



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Distribución espacial y temporal
del material particulado PM2.5 y
PM10 en la Zona Metropolitana de
la Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero civil

P R E S E N T A

Luis Antonio Carranza Machorro

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres, que siempre creyeron en mi capacidad y realizaron el esfuerzo para brindarme una educación superior, a mi familia que siempre estuvo a mi lado apoyándome en todo y por inculcarme el gusto por la escuela, a mi asesor y profesor Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por haberme brindado el apoyo y la guía para realizar esta tesis.

A la Universidad, por todo lo aprendido; no solo en el campo de la ingeniería sino en todos los aspectos, por brindarme una formación técnica y humana para poder servir a mi país con la frente en alto.

A la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, por haberme facilitado toda la información necesaria para sustentar este proyecto.

A la Secretaría de Comunicaciones y Transportes por haberme permitido realizar el servicio social en sus instalaciones, y a todas las personas que la conforman.

A mis amigos, por apoyarme durante mi estancia en la Facultad.

Agradecimiento

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México y al proyecto **“Desarrollo de modelos para la estimación de material particulado suspendido de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México mediante el uso de imágenes satelitales e información geoespacial”** por haber brindado todos los recursos necesarios para la realización de esta tesis que forma parte del proyecto citado.

Resumen

La contaminación en el aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha sido uno de los principales problemas que ha tenido en alerta al sector salud y al gobierno de la misma, como se sabe la ZMCM es propensa a padecer problemas de contaminación en el aire debido a sus características, geográficas, climáticas, económicas y sociales; esto la ha llevado a padecer altos niveles de contaminación en los últimos 10 años.

Por un lado el factor económico, influye de manera directa ya que la ZMCM es la zona en donde se concentra el mayor número de industrias, población y el mayor número de sistemas de transportes en todo el país.

Como se sabe el acceso a equipos especializados de medición de calidad del aire tienen un alto costo monetario, por lo que utilizar los sistemas de interpolación espacial permite la reducción en los costos, además estos sistemas tienen una gran similitud al comportamiento de un sistema real de contaminación.

El trabajo consta de dos partes, la primera es la medición tomada en las estaciones del Sistema de Monitoreo Ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente (SIMAT) para material particulado PM10 y PM2.5, ya que las partículas menores a los diez micrómetros son las que pueden ser inhaladas por el ser humano y causar serios problemas de salud y la segunda la interpolación espacial con el programa de interpolación SURFER™ para hacer la comparación y analizar el comportamiento de la contaminación por material particulado en el tiempo y el espacio.

Se recaba información de los contaminantes PM10 y PM2.5 y de precipitación para identificar una posible relación entre estos dos fenómenos, y a lo largo de la realización del experimento se pudo observar que en efecto existe una relación directa entre estos dos fenómenos, se identificó que en la época de mayor precipitación en la ZMCM la contaminación por material particulado disminuye y viceversa en la época de estiaje los niveles de contaminación aumentan considerablemente.

| | |
|---|-----------|
| Introducción..... | 9 |
| Justificación..... | 11 |
| Objetivos generales..... | 11 |
| Objetivos específicos..... | 11 |
| Capítulo 1. Contaminación atmosférica..... | 12 |
| 1.1 Contaminantes atmosféricos..... | 12 |
| 1.1.1 Clasificación..... | 12 |
| 1.1.2 Efectos producidos en la atmósfera..... | 14 |
| 1.1.3 Índice de la Calidad del Aire..... | 15 |
| 1.2 Fuentes de contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad..... de México..... | 16 |
| 1.2.1 Planta industrial..... | 16 |
| 1.2.2 Planta vehicular..... | 17 |
| 1.2.3 Planta aérea..... | 20 |
| 1.3 Composición del material particulado..... | 20 |
| 1.3.1 Características..... | 21 |
| 1.3.2 Compuestos mayoritarios y minoritarios..... | 23 |
| 1.3.3 Material particulado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México..... | 24 |
| 1.4 Efectos en la salud pública..... | 28 |
| 1.5 Marco normativo..... | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 1.6 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)..... | 31 |
| 1.6.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)..... | 32 |
| 1.6.2 Objetivos que plantea la RAMA..... | 34 |
| 1.6.3 Monitoreo de los contaminantes criterio..... | 35 |
| 1.6.4 Otras redes de monitoreo del SIMAT..... | 36 |
| Capítulo 2. Interpolación y extrapolación espacial..... | 37 |
| 2.1 Estadística espacial..... | 37 |
| 2.2 Interpolación a partir de puntos..... | 39 |
| Capítulo 3. Metodología..... | 41 |
| 3.1 Obtención de datos..... | 41 |
| 3.2 Sitio de estudio: Zona Metropolitana de la Ciudad de México..... | 43 |
| 3.3 Muestreo..... | 47 |
| 3.3.1 Estaciones..... | 48 |
| 3.3.2 Fechas..... | 53 |
| 3.4 Procesamiento de los datos..... | 54 |
| Capítulo 4. Resultados..... | 55 |
| 4.1 Relación precipitación-contaminante..... | 55 |
| 4.2 Interpolación con SURFER™..... | 63 |
| 4.3 Análisis..... | 75 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Capítulo 5. Conclusiones..... | 77 |
| Bibliografía..... | 79 |
| Anexos..... | 82 |

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad el aire ha tenido un papel fundamental en su desarrollo como civilización pero con el paso de los años han aumentado los niveles de contaminación en este, un ejemplo de esto es el auge de la minería durante la colonización en Hispanoamérica; ya que como se sabe la extracción de los minerales produce polvo debido a las perforaciones y este viaja a la atmósfera convirtiéndose en contaminación cuando llega a niveles que pueden afectar la salud del ser humano.

En las últimas décadas el tema de la contaminación (en cualquier medio) ha sido un tema muy importante para todo el mundo, específicamente en el caso de la contaminación atmosférica se han propuesto diferentes opciones para mitigar o disminuir la contaminación tales como los bonos de carbono o la firma del protocolo de Kyoto en 1997.

La revolución industrial iniciada a mediados del siglo XVIII, causó un gran impacto en la generación de contaminantes atmosféricos debido a los grandes avances tecnológicos y económicos que esta trajo consigo haciendo que las poblaciones crecieran a gran velocidad y por ende esto también causó que aumentara el uso de todos los recursos disponibles en el planeta y así se llegara a un problema de contaminación desmedida, sin embargo, el problema no se generó de manera inmediata, tuvieron que pasar casi dos siglos para que la comunidad mundial comenzara a investigar de manera seria que estaba ocurriendo con la contaminación y a establecer normas y políticas contra las industrias que emanaban sus gases a la atmósfera y causaban lo que se conoce como “nieblas tóxicas”.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México fue hasta el año de 1996 en que la entonces conocida como Secretaría de Salubridad creó la primer red de monitoreo atmosférico que únicamente medía dióxido de azufre y partículas en suspensión.

A partir del año 2003 y únicamente con solo 4 estaciones de medición se integró por primera vez la red de medición de material particulado (PM), este tipo de contaminante es el que más daño produce en la salud del ser humano, por ejemplo las partículas menores a los 2.5 micrómetros (PM2.5) llegan a infiltrarse en las fibras pulmonares causando enfermedades respiratorias de consideración.

En diferentes partes del mundo, principalmente en países de alto desarrollo; las instituciones de dichos países han podido determinar valores y parámetros para que la calidad del aire pueda ser considerada “respirable” para el ser humano sin que llegue a afectar su salud, desgraciadamente aún queda mucho para cumplir dichos parámetros porque aunque existen, en muchas zonas alrededor del mundo aún no se cumplen.

En países en desarrollo muchas veces no se cuenta con el equipo especializado para monitorear todos los parámetros que se necesitan para la evaluación de la calidad del aire, esto se debe al alto costo que tienen dichos equipos que generalmente son producidos en países desarrollados lo cual significa un costo extra por su importación y el uso de equipos de técnicos especializados para su mantenimiento, por otro lado estos países tienen otros problemas que a simple vista podrían parecer más graves que la contaminación por lo que no destinan recursos monetarios para atender el problema.

Actualmente con la evolución de la tecnología existen programas de computadora que utilizan diferentes sistemas de interpolación espacial a partir de los datos que se pueden medir en las diferentes estaciones ubicadas en la zona de estudio y que se consideran datos puntuales, con esto se pueden hacer aproximaciones bastante confiables que permiten ver el comportamiento que tiene un contaminante a lo largo del tiempo y espacio.

El presente trabajo cuenta con 5 capítulos, el primero habla sobre la contaminación atmosférica; específicamente tratará sobre los contaminantes que se encuentran en la atmósfera así como las fuentes que los originan en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la composición química que se encuentra en el material particulado, los efectos que se producen en la salud y las redes de monitoreo existentes en la ZMCM; el segundo tiene como fin dar una explicación sobre la interpolación y extrapolación espacial, es decir, los métodos matemáticos existentes y como es que funcionan a partir de principios matemáticos; el tercero detalla la metodología utilizada para la realización de este proyecto concentrándose en cómo se obtuvieron los datos de análisis, las fechas y lugares de muestreo para partículas PM_{2.5} y PM₁₀ y precipitación; el cuarto presenta los resultados obtenidos incluyendo su análisis a partir de la relación entre la precipitación y el comportamiento de los contaminantes a través del espacio y el tiempo, los cuales se muestran en gráficas y mapas que muestran los niveles de contaminación así como las zonas más y menos contaminadas a lo largo de la

ZMCM y por último, el quinto presenta las conclusiones basándose en los resultados obtenidos y en el cumplimiento de los objetivos que se plantearon en la presente tesis.

Justificación

Como se sabe la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es una de las ciudades más importantes en la República Mexicana; por lo que en esta se concentran la mayoría de personas, industrias y medios de transporte por lo que observar el comportamiento a lo largo del tiempo y el espacio de la contaminación atmosférica es necesario, por lo que en esta tesis se realiza un análisis de partículas PM2.5 y PM10 en respuesta a esta necesidad que se presenta a esta metrópoli.

Actualmente se necesitan evaluaciones constantes de la calidad del aire para que cumplan con los parámetros necesarios para que el ser humano pueda realizar sus actividades cotidianas, por lo que se propone la utilización de otra alternativa como son los sistemas de interpolación espacial donde se permite conocer la situación de toda la zona de estudio a partir de estadísticas, métodos matemáticos y el uso de mediciones en puntos estratégicos.

Objetivos generales

- Conocer la relación la distribución temporal y espacial para los contaminantes PM2.5 y PM10 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México involucrando los meses de estiaje y lluvia.

Objetivos específicos

- Identificar los parámetros de la calidad del aire en la ZMCM.
- Percibir la relación entre partículas PM10 y PM2.5.
- Conocer la relación entre la precipitación y el comportamiento de la contaminación atmosférica.
- Comprender los principios con los que opera el método de interpolación espacial.

1.1 Contaminantes atmosféricos

1.1.1 Clasificación

Primero que nada, para que pueda existir contaminación en la atmósfera, es necesario que se comiencen a producir emisiones de sustancias nocivas para la salud humana en el ambiente; dichas emisiones pueden originarse de forma natural (erupciones volcánicas o incendios forestales) o de forma antropogénica, es decir, producida por el ser humano siendo principalmente esta forma la que más genera contaminación por producirse de manera continua a diferencia de la que se origina de manera natural, ya que esta se produce de manera intermitente.

Los contaminantes que son considerados nocivos para la salud son:

- **Partículas suspendidas:** Se definen como aquellas partículas, ya sea líquidas o sólidas, que se encuentran suspendidas en toda la masa de aire y que están compuestas principalmente por partículas de polvo, polen, humo y hollín. Estas, a su vez, se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño; y según la norma vigente se dividen en partículas denominadas PM10 y PM2.5, las primeras tienen un tamaño inferior a los 10 micrómetros (μm) y las segundas poseen un tamaño por debajo a los 2.5 micrómetros (μm).
- **Dióxido de Azufre (SO_2):** Estos son gases que generalmente son incoloros y no inflamables que están formados por partículas de azufre y oxígeno. Estos se originan por medio de la combustión de algunos procesos industrializados y los medios de transporte.
- **Óxidos de Nitrógeno:** Aquellos compuestos químicos que están formados por la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno, los más comunes en el área de estudio para determinar la calidad del aire de una región determinada son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) que son gases encontrados en el efecto invernadero y la lluvia ácida.

- **Monóxido de Carbono:** Es aquel que tiene la mayor concentración en la atmósfera, es decir, el más abundante; es inflamable, insípido e incoloro y es producido principalmente por la quema de combustible en los motores de combustión interna.
- **Ozono troposférico (O₃):** Se encuentra constituido de manera natural en la atmósfera, y por lo tanto en el aire; es de un tono azulado, presenta olor y está compuesto por tres átomos de oxígeno; el que se considera un contaminante atmosférico se genera en la tropósfera, a diferencia del ozono natural que se encuentra en la estratosfera; el ozono troposférico se considera un contaminante porque cuando se produce en exceso causa efectos nocivos y además es tóxico para el ser humano.
- **Compuestos orgánicos volátiles:** Se forman con la reacción entre una molécula de carbono y cualquiera de las siguientes moléculas: hidrógeno, halógenos, oxígeno, azufre, fósforo, silicio o nitrógeno. Al igual que el monóxido de carbono, estos también son emitidos por los medios de transporte.
- **Metales pesados:** En esta categoría se consideran los siguientes compuestos como contaminantes: arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, vanadio y zinc; siendo el plomo el más importante debido a que es muy reactivo y tiende a combinarse con otros agentes presentes en la atmósfera.

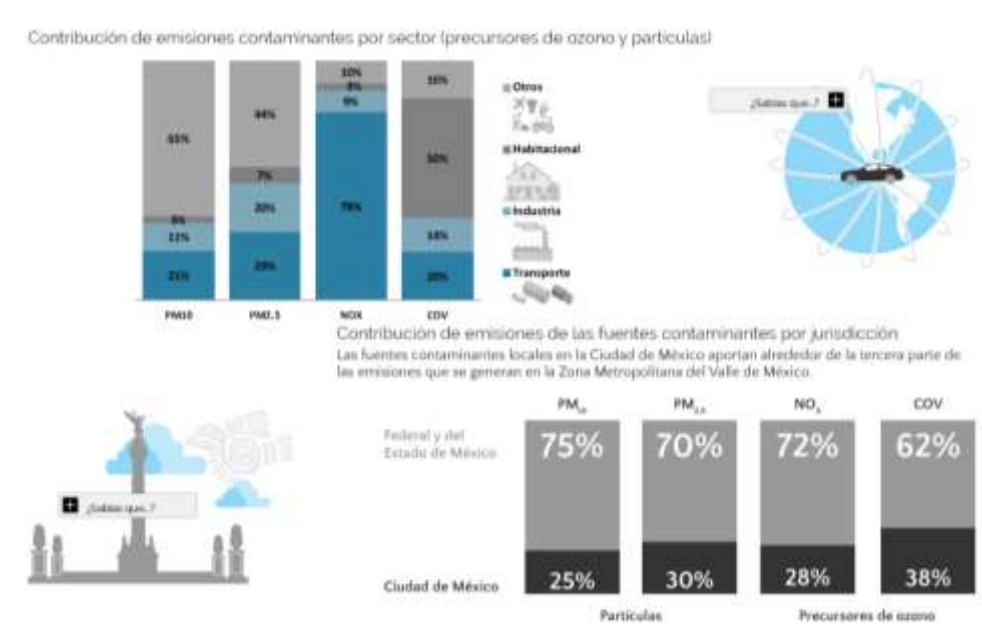


Figura 1.1: Contaminantes atmosféricos en la ZMCM, tomada de la página web oficial de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México <http://www.aire.cdmx.gob.mx>

Los contaminantes atmosféricos (ver figura 1.1) pueden ser clasificados de distintas maneras, ya sea por su tamaño, composición o fuente de emisión; pero además también pueden clasificarse de acuerdo al daño que producen en el ambiente y en la salud; a continuación se muestra dicha clasificación.

