se presenta un estadístico adicional que es el P-value, que al establecer un valor de alfa de 5%, se eliminan las variables que presenten un valor superior a 0.05, ya que si son valores superiores a 0.05, esa variable no es significativa en el modelo.

Una vez más se realiza el ajuste del modelo de regresión, sin considerar las variables eliminadas por un p-value alto.

Coeficientes					
Término	Coef	EE del coef.	T	P	VIF
Constante	115.532	13.1834	8.7634	0.000	
AVG-VV	-25.728	3.9680	-6.4838	0.000	3.8921
MAX-VV	9.551	2.0758	4.6011	0.000	3.9040
AVG-RS	-0.109	0.0304	-3.5814	0.000	11.2294
TMP&HR	-0.085	0.0090	-9.5063	0.000	4.6403
TMP&RS	0.007	0.0016	4.7080	0.000	11.5287
PM10-1D	0.481	0.0388	12.4177	0.000	2.6262

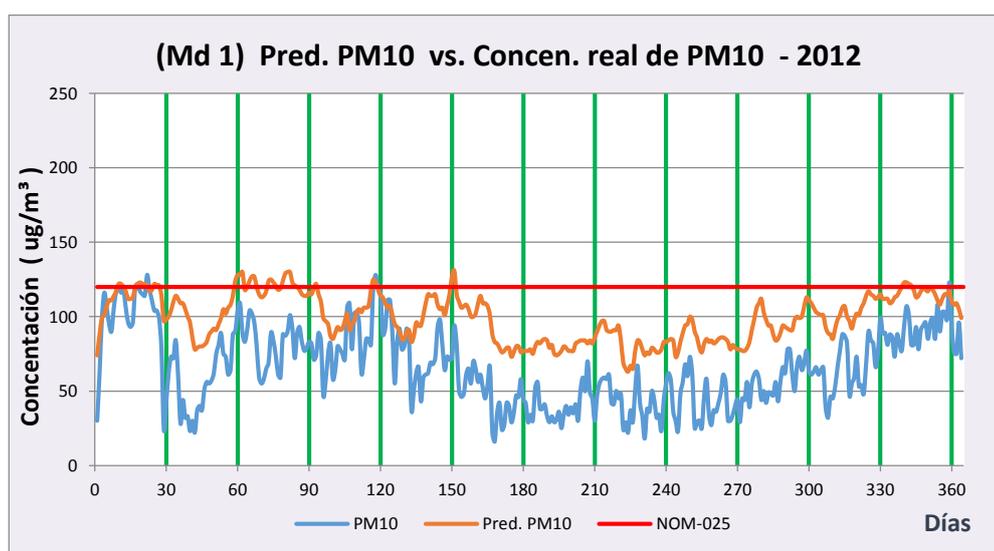
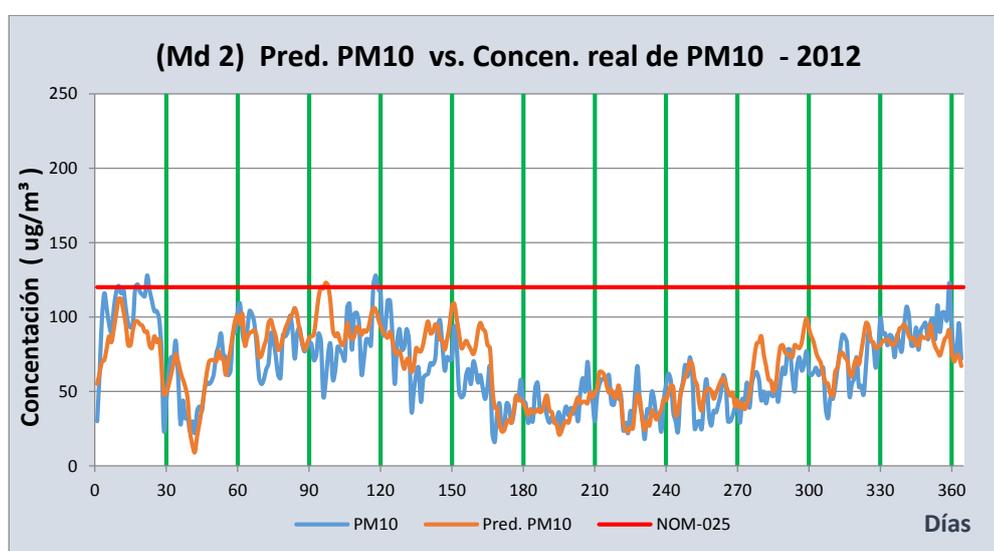


Al tener los coeficientes para cada variable, se verifica el valor del VIF, debido a que un VIF superior a 15, representa problemas de multicolinealidad y a su vez afectando directamente el resultado de la predicción de PM10.

Anexo 4.2

Curvas de ajuste de los datos predichos con los modelos de regresión lineal propuestos, con los datos reales de los años 2012 y 2013.

Ajuste de los datos del año 2012.





Ajuste de los datos del 2013