Contaminantes tóxicos: Estos contaminantes a menudo se encuentran en forma de gas o partículas que se encuentran en concentraciones bajas pero estos compuestos son difíciles de eliminar y su persistencia en el ambiente hace que sean altamente peligrosos para la flora, fauna y por supuesto para los seres humanos.

Ejemplos de estos compuestos químicos pueden ser el tolueno, el benceno y el xileno; así como también compuestos no orgánicos como el amoniaco y el cloro y los metales pesados encontrados en las partículas como el plomo o el cadmio.

Contaminantes biológicos: A diferencia del grupo anterior estos son emitidos por materia viva en descomposición en lugar de ser producidos sintéticamente, ejemplos de estos son las esporas, el moho, partes de insectos y restos de la piel humana.

1.1.2 Efectos producidos en la atmósfera

La continua y desmedida emisión de contaminantes a la atmósfera, ya sea por el hombre o de manera natural es causa de que el comportamiento de la misma cambie con el paso del tiempo.

Se pueden producir varios efectos que afectan a la atmósfera, pero los que más han alarmado a la humanidad en los últimos años son los efectos climáticos; se ha detectado que los patrones de los vientos, lluvia, nubosidad y temperatura propician el aumento o la disminución de la contaminación.

Un efecto que ha preocupado a la comunidad científica y al público en general es el deterioro en la capa de ozono principalmente ocasionado por los clorofluorocarbonos o comúnmente llamados CFCs, la constante de emisión de estos compuestos ha venido desgastando la capa de ozono ubicada en la atmósfera permitiendo que la radiación ultravioleta penetre a la tierra de manera cada vez más violenta ocasionando serios problemas de salud como las enfermedades de la piel.

1.1.3 Índice de la Calidad del Aire

Es un indicador que permite informar a la población el estado del aire en un día o periodo determinado, es decir, muestra que tan contaminado está el aire y los probables efectos que podría causar en la salud.

Desde 2006, el Índice de Calidad del Aire (antes IMECA) tiene su fundamento en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006 en donde se establecen los requisitos para su cálculo y difusión (SEDEMA, 2018).

El índice de calidad del aire se calcula a partir de los contaminantes criterio; específicamente para cinco de ellos (dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas), la escala del índice está comprendida entre 0 y 500 donde un valor menor de 100 es un resultado favorable mientras que cualquier resultado mayor a 100 se considera un riesgo para salud y niveles de contaminación desfavorables (ver tabla 1).

El propósito de crear un índice que pueda estimar la calidad del aire es para que la población pueda realizar sus actividades de manera cotidiana y también para poder establecer un registro permanente en la medición de los parámetros de la calidad del aire para que a futuro puedan establecerse medidas de prevención y mitigación; así como también planes de contingencia en caso de que en un periodo de tiempo determinado se registre una calidad del aire mala que pueda afectar a la salud.

Tabla 1: Índice de la Calidad del Aire (antes IMECA)

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

Fuente: (SEDEMA, 2018 <http://www.aire.cdmx.gob.mx>)

1.2 Fuentes de contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

1.2.1 Planta industrial

La industria es sin duda una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, no solo en la ZMCM sino también alrededor del mundo; ya que debido a los procesos que realizan diversos ramos industriales producen desechos que se convierten en contaminantes atmosféricos, por ejemplo, la agricultura y ganadería (producción de gases), las industrias que utilizan solventes y pintura (automotrices, manufactureras etc.), la industria de la construcción (emisión de partículas en suspensión), etc.

De acuerdo con datos del INEGI, las industrias se encuentran repartidas en la ZMCM de la siguiente forma:

En la ZMCM existen 730, 436 unidades industriales, de las cuales las que generan contaminantes atmosféricos de manera potencial son (INEGI, 2015):

Tabla 2: Planta industrial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| Ramo industrial | Unidades | Personal utilizado |
|---|----------|--------------------|
| Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza | 36 | 219 |
| Minería | 110 | 7,432 |
| Suministro de gas por ductos al consumidor final | 94 | 44,313 |
| Construcción | 2,313 | 130,138 |
| Industrias manufactureras | 65,116 | 781,977 |
| Comercio al por mayor | 23,342 | 272,309 |
| Comercio al por menor | 364,630 | 1,040,163 |
| Transportes, correos y almacenamiento | 2,743 | 227,778 |
| Manejo de desechos | 17,392 | 544,917 |
| Servicios de preparación de alimentos y bebidas | 72,295 | 343,678 |

Fuente: Elaboración propia con base en el cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México, INEGI 2015

1.2.2 Planta Vehicular

La planta vehicular es la fuente de contaminación atmosférica más importante debido a la gran cantidad de vehículos automotores que circulan diariamente por la ZMCM, principalmente de motores de combustión interna, ya sea que funcionen con gasolina, gas LP o diésel, la emisión

de gases como el dióxido de carbono (CO₂) es muy alta producto del proceso incompleto de la combustión de los hidrocarburos que hacen funcionar a los motores.

En la ZMCM los vehículos registrados ascienden a 8, 520, 158 (INEGI, 2015), de los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 3: Distribución vehicular en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| Deleg. O Mpio. | Automóviles | | | Camiones de pasajeros | | |
|-----------------------|-------------|---------|------------|-----------------------|---------|------------|
| | Oficial | Público | Particular | Oficial | Público | Particular |
| Álvaro Obregón | 0 | 8,751 | 268,080 | 4 | 15,955 | 29,674 |
| Azcapotzalco | 0 | 6,723 | 222,538 | 0 | 0 | 1,313 |
| Benito Juárez | 0 | 3,975 | 378,096 | 0 | 0 | 436 |
| Coyoacán | 0 | 9,805 | 365,896 | 0 | 0 | 2,145 |
| Cuajimalpa de Morelos | 0 | 1,468 | 103,380 | 0 | 0 | 696 |
| Cuauhtémoc | 0 | 6,307 | 354,627 | 0 | 351 | 1,593 |
| Gustavo A. Madero | 0 | 19,229 | 377,415 | 0 | 0 | 4,177 |
| Iztacalco | 0 | 7,657 | 177,103 | 0 | 0 | 1,711 |
| Iztapalapa | 0 | 20,099 | 436,131 | 0 | 1,696 | 5,805 |
| Miguel Hidalgo | 0 | 3,946 | 350,266 | 0 | 0 | 858 |
| Milpa Alta | 0 | 1,376 | 19,353 | 0 | 0 | 429 |
| Tláhuac | 0 | 3,946 | 350,266 | 0 | 0 | 858 |
| Tlalpan | 0 | 8,377 | 287,567 | 0 | 0 | 2,057 |
| Venustiano Carranza | 0 | 8,127 | 192,940 | 0 | 0 | 1,287 |
| Xochimilco | 0 | 2,560 | 118,975 | 0 | 0 | 1,547 |
| Tizayuca | 4 | 318 | 26,708 | 0 | 93 | 81 |
| Acolman | 5 | 24 | 19,269 | 0 | 11 | 1 |
| Amecameca | 0 | 34 | 7,906 | 0 | 101 | 0 |
| Apaxco | 0 | 32 | 4,512 | 0 | 29 | 0 |
| Atenco | 0 | 407 | 6,748 | 0 | 2 | 0 |
| Atizapán de Zaragoza | 0 | 957 | 173,149 | 0 | 107 | 32 |
| Atlautla | 0 | 21 | 2,136 | 0 | 4 | 0 |
| Axapusco | 0 | 20 | 3,179 | 0 | 0 | 1 |
| Ayapango | 0 | 4 | 1,029 | 0 | 6 | 0 |
| Chalco | 12 | 610 | 61,059 | 0 | 1,642 | 4 |
| Chlautla | 0 | 38 | 5,558 | 0 | 0 | 1 |
| Chicoloapan | 0 | 18 | 28,238 | 0 | 320 | 8 |
| Chiconcuac | 0 | 21 | 6,639 | 0 | 0 | 0 |

| Deleg. O Mpio. | Automóviles | | | Camiones de pasajeros | | |
|-----------------------------|-------------|---------|------------|-----------------------|---------|------------|
| | Oficial | Público | Particular | Oficial | Público | Particular |
| Chimalhuacán | 2 | 163 | 73,673 | 0 | 533 | 0 |
| Coacalco de Berriozábal | 4 | 403 | 94,234 | 0 | 145 | 36 |
| Cocotitlán | 0 | 4 | 2,248 | 0 | 17 | 0 |
| Coyotepec | 0 | 16 | 5,719 | 0 | 253 | 0 |
| Cuautitlán | 13 | 1,333 | 34,425 | 0 | 462 | 15 |
| Cuautitlán Izcalli | 172 | 0 | 192,270 | 0 | 0 | 40 |
| Ecatepec de Morelos | 0 | 1,298 | 466,502 | 0 | 2,100 | 52 |
| Ecatzingo | 0 | 26 | 443 | 0 | 3 | 0 |
| Huehuetoca | 0 | 205 | 11,476 | 0 | 24 | 0 |
| Hueyoxtlá | 0 | 32 | 3,642 | 0 | 0 | 0 |
| Huixquilucan | 55 | 829 | 82,944 | 4 | 93 | 28 |
| Isidro Fabela | 0 | 19 | 1,063 | 0 | 0 | 0 |
| Ixtapaluca | 3 | 223 | 87,530 | 0 | 542 | 5 |
| Jaltenco | 0 | 9 | 4,740 | 0 | 3 | 0 |
| Jilotzingo | 0 | 59 | 3,368 | 0 | 5 | 3 |
| Juchitepec | 0 | 23 | 1,929 | 0 | 22 | 0 |
| La Paz | 1 | 81 | 43,055 | 0 | 299 | 0 |
| Melchor Ocampo | 0 | 60 | 8,556 | 0 | 81 | 0 |
| Naucalpan de Juárez | 296 | 1,676 | 336,847 | 0 | 2,100 | 128 |
| Nextlalpan | 0 | 3 | 3,579 | 0 | 3 | 0 |
| Nezahualcóyotl | 0 | 1,524 | 351,531 | 0 | 1,181 | 50 |
| Nicolás Romero | 0 | 193 | 58,011 | 0 | 741 | 27 |
| Nopaltepec | 0 | 3 | 1,383 | 0 | 0 | 0 |
| Otumba | 0 | 39 | 8,129 | 0 | 1 | 0 |
| Ozumba | 0 | 62 | 3,204 | 0 | 64 | 0 |
| Papalotla | 0 | 3 | 1,242 | 0 | 0 | 0 |
| San Martín de las Pirámides | 0 | 11 | 4,184 | 0 | 0 | 0 |
| Tecámac | 0 | 477 | 68,515 | 0 | 212 | 2 |
| Temamatla | 0 | 11 | 1,971 | 0 | 3 | 0 |
| Temascalapa | 0 | 37 | 3,012 | 0 | 29 | 0 |
| Tenango del Aire | 0 | 5 | 1,251 | 0 | 1 | 0 |
| Teoloyucan | 0 | 5 | 12,942 | 0 | 21 | 0 |
| Teotihuacán | 0 | 31 | 12,309 | 0 | 58 | 0 |
| Tepetlaoxtoc | 0 | 27 | 4,452 | 0 | 0 | 0 |
| Tepetlixpa | 1 | 12 | 1,410 | 0 | 3 | 0 |

| Deleg. O Mpio. | Automóviles | | | Camiones de pasajeros | | |
|-----------------------------|-------------|---------|------------|-----------------------|---------|------------|
| | Oficial | Público | Particular | Oficial | Público | Particular |
| Tepotztlán | 0 | 91 | 17,305 | 0 | 18 | 6 |
| Tequixquiac | 0 | 3 | 4,426 | 0 | 4 | 0 |
| Texcoco | 0 | 1,367 | 67,896 | 0 | 521 | 67 |
| Tezoyuca | 0 | 37 | 5,971 | 0 | 0 | 1 |
| Tlalmanalco | 0 | 160 | 7,517 | 0 | 13 | 0 |
| Tlalnepantla de Baz | 351 | 1,475 | 287,034 | 0 | 894 | 55 |
| Tonanltla | 0 | 0 | 696 | 0 | 0 | 0 |
| Tultepec | 0 | 78 | 25,120 | 0 | 274 | 7 |
| Tultitlán | 0 | 363 | 114,544 | 0 | 405 | 18 |
| Valle de Chalco Solidaridad | 0 | 0 | 43,582 | 0 | 0 | 3 |
| Villa del Carbón | 0 | 185 | 3,327 | 0 | 3 | 0 |
| Zumpango | 0 | 269 | 24,952 | 0 | 462 | 3 |

Fuente: Elaboración propia con base en el cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México, INEGI 2015

1.2.3 Planta Aérea

La planta aérea de la ZMCM comprende a los aeropuertos tanto nacionales e internacionales y aeródromos pequeños que se encuentran dentro de esta, como se sabe los vehículos aéreos también son una fuente de contaminación atmosférica importante.

Tabla 4: Planta Aérea en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| Deleg. O Mpio. | Aeropuertos | | Aeródromos |
|----------------------|---------------|----------|------------|
| | Internacional | Nacional | |
| Venustiano Carranza | 1 | 1 | 4 |
| Tizayuca | 0 | 0 | 1 |
| Amecameca | 0 | 0 | 1 |
| Atizapán de Zaragoza | 1 | 0 | 1 |
| Tepotztlán | 0 | 0 | 1 |

Fuente: Elaboración propia con base en el cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México, INEGI 2015

1.3 Composición del material particulado

El material particulado se puede clasificar de acuerdo al lugar donde se origina de la siguiente manera:

Partículas primarias: Este tipo de partículas son las que son emitidas directamente a la atmósfera por medio de diversas fuentes, por ejemplo, polvo en las calles, materiales de construcción y el humo oscuro que despiden los escapes de los vehículos automotores.

Partículas secundarias: Se originan en la atmósfera reaccionando químicamente con los demás gases que la componen, dichos materiales gaseosos son conocidos como precursores. Los principales gases precursores son el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco (NH_3), los cuales forman sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos (SEMARNAT, 2011) (ver figura 1.2).

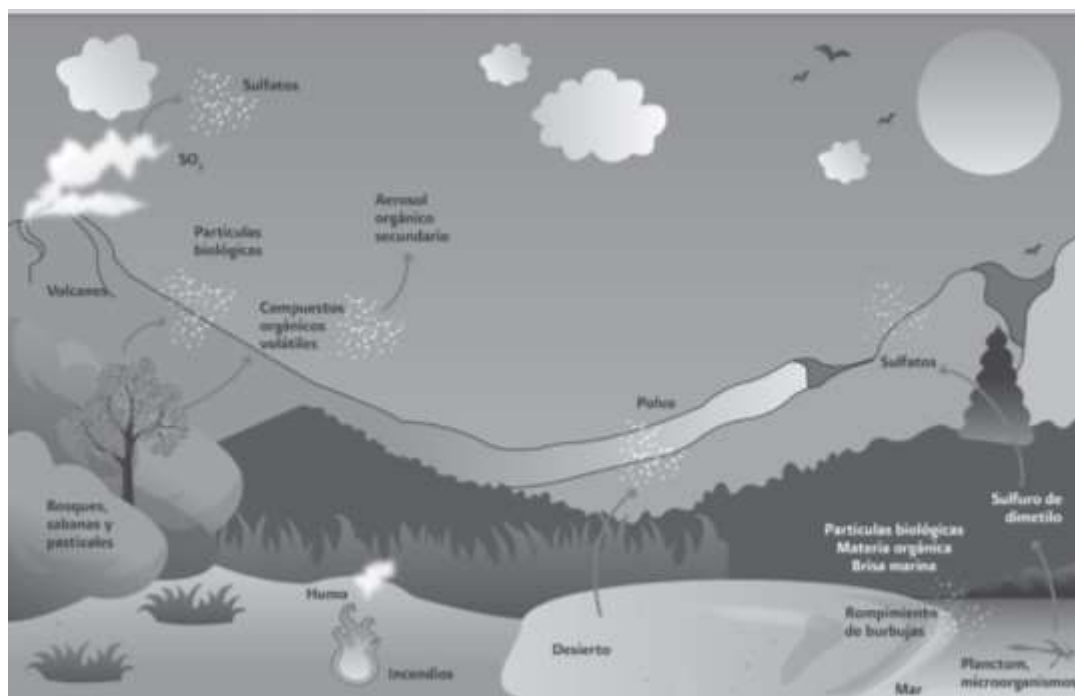


Figura 1.2: Material particulado primario y secundario (Imagen tomada la página web de la biblioteca digital de la SEMARNAT, <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>)

1.3.1 Características

En las tablas 5, 6 y 7 se pueden identificar los componentes químicos, características y procesos de formación para cada tipo de material particulado de acuerdo con su tamaño.

Tabla 5: Características del material particulado

| | TIPO DE PARTÍCULAS | | |
|-----------------------------|--|---|--|
| | Ultrafinas (PM _{0.1}) | Finas (PM _{2.5}) | Gruesas (PM ₁₀) |
| Proceso de formación | <ul style="list-style-type: none"> Nucleación de gases atmosféricos, incluidos H₂SO₄, NH₃, y algunos compuestos orgánicos. Condensación de gases. | <ul style="list-style-type: none"> Condensación de gases. Coagulación de partículas pequeñas. Reacción de gases en o sobre las partículas. Evaporación de neblina y gotas de agua en la que los gases se han disuelto y reaccionado. | <ul style="list-style-type: none"> Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión, rompimiento de sólidos/gotas). Evaporación de aerosoles. Suspensión de polvos. Reacción de gases en o sobre las partículas. |

Fuente: Elaboración propia con base en “Integrated Science Assessment for Particulate Matter”, EPA, 2009

Tabla 6: Composición del material particulado

| | TIPO DE PARTÍCULAS | | |
|--------------------|--|---|--|
| | Ultrafinas (PM _{0.1}) | Finas (PM _{2.5}) | Gruesas (PM ₁₀) |
| Composición | <ul style="list-style-type: none"> Sulfato Carbón elemental Compuestos metálicos Compuestos orgánicos con baja saturación de presión de vapor a temperatura ambiente | <ul style="list-style-type: none"> Sulfato, nitrato, amonio, iones de hidrógeno Carbón elemental Gran variedad de compuestos orgánicos Metales compuestos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. Agua ligada a las partículas Bacterias, virus | <ul style="list-style-type: none"> Nitratos, Cloruros, sulfatos de reacciones de HNO₃, HCL Y SO₂ con partículas gruesas. Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe). CaCO₃, CaSO₄, NaCl, sal marina Bacterias, polen, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales |

Fuente: Elaboración propia con base en “Integrated Science Assessment for Particulate Matter”, EPA, 2009

Tabla 7: Factores que influyen en la permanencia en la atmósfera del material particulado

| Características | TIPO DE PARTÍCULAS | | |
|--------------------------------|---|--|--|
| | Ultrafinas (PM _{0.1}) | Finas (PM _{2.5}) | Gruesas (PM ₁₀) |
| Solubilidad | No están bien caracterizadas. | Muy solubles, higroscópicas y delisecuentes. | Muy insolubles y no higroscópicas. |
| Vida media atmosférica | Minutos a horas | Días a semanas | Minutos a horas |
| Proceso de remoción | Crecen en la moda de acumulación. Se difunden en gotas de lluvia y otras superficies. | Formación de nubes y lluvia. Precipitación seca. | Precipitación seca. Eliminación por gotas de lluvia. |
| Distancia de transporte | De menos de uno a decenas de kilómetros. | De cientos a miles de kilómetros | De menos de un kilómetro a decenas de kilómetros (de cientos a miles de kilómetros en tormentas de arena para la fracción de tamaños pequeños) |

Fuente: Elaboración propia con base en “Integrated Science Assessment for Particulate Matter”, EPA, 2009

1.3.2 Compuestos mayoritarios y minoritarios

En el material particulado que se emite a la atmósfera, ya sea por medio de la naturaleza o por medio del hombre se encuentran compuestos en mayor o menor cantidad dependiendo de varios factores como el lugar donde se originan o la abundancia de algún compuesto específico en la atmósfera; a los compuestos que se encuentran en mayor cantidad, es decir, que forman la mayor cantidad de masa se les denomina “mayoritarios” y por el contrario a los que se encuentran en menor cantidad en las partículas se les denomina minoritarios.

Aquí se mencionan los componentes mayoritarios y minoritarios más comunes que se han encontrado en el material particulado.

Compuestos mayoritarios

Sulfatos: Se generan principalmente a partir de la oxidación del SO₂, por lo que son compuestos secundarios, en algunos casos pueden aparecer como compuestos primarios, por ejemplo en las costas ya que se derivan de la sal de los mares o en el yeso.

Nitratos: En las partículas suspendidas el compuesto más común de los nitratos es el NH_4NO_3 , (nitrato de amonio) este compuesto se deriva de la neutralización de los vapores de HNO_3 por NH_3 .

Amonio: Los más comunes que pueden ser encontrados en las partículas suspendidas; son el sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y el nitrato de amonio NH_4NO_3 .

Sodio y cloro: Principalmente provienen de la sal marina.

Carbón elemental (Hollín): Es proveniente de la quema de los combustibles fósiles y de la biomasa.

Carbón orgánico: Este es producto de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles.

Componentes minerales: Originados por el material que se encuentra en los suelos y procesos de construcción y demolición; estos componentes son ricos en silicio, aluminio, hierro y calcio.

Agua: Existen componentes, como las sales que pueden tomar el agua de la atmósfera y convertirse en gotas líquidas, estas son las que pueden representar un contenido significativo en la masa de las partículas.

Compuestos minoritarios

Elementos traza: Algunos ejemplos de estos son los metales pesados como el plomo, el cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso emitidos en la fundición de altos hornos y sistemas de combustión.

Compuestos orgánicos traza: En estos compuestos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y alifáticos, los aldehídos, los ácidos carboxílicos y las cetonas.

1.3.3 Material particulado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En la composición del material particulado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México pueden existir diversos compuestos y trazas de algunos materiales debido a que la metrópoli cuenta con diferentes sectores productivos (industria acerera, fundición de cobre, quema de baterías, fabricación de circuitos eléctricos, quema de combustible por motores de combustión interna, construcción, entre otros.) haciendo que su caracterización sea de suma importancia

para poder determinar cuan peligrosa y en qué cantidad se produce, ya que como se sabe las condiciones geográficas de la ZMCM propician su acumulación y estancia dentro de esta

En las tablas 8 y 9 se muestran los tipos de compuestos encontrados en partículas recolectadas a lo largo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Tabla 8: Compuestos encontrados en partículas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| Partícula | Origen | Compuestos |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| Ricas en Hierro | Antropogénico | Ferritas |
| | | Óxidos de hierro |
| | | Fe-Zn |
| | | Fe-Mn |
| | | Fe-Cu |
| | | Fe-Cr |
| | | Hierro metálico |
| | Mineral | Fe-Ni |
| | | Fayalita |
| | | Ilmenita |
| | Magnetita | |
| Ricas en C-S | Antropogénico | Carbón-azufre |
| Ricas en cobre | Antropogénico | Cobre metálico |
| | | Óxido de cobre |
| | | Sulfato de cobre |
| | | Sulfuro de Cobre |
| | | Cu-Zn |
| | | Cu-Ag |
| | | Cu-As |
| | Mineral | Calcopirita |
| | | Cobre nativo |
| | | |
| Ricas en fluor | Antropogénico | Fluorita |
| Ricas en plomo | Antropogénico | Óxidos de Plomo |
| | | Pb-Zn |
| | | Sulfatos de plomo |
| | | Pb-As |
| | | Pb-Cl |
| | | Pb-Cu |
| | | Pb-Sn |
| | Mineral | Galena |
| | Ricas en arsénico | Antropogénico |
| Ricas en níquel | Antropogénico | Níquel metálico |
| | | Ni-Va |
| | | Ni-Zn |
| | | Ni-Fe |

Fuente: Elaboración propia con información de A. Aragón Piña, 2002

Tabla 9: Compuestos encontrados en partículas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| Partícula | Origen | Compuestos | | |
|----------------------------|---------------|---|---------------|--|
| Ricas en zinc | Antropogénico | Sulfato de Zinc Zn-Fe Zn-As | | |
| | Mineral | Esfalerita | | |
| Ricas en estaño | Antropogénico | Óxidos de estaño Sn-Pb Sn-Cl Sn-Zn Sn-S | | |
| | | Ricas en calcio | Antropogénico | Fosfato de calcio Sulfato de calcio |
| | | | Mineral | Yeso |
| | | Ricas en aluminio | Antropogénico | Al-O Al-Si Al-Cu |
| Ricas en zircón | Mineral | | | Zircón |
| Ricas en bario y estroncio | Mineral | | | Barita Celestita Whiterita |
| | | Ricas en bismuto | Antropogénico | Bismuto metálico |
| | | Ricas en molibdeno | Mineral | Molibdeno metálico |

Fuente: Elaboración propia con información de A. Aragón Piña, 2002

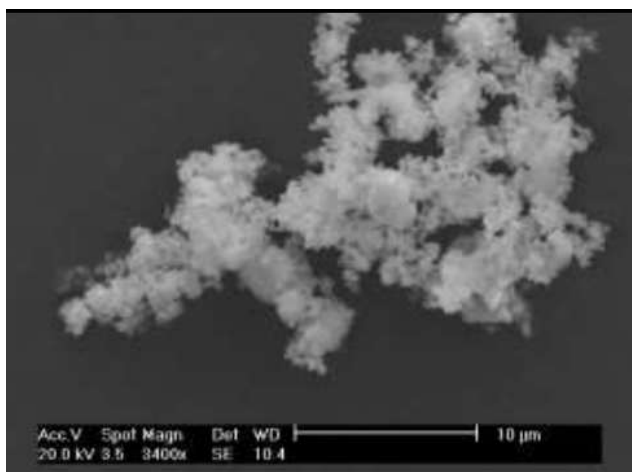


Figura 1.3: Partícula de hierro (A. Aragón Piña, 2002)



Figura 1.4: Partícula de Cu-Zn-O (A. Aragón Piña, 2002)

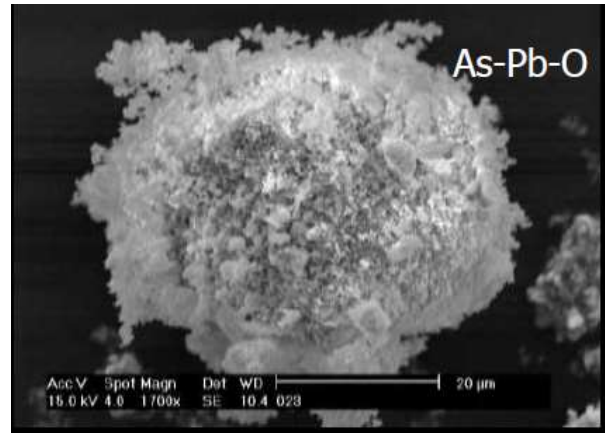


Figura 1.5: Partícula de As-Pb-O (A. Aragón Piña, 2002)

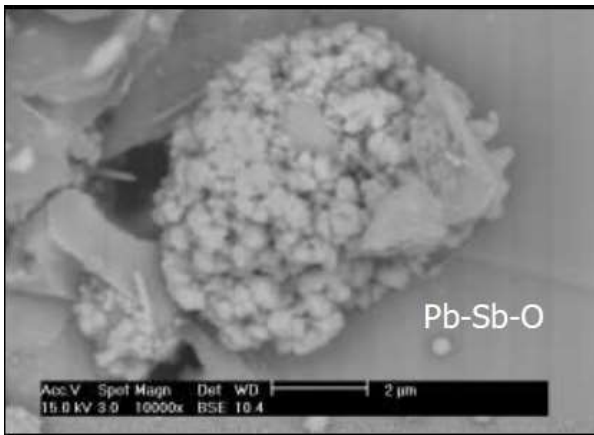


Figura 1.6: Partícula de Pb-Sb-O (A. Aragón Piña, 2002)

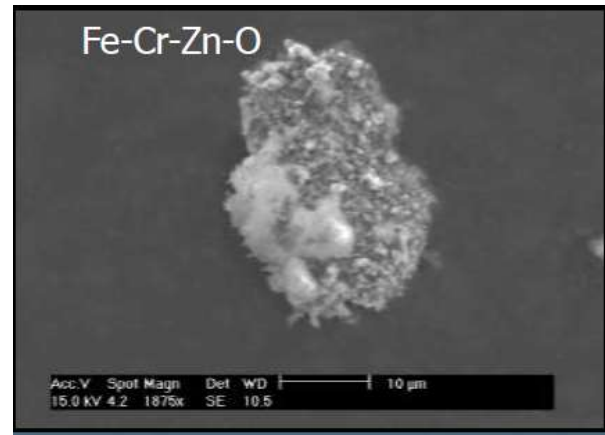


Figura 1.7: Partícula de Fe-Cr-Zn-O (A. Aragón Piña, 2002)

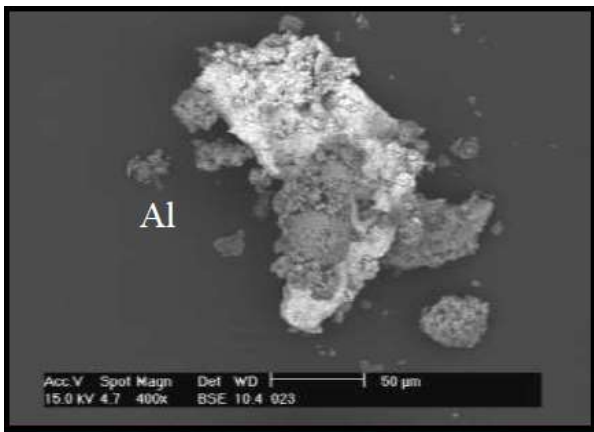


Figura 1.8: Partícula de Al (A. Aragón Piña, 2002)

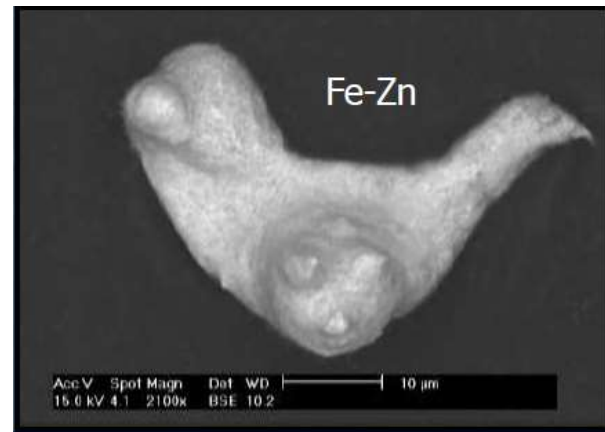


Figura 1.9: Partícula de Fe-Zn (A. Aragón Piña, 2002)

Las Figuras 1.3 a 1.9 muestran algunas microscopías en donde se pueden apreciar distintos tipos de partículas encontradas en la ZMCM.

1.4 Efectos en la salud pública

La contaminación atmosférica es un importante riesgo para la salud alrededor de todo el mundo, esto afecta tanto a países desarrollados como a los países en desarrollo. Se han realizado estimaciones y se ha llegado a que la contaminación del aire tanto en las ciudades como en las zonas rurales ha causado 4.2 millones de muertes prematuras en el mundo por año (OMS, 2016); esto se debe a la contaminación por partículas menores a los 2.5 micrómetros (PM2.5) que son causantes de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer.

El 91% de la mortandad mencionada en el párrafo anterior la sufren los países de ingresos bajos y medianos, como por ejemplo, las regiones de Asia Sudoriental y el Pacífico occidental (OMS, 2016).

Por lo general las partículas PM10 y PM2.5 son indicadores comunes de la contaminación del aire ya que estas son las que más afectan a la salud del ser humano; por estar compuestas de nitratos, sulfatos, hollín y otros componentes, estas pueden penetrar profundamente en los pulmones y alojarse en ellos, incluso se ha demostrado que las partículas PM2.5 pueden penetrar la barrera pulmonar y entrar al sistema sanguíneo ocasionando que la exposición por largo tiempo cause riesgo de muerte.

La OMS ha establecido una serie de parámetros que denomina directrices para que los efectos de salud por contaminantes de tipo material particulado se reduzcan; por ejemplo en la Unión Europea una reducción de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las ciudades que la conforman reduciría un 15% el número de defunciones causadas por estas (OMS, 2016).

Con respecto a lo que sucede en la ZMCM, la contaminación atmosférica que se origina es un problema de relevancia en términos de salud pública; la relación que existe entre la contaminación y los efectos en la salud pública puede demostrarse a través de estudios epidemiológicos, toxicológicos y clínicos controlados y practicados a seres humanos (Riojas, 2013).

Un ejemplo de un contaminante criterio que ocasiona directamente problemas de salud pública es el dióxido de azufre (SO_2), este es relacionado con diversos problemas respiratorios como la disminución de la función pulmonar y el aumento de la resistencia de las vías respiratorias.

Estudios de laboratorio han demostrado que las personas que padecen asma son un grupo muy sensible a la exposición del SO₂; las evidencias sugieren que la exposición al dióxido de azufre puede ocasionar episodios asmáticos en individuos que ya padecen la enfermedad. Sin embargo, no se ha comprobado fehacientemente que la exposición a este contaminante desencadene la enfermedad del asma en personas que aún no la padecen.

El ozono (O₃) puede considerarse otro de los contaminantes atmosféricos que producen efectos nocivos para la salud y que por tanto se convierten en problemas de salud pública por ser un compuesto altamente reactivo químicamente y sus productos de reacción pueden penetrar en la región de intercambio gaseoso de los pulmones cuando este entra en el tracto respiratorio reaccionando con las sustancias químicas presentes en los tejidos y produciendo daños en las vías respiratorias.

En pruebas del laboratorio a humanos con exposición a bajos niveles de ozono, se identificó que este provoca una disminución reversible en la función pulmonar. Voluntarios que fueron expuestos a niveles entre 0.06 ppm y 0.12 ppm durante 6.6 horas reportaron disminuciones en la función pulmonar con el aumento de los niveles de exposición en condiciones de ejercicio moderado (SEDEMA, 2016).

En lo que se refiere a términos de mortalidad por exposición a niveles altos de ozono en la ZMCM se ha reportado una probable relación casual con las exposiciones de ozono a corto plazo.

- Reducción de la función pulmonar
- Agravamiento del asma y bronquitis crónica
- Muerte prematura
- Silicosis y asbestosis
- Catarro y exacerbación del asma
- Infecciones respiratorias
- Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)

Dependiendo del tipo de fuente que emite el contaminante, éste puede penetrar de forma diferente en el sistema respiratorio de los seres humanos (ver figura 1.10).

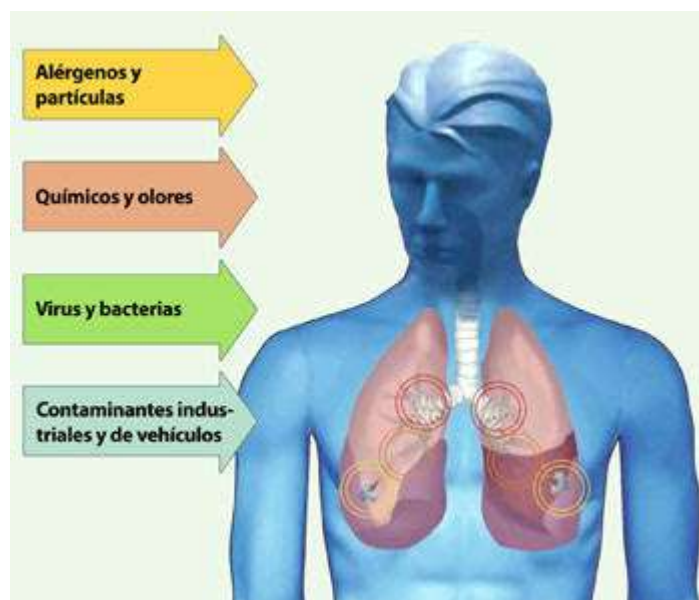


Figura 1.10: Afectación al sistema respiratorio por contaminación atmosférica (OMS, 2016).

1.5 Marco normativo

En México, existen las Normas Oficiales Mexicanas, que son las encargadas de regular los límites permisibles, métodos de medición, efectos de salud, entre otros para cualquier proceso o sustancia que se emite o se aprovecha dentro de la República Mexicana, con estas normas se garantiza el cuidado del medio ambiente y la correcta ejecución de los procesos que se realizan a lo largo de todo el país.

En materia de salud pública, y específicamente para la emisión de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) existe la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, que se encarga de establecer los límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire, así como también sus criterios de evaluación.

Como se sabe, el tiempo de exposición a cualquier contaminante que se encuentra suspendido en la atmósfera es muy importante ya que está relacionado directamente con el daño que produce en la salud del ser humano, por lo que la norma establece dos tipos de valores: un valor diario denominado límite a 24 horas y otro valor anual.

A continuación se muestran los límites establecidos por la Secretaría de Salud para el límite anual y de 24 horas para las partículas suspendidas PM_{2.5} y PM₁₀.

Tabla 10: Límites permisibles NOM-025-SSA1-2014 para partículas suspendidas

| Partícula | Límite a 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Límite anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-----------|--|---|
| PM2.5 | 45 | 12 |
| PM10 | 75 | 40 |

Fuente: (SSA, 2014)

Para las partículas suspendidas PM10 en el año 2016 la norma sigue sin cumplirse ya que se han reportado valores promedio a 24 horas de hasta $123 \mu\text{m}/\text{m}^3$ principalmente ocasionadas por el corredor industrial Xalostoc (SEDEMA, 2016), como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Valores registrados para PM10 en 2016

| | NOM | |
|-------------------|--|---|
| | Máximo 24 h ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) | Promedio anual ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) |
| Límite permisible | 45 | 12 |
| ZMCM | 96 | 24.2 |
| Ciudad de México | 85 | 21.5 |
| Área conurbada | 96 | 24.2 |

Fuente: Elaboración propia con base en el informe de la calidad del aire 2016 de la SEDEMA

1.6 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)

Es el sistema encargado de obtener mediciones permanentes para los principales contaminantes del aire con el fin de cumplir las Normas Oficiales Mexicanas y las normas de salud establecidas para la Zona Metropolitana del Valle de México, evaluar la calidad del aire, cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación, prevenir posibles riesgos ocasionados por la contaminación del aire, informar a la población de manera veraz y oportuna, generar datos confiables y constantes para su evaluación.

Dicho sistema cuenta con 40 sitios de monitoreo repartidos en la zona metropolitana, asimismo se subdivide en diferentes redes para operar de manera más eficiente, estos se mencionan a continuación:

1.6.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), es la encargada de recopilar datos de la concentración de contaminantes atmosféricos que se generan en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y proporcionar información confiable para su análisis, de esta manera se puede determinar la calidad del aire diariamente; cuenta con 45 estaciones de medición distribuidas de manera estratégica en la Ciudad de México y el Estado de México.

Dichas estaciones se pueden encontrar en la siguiente tabla:

Tabla 12: Estaciones de monitoreo de la RAMA

| Clave | Nombre | Alcaldía o municipio | Entidad |
|-------|------------------------------------|-----------------------|---------|
| ACO | Acolman | Acolman | EDOMEX |
| AJU | Ajusco | Tlalpan | CDMX |
| AJM | Ajusco Medio | Tlalpan | CDMX |
| ATI | Atizapán | Atizapán de Zaragoza | EDOMEX |
| BJU | Benito Juárez | Benito Juárez | CDMX |
| CAM | Camarones | Azcapotzalco | CDMX |
| CCA | Centro de Ciencias de la Atmósfera | Coyoacán | CDMX |
| TEC | Cerro del Tepeyac | Gustavo A. Madero | CDMX |
| CHO | Chalco | Chalco | EDOMEX |
| COR | CORENA | Xochimilco | CDMX |
| CUA | Cuajimalpa | Cuajimalpa de Morelos | CDMX |
| CUT | Cuautitlán | Tepotzotlán | EDOMEX |
| DIC | Diconsa | Tlalpan | CDMX |
| EAJ | Ecoguardas Ajusco | Tlalpan | CDMX |
| EDL | Ex Convento Desierto de los Leones | Cuajimalpa de Morelos | CDMX |
| FAC | FES Acatlán | Naucalpan de Juárez | EDOMEX |
| GAM | Gustavo A. Madero | Gustavo A. Madero | CDMX |
| HGM | Hospital General de México | Cuauhtémoc | CDMX |
| INN | Investigaciones Nucleares | Ocoyoacac | EDOMEX |
| IZT | Iztacalco | Iztacalco | CDMX |
| LPR | La Presa | Tlalnepantla de Baz | EDOMEX |
| LAA | Laboratorio de Análisis Ambiental | Gustavo A. Madero | CDMX |
| IBM | Legaria | Miguel Hidalgo | CDMX |

| Clave | Nombre | Alcaldía o municipio | Entidad |
|-------|------------------------------|-------------------------|---------|
| LOM | Lomas | Miguel Hidalgo | CDMX |
| LLA | Los Laureles | Ecatepec de Morelos | EDOMEX |
| MER | Merced | Venustiano Carranza | CDMX |
| MGH | Miguel Hidalgo | Miguel Hidalgo | CDMX |
| MPA | Milpa Alta | Milpa Alta | CDMX |
| MON | Montecillo | Texcoco | EDOMEX |
| MCM | Museo de la Ciudad de México | Cuauhtémoc | CDMX |
| NEZ | Nezahualcóyotl | Nezahualcóyotl | EDOMEX |
| PED | Pedregal | Álvaro Obregón | CDMX |
| SAG | San Agustín | Ecatepec de Morelos | EDOMEX |
| SNT | San Nicolás Totolapan | La Magdalena Contreras | CDMX |
| SFE | Santa Fe | Cuajimalpa de Morelos | CDMX |
| SHA | Secretaría de Hacienda | Miguel Hidalgo | CDMX |
| TAH | Tláhuac | Xochimilco | CDMX |
| TLA | Tlalnepantla | Tlalnepantla de Baz | EDOMEX |
| TLI | Tultitlán | Tultitlán | EDOMEX |
| UIZ | UAM Iztapalapa | Iztapalapa | CDMX |
| UAX | UAM Xochimilco | Coyoacán | CDMX |
| VIF | Villa de las Flores | Coacalco de Berriozábal | EDOMEX |
| XAL | Xalostoc | Ecatepec de Morelos | EDOMEX |

Fuente: (SEDEMA, 2018)

La red utiliza equipos de medición que permiten medir los siguientes tipos de contaminantes: dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y partículas suspendidas (PM10 y PM2.5).

Dichos equipos de medición se encargan de enviar la información obtenida a una computadora central de manera continua y constante, la red funciona las 24 horas del día durante todo el año por lo que los datos se transmiten de manera ininterrumpida.

1.6.2 Objetivos que se plantea la RAMA

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico se plantea objetivos con el fin de cumplir con los estándares mundiales de calidad, así como también realizar un buen trabajo para mantener informada a la población de la ZMCM (SEDEMA, 2018)

- Evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental (NOM) en la ZMCM.
- Evaluar continuamente el estado de la calidad del aire en la ZMCM con respecto a la concentración de los contaminantes criterio.
- Generar información para cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación del aire ambiente en la zona representativa de la estación.
- Informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación en la zona representativa de la estación y sus posibles riesgos a través del índice de calidad del aire.
- Proporcionar información inmediata para la activación o desactivación de alertas o procedimientos de emergencia asociados a un incremento en la concentración de los contaminantes que puedan representar un riesgo para la salud o el medio ambiente, derivado de actividades humanas.
- Informar de manera oportuna a la población sobre el estado que guarda la calidad del aire.
- Generar información para la evaluación del transporte de contaminantes urbanos y la evaluación de concentraciones de fondo.
- Generar datos para la evaluación y seguimiento de las estrategias de gestión de la calidad del aire instrumentadas en la ZMCM.
- Evaluar la tendencia histórica de los contaminantes criterio en la ZMCM.

1.6.3 Monitoreo de contaminantes criterio

La RAMA ha establecido una gama de contaminantes a los cuales ha catalogado como los más importantes para realizar su monitoreo, a estos contaminantes los ha denominado como “contaminantes criterio”, además también es responsable de medir los contaminantes criterio en la ZMCM, esto lo hace con diferentes tipos de medición según el tipo de contaminante que se esté midiendo.

Los equipos utilizados cumplen con las características requeridas, para un *método de referencia o método equivalente*, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés) y con las requeridas por las Normas Oficiales Mexicanas que se establecen para cada contaminante criterio, en caso de que esta se encuentre disponible.

El principio de operación que tiene cada uno de los instrumentos que se utilizan para medir algún contaminante criterio está basado principalmente en alguna propiedad física o química del compuesto a analizar.

Tabla 13: Principio de operación que utilizan los equipos para medir a los contaminantes criterio.

| Contaminante | Principio de operación | Descripción del método |
|--|------------------------------|--|
| Dióxido de azufre (SO₂) | Fluorescencia UV | Método equivalente: medición de la fluorescencia emitida por las moléculas de SO ₂ cuando son excitadas por una fuente de radiación ultravioleta. |
| Monóxido de carbono (CO) | Absorción en el infrarrojo | Método de referencia: medición de la absorción de luz infrarroja por parte del monóxido de carbono en una celda de correlación. |
| Dióxido de nitrógeno (NO₂) | Quimioluminiscencia | Método de referencia: medición de la luz emitida durante la reacción entre el NO y el O ₃ . La separación de las especies nitrogenadas se realiza a través de la medición diferencial de NO y NO ₂ (previa reducción catalítica). El valor del NO _x corresponde a la suma de NO+NO ₂ . |
| Ozono (O₃) | Fotometría UV | Método equivalente: absorción de luz ultravioleta en una longitud de onda de 254 nm, la disminución en la intensidad es proporcional a la concentración de ozono de acuerdo a la ley de Beer-Lambert. |
| Partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} | Gravimetría | Método equivalente: determinación de la masa de partículas presente en un flujo de aire. Las partículas son separadas de la corriente y depositadas sobre un filtro colocado en un elemento oscilante, la variación en la frecuencia de oscilación es proporcional a la masa. El tamaño de la partícula está determinado por la entrada selectiva y el flujo de muestra. |
| Partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} | Atenuación de radiación beta | Método equivalente: atenuación en la intensidad de la radiación beta por las partículas depositadas en un filtro continuo. |

Fuente: Elaboración propia con base en <http://www.aire.cdmx.gob.mx>

1.6.4 Otras redes de monitoreo del SIMAT

El SIMAT también cuenta con otras redes, laboratorios y centros de información que se encargan de monitorear, evaluar y/o difundir información relacionada a otros tipos de contaminantes que también son importantes para el bienestar de la ZMCM. Estos son los siguientes:

- **Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)**

Es responsable de coleccionar muestras de partículas suspendidas para realizar posteriormente análisis gravimétricos y determinar su contenido de metales pesados, principalmente el plomo; se encuentra constituida por 11 sitios y como su nombre indica utiliza equipos manuales para la realización de sus funciones.

- **Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)**

Integrada por 19 sitios, es la encargada de monitorear continuamente las variables meteorológicas de superficie (temperatura, humedad relativa, etc.).

- **Red de Depósito Atmosférico (REDDA)**

Recolecta muestras mediante equipos semiautomáticos de depósito seco, que también es conocido como polvo sedimentable y para muestras de depósito húmedo (granizo, lluvia, nieve y rocío), esta red cuenta con 16 sitios de monitoreo.

- **Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA)**

Es el laboratorio encargado de los análisis fisicoquímicos de las muestras obtenidas por las diferentes de redes de monitoreo, está constituido por laboratorios de cromatografía de gases, análisis elemental, estudio de aerosoles y gravimetría.

- **Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA)**

Es el lugar donde se concentran todos los datos reportados por las otras de redes de monitoreo, responsable de validar, procesar y difundir los datos que recibe producto de la información generada por las otras instituciones.

Capítulo 2. Interpolación y extrapolación espacial

El método de interpolación/extrapolación consiste en la estimación de los valores que alcanza una determinada variable (cualquiera que sea) en el eje Z en un conjunto de puntos ubicados en un sistema de coordenadas (X, Y), partiendo de valores medidos a partir de muestras en el lugar de estudio que se seleccione; como por ejemplo los valores de contaminación medidos en estaciones de monitoreo de una red determinada.

Cuando se realizan interpolaciones con un SIG, generalmente se hacen capas *raster* que representan la variable Z que se desea procesar; en este caso cada punto de la capa *raster* es un punto a interpolar.

Existen dos tipos que son muy utilizados para realizar una interpolación de este tipo: a partir de medidas puntuales por ejemplo las variables climáticas o variables de un tipo de suelo, y los modelos de isolíneas como por ejemplo los que se utilizan para hacer curvas de nivel en un mapa topográfico, aunque estos dos tipos son diferentes entre sí, el método de interpolación es similar ya que se basa en la premisa lógica de que entre más cerca se encuentren dos puntos en la superficie terrestre los valores de cualquier variable cuantificable será lo más parecido al resultado real, esto quiere decir que estas variables tienen una correlación espacial.

2.1 Estadística espacial

A diferencia del tiempo, el espacio es más complejo debido a que es un espacio tridimensional respecto de la variable que se interpola y en este pueden existir valores de correlación distintos en varias direcciones.

El problema que se presenta es que mientras en una serie de tiempo se conocen todos los valores que la conforman (diarios, mensuales, etc.), en una serie espacial contamos únicamente con algunos puntos que se obtuvieron mediante un muestreo en un espacio infinito que puede convertirse en finito cuando se establecen límites; por lo tanto en un análisis espacial de este tipo, los indicadores estadísticos comunes como las medias, desviaciones típicas o coeficientes de correlación no son los más viables a utilizar, en lugar de esto se utiliza un estadístico llamado semivariograma.

Esto quiere decir que no todos los puntos deberán tener la misma auto-correlación en todas las direcciones sino que serán variables para todos los puntos.

Para el cálculo del semivariograma se siguen los siguientes pasos (Mitas, 1999):

1. Determinar todos los posibles pares de puntos, es decir, en total $\sum_{i=1}^{n-1} i$, donde n es el tamaño de la muestra.
2. Para cada par (i, j) anotar la distancia $(d_{i,j})$ entre los puntos y el cuadrado de la diferencia de los valores $(dZ^2 = (Z_i - Z_j)^2)$.
3. Establecer una serie de valores críticos de distancia (h) , por ejemplo 500, 1000, 1500, 2000 m, y para asignarles los pares cuya distancia d sea la más similar, de manera que cada valor h recibe n_h pares.
4. Calcular para cada valor de h la función semivariograma como:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{k=1}^{n_h} dZ_k^2}{2n_h}$$

Donde k hace referencia a cada uno de los pares.

Calculando la función y para diferentes valores de h obtenemos un semivariograma teórico. Como puede verse en la ecuación anterior para valores h pequeños la función también alcanzará valores pequeños (esto porque los valores en puntos cercanos tenderán a ser más parecidos) y conforme la variable h aumente también aumentará el valor de la función (ver figura 2.1).

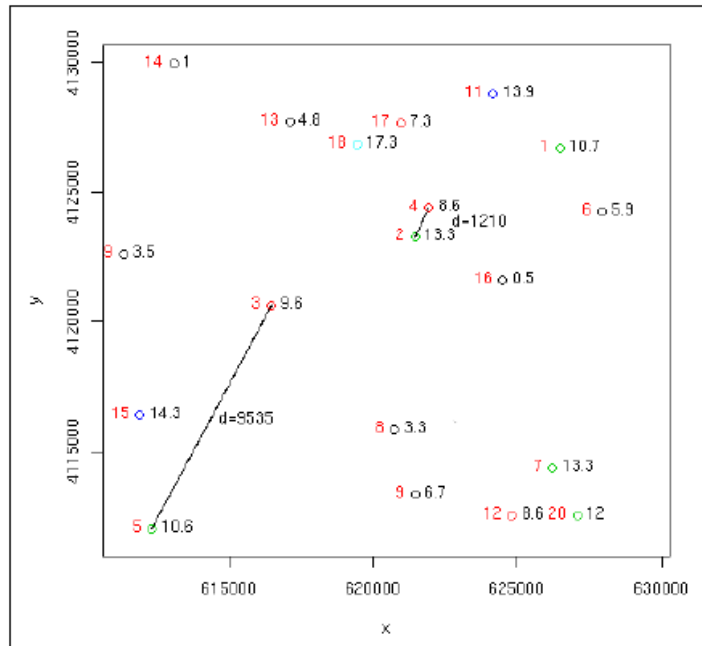


Figura 2.1. Ejemplo de pares de puntos para un semivariograma. (Mitas, 1999)

La interpretación del semivariograma depende de tres conceptos fundamentales:

“efecto pepita”: Esto se refiere al valor que el semivariograma adquiere en el origen y resulta del punto no correlacionado espacialmente que experimenta cualquier variable espacial. Este concepto toma el nombre de la correlación entre el incremento brusco que sufren las pepitas de oro en distancias muy cortas.

Meseta: Es el valor máximo del semivariograma para las distancias más elevadas y que no tienen correlación espacial.

Rango: Es la distancia a la que se alcanza el valor de la meseta.

2.2 Métodos de interpolación a partir de puntos

Existen dos métodos de interpolación desarrollados y se clasifican de la siguiente manera:

- **Métodos globales:** Este tipo de métodos utilizan toda la muestra para estimar el valor de cada nuevo punto.
- **Métodos locales:** Este método solo utiliza los puntos de muestreo que se encuentran más cercanos.

Métodos globales

Asumen la dependencia de la variable a interpolar (Z) de otras variables de apoyo.

Generalmente las variables de apoyo son cualitativas como por ejemplo usos de suelo, tipos de rocas etc. Para este caso se supone que la variable ha adoptado el valor medio en cada punto correspondiente al valor de la variable de apoyo en ese punto. Por ejemplo si se está interpolando el contenido de arcilla de varios suelos, puede utilizarse el tipo de suelo como variable de apoyo y asignar a cada suelo su contenido medio de arcilla.

Métodos locales: Interpolación local por *splines*

El método de los *splines* ajusta funciones polinómicas en las que las variables independientes son el sistema coordinado conocido (X, Y). La forma de la superficie final depende de un parámetro de tensión que hace que el comportamiento de la superficie interpolada tienda a asemejarse a una membrana más o menos tensa o aflojada que pasa por lo puntos de observación (ver figura 2.2).

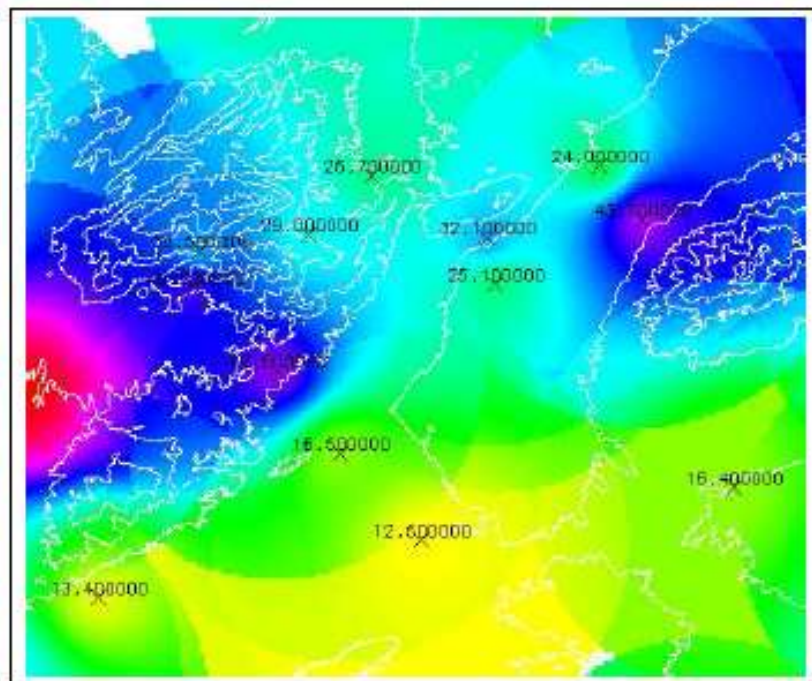


Figura 2.2. Ejemplo una interpolación por *splines* (Mitas, 1999)

La ventaja principal de utilizar el método de interpolación por splines es que los valores que se obtienen basándose en las medias ponderadas no son ni mayores ni menores que los valores que se utilizaron para cada uno de los puntos de muestreo.

Capítulo 3. Metodología

A pesar de que existe una amplia gama de sensores e instrumentos que sirven para medir cantidades de material particulado en la atmósfera como el SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) o el CPC (Condensation Particle Counter) aún se requiere de un presupuesto elevado para adquirirlos y existe poca disponibilidad en estos. Por esa razón se propuso analizar la relación que existe en las mediciones que se obtienen cada hora en las diferentes estaciones de la RAMA ubicadas a lo largo de toda la ZMCM y los resultados obtenidos con el software de interpolación SURFER™.

3.1 Obtención de datos

La presente tesis es derivada del proyecto “**Desarrollo de modelos para la estimación de material particulado suspendido de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México mediante el uso de imágenes satelitales e información geoespacial**”; y en este proyecto se eligieron las fechas en que el satélite Landsat 8 pasa sobre la ZMCM para la obtención de los datos de los contaminantes PM2.5 y PM10-, por consecuencia en esta tesis se sigue la misma premisa para la selección de los datos a analizar; cabe mencionar que esta plataforma (Landsat 8) no fue utilizada para el procesamiento y análisis de los datos producto del presente trabajo.

Dicho satélite pasa sobre un lugar determinado cada 16 días desde que inició sus operaciones en el mes de febrero del año 2013 por lo que fue necesario determinar las fechas y hora exacta en que pasó sobre la ZMCM; para esto se tiene que buscar el área de estudio en el mapa y determinar la ruta (path) y la fila (row) que utiliza el satélite para identificar a la ZMCM, las antes mencionadas son 26 y 47 respectivamente aproximadamente a las 17:00:00 horas (GMT+0); iniciando en la fecha 20 de mayo de 2013.

La obtención de las fechas para las que el satélite Landsat 8 pasa sobre la ZMCM se realizó mediante la consulta del calendario de adquisiciones (acquisition calendar) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés); obteniendo 115 fechas de

análisis en total tanto para PM2.5 como para PM10 desde el mes de mayo de 2013 hasta el mes de mayo de 2018.

Contaminantes PM2.5 y PM10

Para la obtención de estos datos, se tiene que utilizar la base de datos con la que cuenta la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y las estaciones de esta que reportaron datos para PM2.5 y PM10 durante los años 2013 y 2018, dicha red es perteneciente a la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, como se menciona en el punto anterior los datos obtenidos coinciden con las fechas en que el satélite Landsat 8 pasa sobre la ZMCM.

Consideraciones de la obtención de datos para los contaminantes PM2.5 y PM10

- Se tomaron en cuenta los datos obtenidos de la página web oficial de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) <http://www.aire.cdmx.gob.mx>.
- Se tomaron los datos que coinciden con las fechas y horas en que el satélite Landsat 8 OLI pasa sobre la ZMCM.
- Para este análisis se omitieron los datos no reportados por las diferentes estaciones de monitoreo.
- Los datos que se obtuvieron para concentraciones de partículas PM2.5 y PM10 tienen unidades de microgramos por cada metro cubico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), de acuerdo con el catálogo de unidades que se reporta en la página web oficial de la SEDEMA.
- Se tomaron en cuenta todas las estaciones que reportaron datos desde el mes de mayo 2013 hasta el mes de mayo de 2018.
- Los datos reportados por la RAMA se encuentran validados, por lo que se asume que las mediciones realizadas son correctas.

Precipitación

Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM-CISESE)

Es un sistema de software que permite el manejo de datos climatológicos, fue desarrollado por la Organización de la Naciones Unidas, esta herramienta permite obtener datos de temperatura, precipitación, evaporación, etc. a través de las estaciones que se encuentran distribuidas a lo largo de toda la República Mexicana.

Este sistema reporta datos de manera diaria iniciando todos los días a las 8:00 a.m.; por lo que los datos de precipitación se muestran como precipitación acumulada a 24 horas.

Por lo tanto se tomaron en cuenta todos los datos desde el mes de mayo de 2013 hasta el año 2015 ya que fue el último año reportado por el sistema en las estaciones con datos más recientes ubicadas en la ZMCM.

Consideraciones de la obtención de datos de precipitación

- Se tomaron en cuenta los datos obtenidos de la página web oficial del sistema CLICOM <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- Los datos que se utilizan son diarios, reportados como precipitación acumulada a 24 horas.
- Se omitieron los valores no reportados.
- Se tomó como último año de registro el año 2015 para todas las estaciones.
- Los datos obtenidos se encuentran validados por el sistema por lo que se asume que las mediciones y procesos se realizaron correctamente.
- La unidad de medida para los datos de precipitación obtenidos se encuentra en milímetros (mm).

Se tomaron en cuenta todas las estaciones ubicadas en la ZMCM que cumplían con los requisitos establecidos (años de reporte y ubicación).

3.2 Sitio de estudio: Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

El Valle de México se encuentra asentado en las coordenadas 19° 20' latitud norte y 99°05' longitud oeste a una elevación de 2,240 msnm con una superficie de 12,496 km².

Se encuentra formado por valles intermontañosos, cañadas y mesetas y en algunos puntos terrenos semiplanos en la zona donde se encontraban los antiguos lagos (Texcoco, Xochimilco y Chalco); la integran parte del Estado de México, el sureste de Tlaxcala y la Ciudad de México.

Dentro de la ZMCM se encuentran las 16 alcaldías que conforman la Ciudad de México y 60 municipios pertenecientes al Estado de México (ver figura 3.1).

| Delegación | | Superficie* (km ²) | Municipio | | Superficie** (km ²) |
|------------|---------------------|--------------------------------|--------------|----------------------|---------------------------------|
| 1 | Álvaro Obregón | 95.9 | 1 | Atizapán de Zaragoza | 89.8 |
| 2 | Azcapotzalco | 33.7 | 2 | Cuautitlán Izcalli | 109.9 |
| 3 | Benito Juárez | 26.5 | 3 | Coacalco | 35.4 |
| 4 | Coyoacán | 53.9 | 4 | Cuautitlán | 37.3 |
| 5 | Cuajimalpa | 70.8 | 5 | Chalco | 234.71 |
| 6 | Cuauhtémoc | 35.5 | 6 | Chicoloapan | 60.8 |
| 7 | Gustavo A. Madero | 88.1 | 7 | Chimalhuacán | 46.6 |
| 8 | Iztacalco | 23.2 | 8 | Ecatepec | 155.4 |
| 9 | Iztapalapa | 113.5 | 9 | Huixquilucan | 143.5 |
| 10 | M. Contreras | 63.5 | 10 | Ixtapaluca | 315.1 |
| 11 | Miguel Hidalgo | 46.3 | 11 | La Paz | 26.7 |
| 12 | Milpa Alta | 287.5 | 12 | Nicolás Romero | 233.5 |
| 13 | Tláhuac | 86.3 | 13 | Naucalpan | 149.8 |
| 14 | Tlalpan | 308.7 | 14 | Nezahualcōyotl | 63.4 |
| 15 | Venustiano Carranza | 33.8 | 15 | Tecámac | 153.4 |
| 16 | Xochimilco | 119.2 | 16 | Tlalnepantla | 83.4 |
| | Total | 1,486.4 | 17 | Tultitlán | 71.08 |
| | | | 18 | Valle de Chalco | 44.5 |
| | | | Total | 2,054.3 | |

Fuentes: *INEGI, Censo de población y vivienda 1995, Resultados Definitivos, Tabulados Básicos, 1996.
 **Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, 1999.

Figura 3.1. Delegaciones (alcaldías) y algunos municipios que conforman la ZMCM (INEGI,1999)

De acuerdo con datos de INEGI, la ZMCM tiene alrededor de 22 millones de habitantes (8.851 millones solo en la Ciudad de México (INEGI, 2010)).

El clima con el que cuenta es mayormente templado con temperaturas que se encuentran en un rango de entre los 25°C en el verano y hasta los -5°C en el invierno; con una temperatura media anual entre los 13°C y los 17°C.

Se encuentra rodeada por dos de las cadenas montañosas más importantes del país que son la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental; y por el Eje Volcánico Transversal destacando el volcán Popocatepetl y el Iztaccihuatl.

La zona urbana se extiende a lo largo de una cuenca semi-cerrada; esta está sujeta de manera natural a condiciones que no favorecen una adecuada ventilación de la atmósfera debido a que está rodeada de sistemas montañosos en su totalidad, alcanzando altitudes que van desde los 3,200 msnm hasta elevaciones que superan los 5,400 msnm, esto favorece que los contaminantes que se encuentran en la atmósfera se queden atrapados.

Las inversiones térmicas que se presentan a lo largo de todo el año son otro factor ya que estas causan un estancamiento temporal de las masas del aire en la atmósfera. Esto causa que no se produzca la inhibición natural y se acumulen los contaminantes; esto tiene perduración hasta que a lo largo de los días las inversiones se fracturan por el calentamiento de la atmósfera.

La radiación solar que se produce en la ZMCM es muy alta por lo que se favorece la producción de ozono. Siendo esto producto de las reacciones de la luz ultravioleta con los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos que son emitidos a la atmósfera diariamente.

La ZMCM es la tercera se ha catalogado como las tercera más grande de la OCDE en cuanto a su población y la más grande mundo fuera de Asia (OCDE, 2016) (ver figura 3.2).

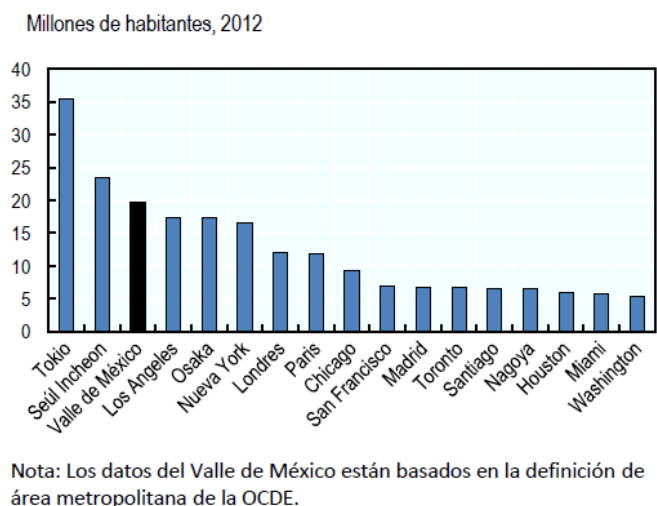


Figura 3.2. Zonas metropolitanas más grandes de la OCDE (OECD (2015a), “Metropolitan Areas” OECD Regional Statistics (database))

Por otro lado, la ZMCM produce alrededor de un cuarto del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Según la definición para la zona metropolitana de la OCDE, la ZMCM representa un 17% de los habitantes y el 18% de los empleados en México (OCDE, 2016).

El sector industrial en el valle de México, se caracteriza principalmente por tener servicios de alto valor agregado, como por ejemplo: servicios financieros y de seguros, áreas de comunicaciones y transportes, bienes raíces y servicios empresariales; estos servicios representan el 25% del total de empleados en la ZMCM (OCDE, 2016).

En cuanto a niveles de marginación se considera que alrededor de la mitad de los municipios y todas las delegaciones excepto una, presentan un grado muy bajo de marginación, es decir, que en todas estas zonas la mayoría de la población tiene acceso a servicios básicos de acuerdo con los estándares mexicanos. Sin embargo, a pesar de esas condiciones, el 40 % de los hogares no cuentan con electricidad, agua entubada o drenaje (OCDE, 2016). Además, los barrios que tienen altos accesos a servicios públicos colindan con los barrios más pobres.

Respecto a la cantidad de población educada, en la Ciudad de México y los municipios conurbados al norte de esta reside la población con más alto nivel académico (nivel medio superior y superior), quienes gozan de ingresos más altos. En comparación, en barrios que se encuentran en la periferia el nivel académico promedio se ubica por debajo de la edad escolar obligatoria mínima (12-15 años) (OCDE 2016) (ver figura 3.3).

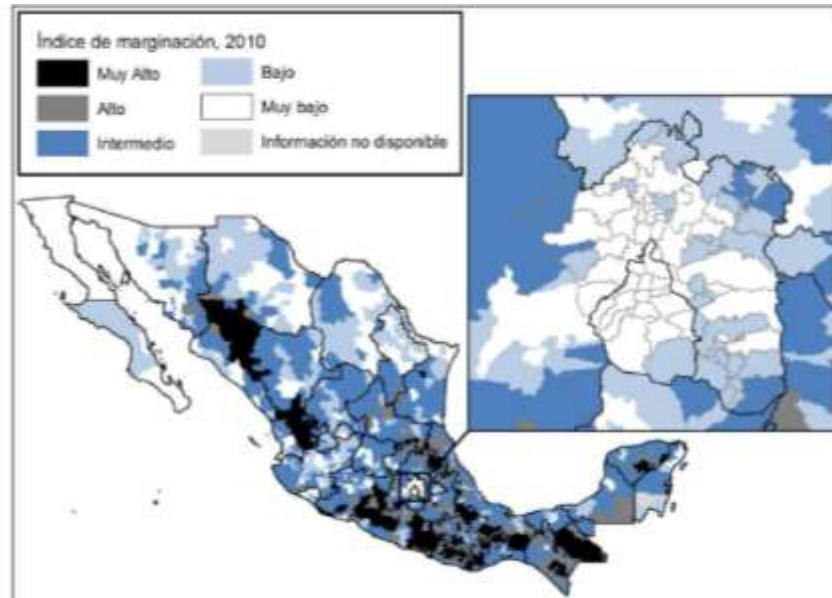


Figura 3.3. Marginación en México y la ZMCM (CONAPO (2015a), Índice de marginación por entidad federativa y municipio, 2010).

Respecto a los servicios de transporte con los que cuenta la ZMCM, estos no han podido ir modernizándose a la par de la explosión demográfica que ha aumentado en los últimos años, además la vivienda no es regulada, debido a esto las viviendas de carácter popular han ido en aumento y se han asentado en lugares donde las leyes de uso de suelo son menos restrictivas.

Gracias a los problemas mencionados en el párrafo anterior la mayoría de los empleados que trabajan en la ciudad de México (zona de mayor empleo en la ZMCM), el 40% de los habitantes tienen que cruzar al menos una frontera municipal para llegar a su destino laboral (OCDE 2016).



Figura 3.4: Sitio de estudio (Zona Metropolitana de la Ciudad de México), (Google Earth, 2018)

3.3 Muestreo

Contaminantes PM2.5 Y PM10

En este paso se procedió a elegir todos los datos reportados en las estaciones de la RAMA para los contaminantes PM2.5 y PM10 desde el mes de mayo del año 2013 hasta el mes de mayo de 2018, que coinciden con la hora y las fechas en que el satélite Landsat 8 pasa sobre la ZMCM resultando una muestra representativa de 5 años efectivos para el análisis. Dicha información se muestra en las tablas 14 y 15.

Tabla 14: Número de datos seleccionados para PM10

| Muestra PM10 | |
|--------------|--------------|
| Año | No. De Datos |
| 2013 | 300 |
| 2014 | 440 |
| 2015 | 489 |
| 2016 | 456 |
| 2017 | 528 |
| 2018 | 216 |
| TOTAL | 2429 |

Tabla 15: Número de datos seleccionados para PM2.5

| Muestra PM2.5 | |
|----------------------|---------------------|
| Año | No. De Datos |
| 2013 | 195 |
| 2014 | 295 |
| 2015 | 374 |
| 2016 | 399 |
| 2017 | 462 |
| 2018 | 189 |
| TOTAL | 1914 |

Precipitación

En el caso de la muestra que se obtuvo para los datos de precipitación se encuentran todos los datos obtenidos para los años 2013 a 2015 para la precipitación acumulada a 24 horas, dichos datos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16: Número de datos seleccionados para precipitación

| Muestra Precipitación | |
|------------------------------|---------------------|
| Año | No. De Datos |
| 2013 | 218 |
| 2014 | 282 |
| 2015 | 312 |
| TOTAL | 812 |

3.3.1 Estaciones

Contaminantes PM2.5 y PM10

Como se menciona en la introducción de este trabajo, el objetivo de este trabajo es conocer la relación entre los datos obtenidos en campo y el programa de interpolación seleccionado, en cuanto a los datos obtenidos en campo, estos no fueron tomados directamente así que como ya se mencionó se tomaron todas las estaciones de la RAMA a cargo de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México que reportan datos para material particulado PM2.5 y PM10, con esta opción se redujeron tiempos y costos en comparación a si se hubieran medido directamente ya que no se cuenta con los equipos especializados para realizarlo por cuenta propia.

Dichas estaciones se muestran a continuación (ver figura 3.5):

Tabla 17: Estaciones que reportan datos para PM2.5 Y PM10

| ESTACIÓN | CLAVE | PM2.5 | PM10 |
|------------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Acolman | ACO | | X |
| Ajusco Medio | AJM | X | X |
| Ajusco | AJU | X | |
| Atizapán | ATI | | X |
| Benito Juárez | BJU | X | X |
| Camarones | CAM | X | X |
| Centro de Ciencias de la Atmósfera | CCA | X | |
| Chalco | CHO | | X |
| Coyoacán | COY | X | |
| Cuajimalpa | CUA | | X |
| Cuautitlán | CUT | | X |
| FES Acatlán | FAC | | X |
| Gustavo A. Madero | GAM | X | |
| Hospital General de México | HGM | X | X |
| Investigaciones Nucleares | INN | X | X |
| Iztacalco | IZT | | X |
| Merced | MER | X | X |
| Miguel Hidalgo | MGH | | X |
| Milpa Alta | MPA | X | X |
| Nezahualcóyotl | NEZ | X | |
| Pedregal | PED | | X |
| San Agustín | SAG | X | X |
| Santa Fe | SFE | X | X |
| Tláhuac | TAH | | X |
| Tlalnepantla | TLA | X | X |
| Tultitlán | TLI | | X |
| UAM Xochimilco | UAX | X | |
| UAM Iztapalapa | UIZ | X | X |
| Villa de las Flores | VIF | | X |
| Xalostoc | XAL | X | X |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Coordenadas UTM para las estaciones que reportan PM2.5 y PM10

| ESTACIÓN | Coordenadas UTM | |
|----------|-----------------|-----------|
| | X | Y |
| ACO | 509226 | 2171149.1 |
| AJM | 478179.8 | 2130948.2 |
| AJU | 482917.1 | 2117949.9 |
| ATI | 473346 | 2164688.9 |
| BJU | 483306 | 2141954 |
| CAM | 482179.8 | 2152665.4 |
| CCA | 481501.9 | 2136930.8 |
| CHO | 511970 | 2130369 |
| COY | 483500 | 2139591 |
| CUA | 469365.6 | 2141275.2 |
| CUT | 479189 | 2180751.1 |
| FAC | 474443.8 | 2154231.5 |
| GAM | 490081.1 | 2154241.3 |
| HGM | 484020 | 2146380 |
| INN | 460020.4 | 2133177.4 |
| IZT | 487647 | 2143367 |
| MER | 487445 | 2147815.1 |
| MGH | 478728 | 2145548.2 |
| MPA | 501031.5 | 2120401.3 |
| NEZ | 497037.7 | 2144394.4 |
| PED | 478556.7 | 2136817.4 |
| SAG | 496818.7 | 2159801.2 |
| SFE | 472393 | 2140390 |
| SJA | 490963.3 | 2150909.3 |
| SUR | 484243 | 2135631.4 |
| TAH | 498889.8 | 2128098 |
| TLA | 478535.1 | 2159383.2 |
| TLI | 481420.7 | 2167509.2 |
| UAX | 489113 | 2134517 |
| UIZ | 492241 | 2140751 |
| VIF | 489874.5 | 2173663.9 |
| XAL | 491355 | 2159031.4 |

Fuente: Elaboración propia

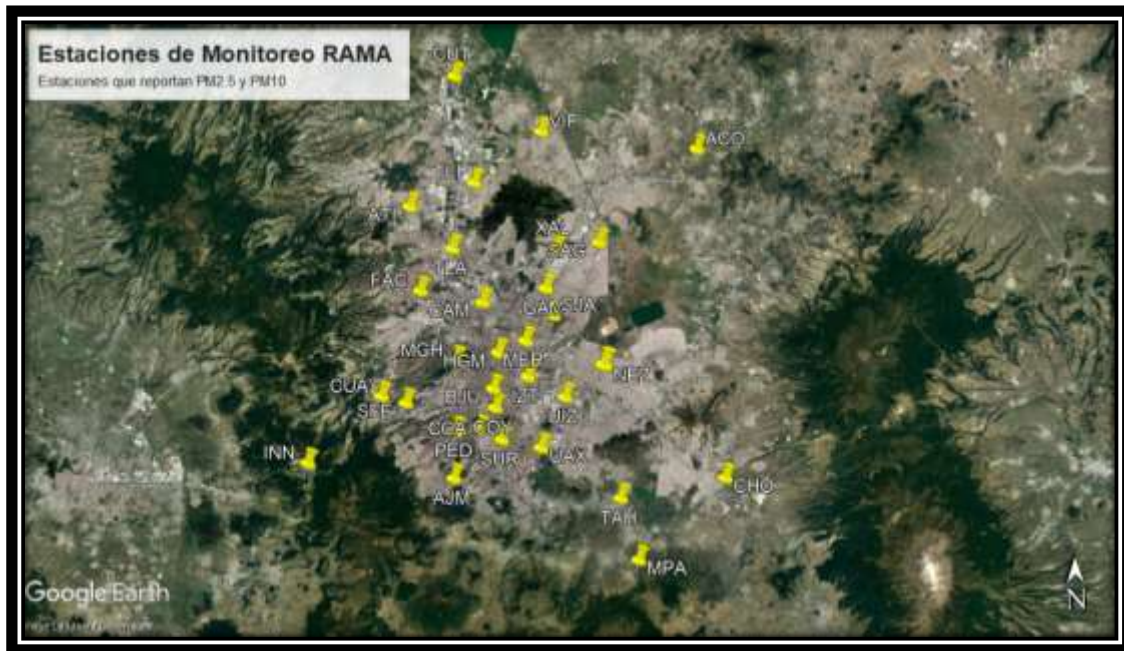


Figura 3.5. Estaciones de monitoreo de la RAMA que reportan PM2.5 y PM10, (Google Earth 2018)

Precipitación

Igual que en el caso de los contaminantes no se tomaron los datos directamente sino que se utilizaron las estaciones ubicadas en la ZMCM pertenecientes al sistema CLICOM-CISESE que utilizan estaciones de tipo pluviométrico y pluviográfico para reportar datos de precipitación acumulada a 24 horas.

Dichas estaciones se muestran a continuación (ver figura 3.6):

Tabla 19: Estaciones Climatológicas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

| ESTACIÓN | Coordenadas UTM | |
|------------------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| CALVARIO 61 | 489487.6 | 2122960.3 |
| COL. EDUCACIÓN | 489494 | 2134025.4 |
| COL. STA. URSULA COAPA | 489494 | 2134025.4 |
| DESV. ALTA AL PEDREGAL | 478988 | 2134034.5 |
| EL GUARDA | 478962.6 | 2111904.3 |
| GRAN CANAL KM. 06+250 | 489506.8 | 2156155.9 |

| ESTACIÓN | Coordenadas UTM | |
|-----------------------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| MILPA ALTA | 500000 | 2122957.3 |
| PLAYA CALETA 454 COL. MARTE | 489500.4 | 2145090.6 |
| SN. FRANCISCO TLALNEPANTLA | 489487.6 | 2122960.3 |
| SN. JUAN DE ARAGÓN | 489506.8 | 2156155.9 |
| STA. ANA TLACOTENCO | 500000 | 2122957.3 |
| TLAHUAC | 500000 | 2134022.3 |

Fuente: Elaboración propia

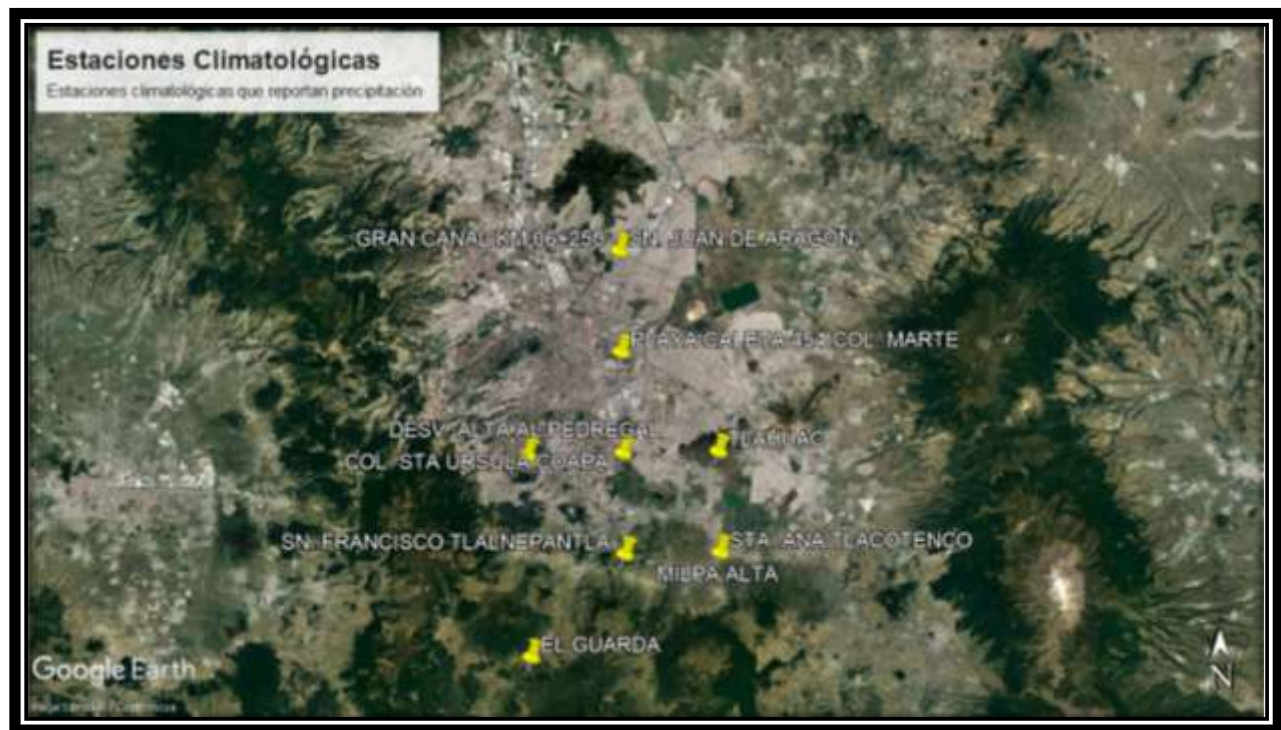


Figura 3.6. Estaciones climatológicas seleccionadas del sistema CLICOM sobre la ZMCM, (Google Earth, 2018)

El SIMAT no menciona los equipos que utiliza para medir los contaminantes pero mediante los métodos equivalentes que se citaron en la tabla 3 en el Capítulo 1 cumplen con las especificaciones y criterios de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos.

Los datos derivados de las estaciones de monitoreo tienen una limitante, y es que los datos no se encuentran uniformizados, es decir, algunas de las estaciones no reportaron durante

algunos años debido a diferentes problemas y/o factores, otras dejaron de operar, por lo que los datos no son iguales para cada una de las estaciones.

En cuanto a los métodos equivalentes se dividen en dos tipos uno para la prueba de gravimetría y otro para la prueba de atenuación de rayos beta; el primero determina la masa de las partículas que se encuentran en el flujo de aire y posteriormente estas son separadas y colocadas en un filtro en un medio oscilante y se establece que las oscilaciones son proporcionales a la masa y de esta manera se determina el tamaño de la partícula, en el segundo caso se mide la intensidad de la radiación de rayos beta emitidas por las partículas es un flujo continuo.

3.3.2 Fechas

Como se menciona en la fracción 3.1 “obtención de datos” se seleccionaron las fechas en las que le satélite Landsat 8 pasó sobre la ZMCM, dicho satélite hizo contacto por primera vez con la ZMCM el día 20 de mayo de 2013 a las 17:00 horas \pm 2 minutos (GMT+0); a partir de esa fecha se utilizaron todas las fechas posteriores hasta el mes de mayo de 2018 tomadas cada 16 días que es el número de días en que el satélite completa la órbita establecida alrededor del planeta para volver a hacer contacto con un sitio específico; esto da un total de 115 fechas a lo largo de los 5 años del estudio.

El software de interpolación SURFER™ es un sistema que permite el modelado de una variable determinada a través de diferentes tipos de interpolación (lineal, logarítmica, avanzada, entre otras) partiendo de datos obtenidos en diferentes puntos, este software además permite la creación de superficies en 3D y permite el trazado de contornos e isolíneas realizadas a partir de la interpolación que el usuario ha definido.

Se seleccionó este software de entre los muchos que existen porque es muy fácil de comprender para el usuario y por su bajo costo y disponibilidad, además a diferencia de otros permite la inserción de archivos geo referenciados e imágenes satelitales con el objetivo de hacer las modelaciones de manera más dinámica y comprensible lo que hace ideal para este trabajo ya que el objetivo es ver el comportamiento de la contaminación por material particulado en el espacio, específicamente a lo largo de toda la ZMCM.

En este trabajo se probaron las interpolaciones de tipo lineal y logarítmica para determinar cuál era la que mejor correlación tenía con el comportamiento real y resultó que la que obtuvo el mejor coeficiente de correlación R fue la interpolación lineal con un valor promedio de 0.73 (esto debido a que las estaciones no son uniformes a lo largo del tiempo).

3.5 Procesamiento de los datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos en las muestras para los contaminantes PM2.5 y PM10 se procedió a calcular los valores promedio mensuales (utilizando los valores horarios) para cada una de las estaciones que reportó datos para los contaminantes mencionados.

También se calculó la desviación estándar (parámetro estadístico que indica cuanto se separan los valores de su media aritmética), resultando un sesgo positivo ya que como se mencionó anteriormente las estaciones no presentan un comportamiento uniforme.

En cuanto a los datos obtenidos en las muestras para la precipitación también se calcularon los valores promedio mensuales (utilizando valores diarios a 24 horas) para cada una de las estaciones que se identificaron dentro de la ZMCM.

Al igual que en el caso de los datos para material particulado, en el caso de precipitación también se evaluó la desviación estándar resultando que se comporta de una manera más estable.

Para la identificación entre la relación precipitación-contaminante se decidió involucrar el periodo de lluvias y estiaje que se registra cada año en la ZMCM; la época de estiaje comprende aproximadamente los meses de noviembre hasta abril y por ende la época de lluvias inicia en mayo y termina en octubre (consolidándose como los meses más lluviosos casi siempre de julio a septiembre).

Dicho lo anterior se decidió graficar 3 meses de lluvia (los más lluviosos) y 3 meses de estiaje (los más secos) por cada año hasta 2015 (último año reportado en precipitación), por otro lado para el caso de la interpolación con el software SURFER™ se decidió realizar un análisis de todos los años (2016 a 2018) utilizando dos meses de cada año que registraron más niveles de contaminación (valores promedio) y dos meses con menor contaminación (valor promedio) para tratar de identificar un patrón de comportamiento y poder establecer medidas de mitigación o planes de contingencia posteriores a este trabajo.

4.1 Relación precipitación-contaminante

Para el caso de la relación precipitación-contaminante, en este capítulo se presentan las graficas para los contaminantes PM2.5 y PM10 unicamente para las estaciones que presentaron todos los valores para los meses de lluvia y estiaje elegidos entre el periodo comprendido entre los años 2013 a 2016 porque como se menciona en la fracción 3.3 el comportamiento de las estaciones no es uniforme a lo largo del tiempo y no operaron continuamente.

Es importante destacar que las demas estaciones no se descartaron del analisis sino que se utilizó el software de interpolacion mencionado para poder estimar un patrón de comportamiento entre ellas.

A continuacion se muestran los resultados en gráficas para la relación precipitación-contaminante (ver figuras 4.1 a 4.15):

PM2.5

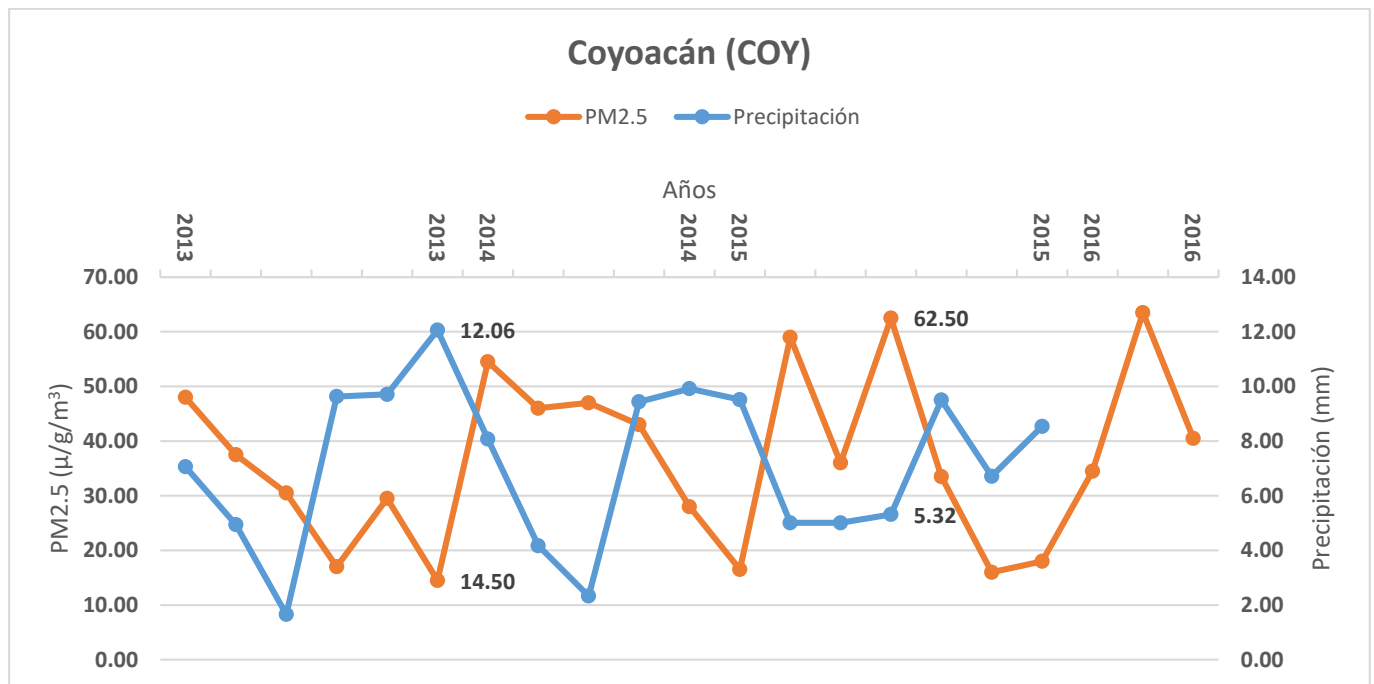


Figura 4.1: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (COY) (Elaboración propia)

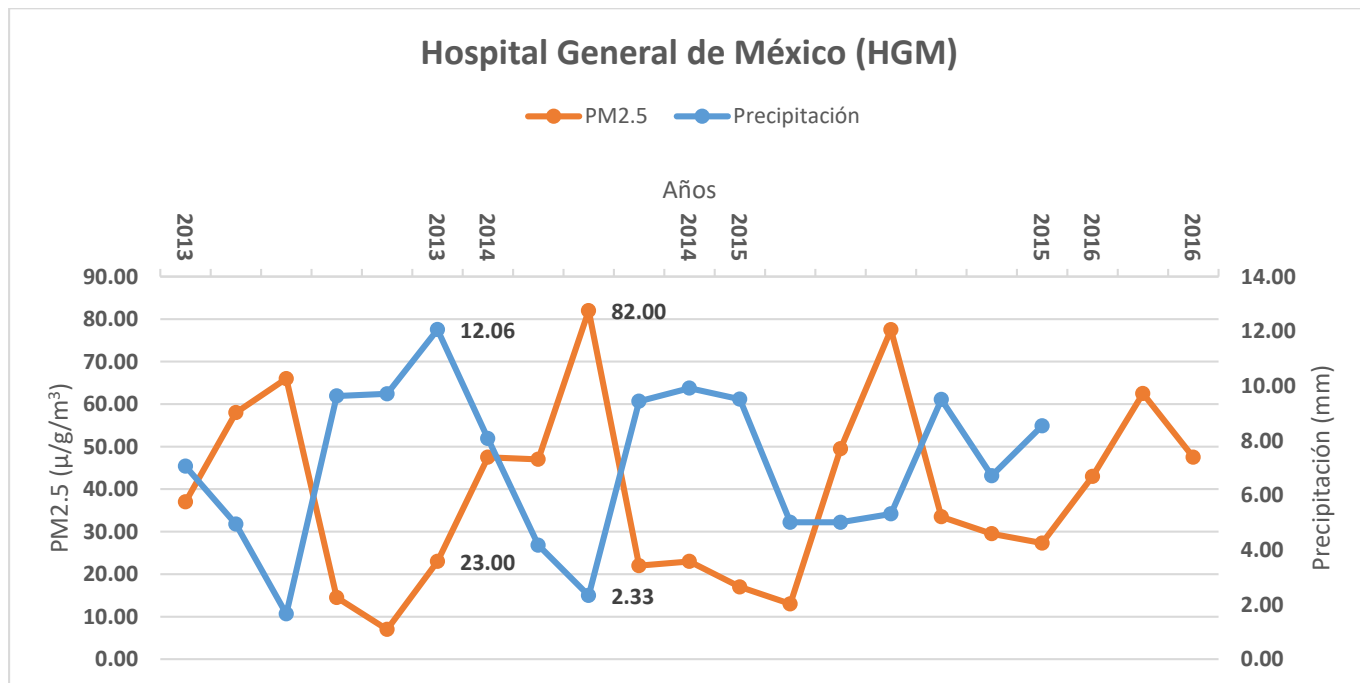


Figura 4.2: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (HGM) (Elaboración propia)

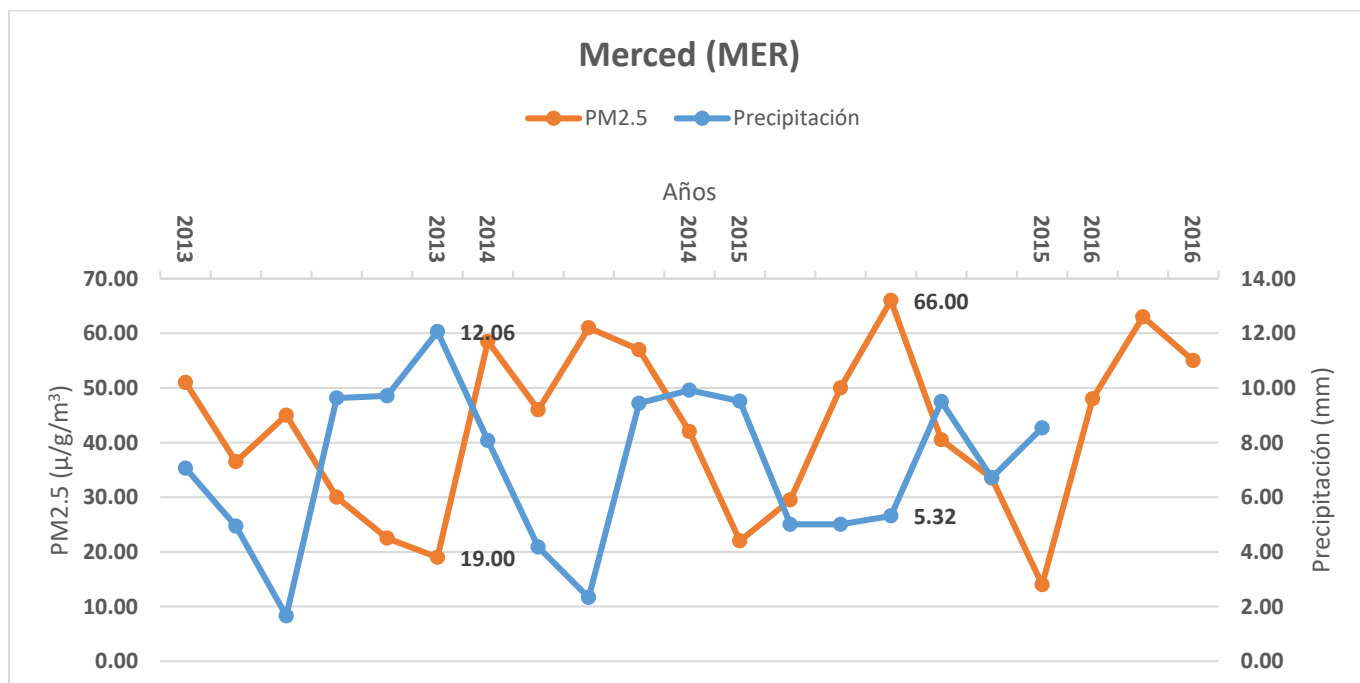


Figura 4.3: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (MER) (Elaboración propia)

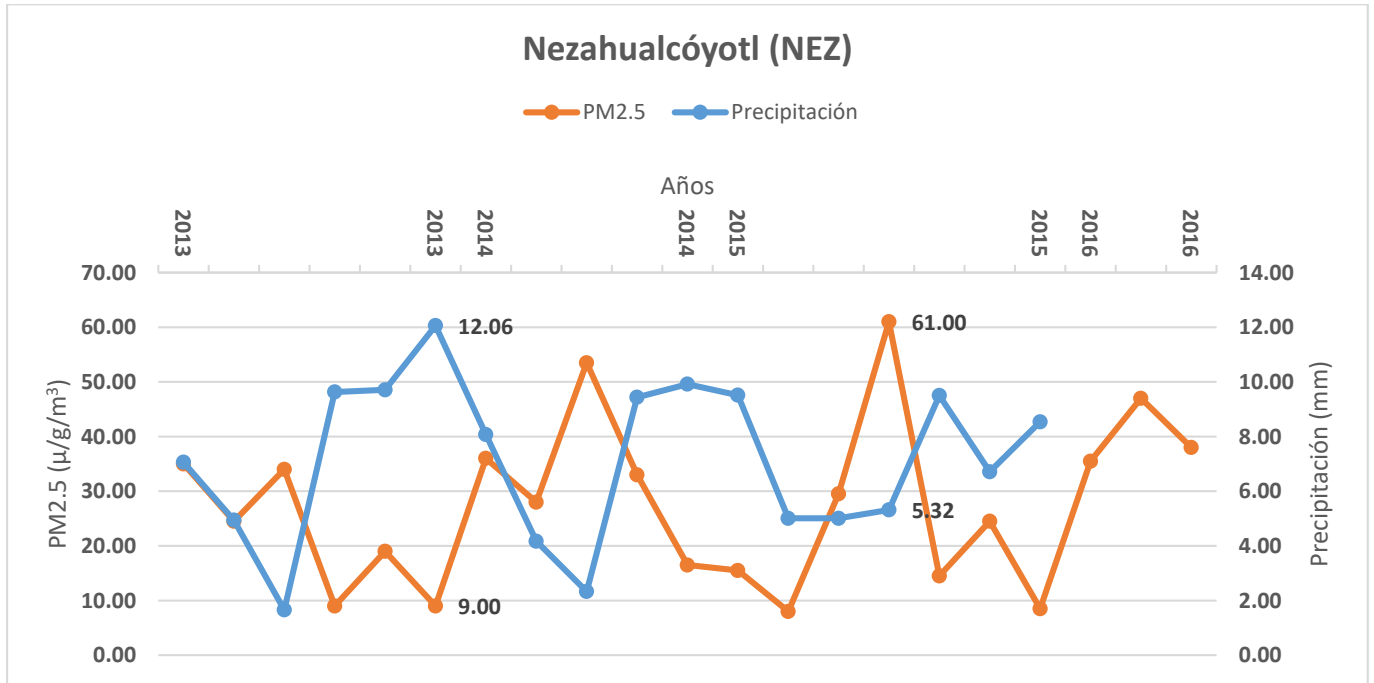


Figura 4.4: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (NEZ) (Elaboración propia)

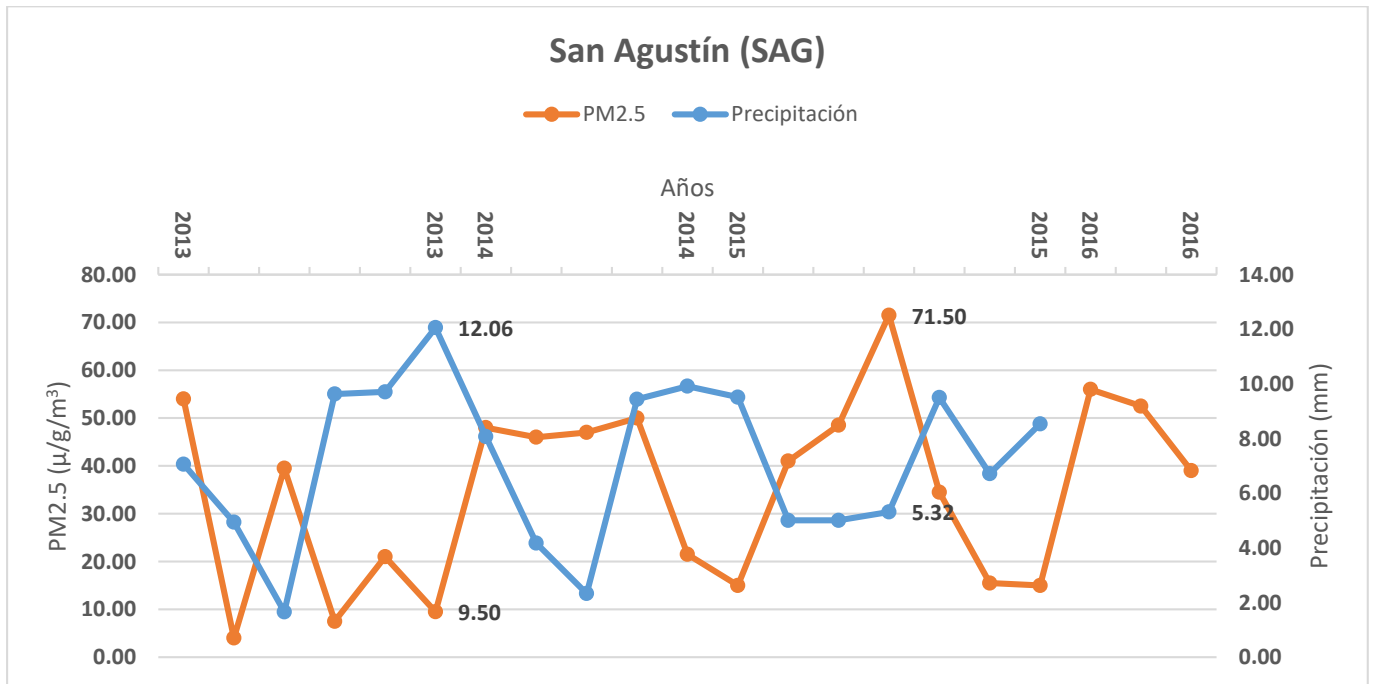


Figura 4.5: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (SAG) (Elaboración propia)

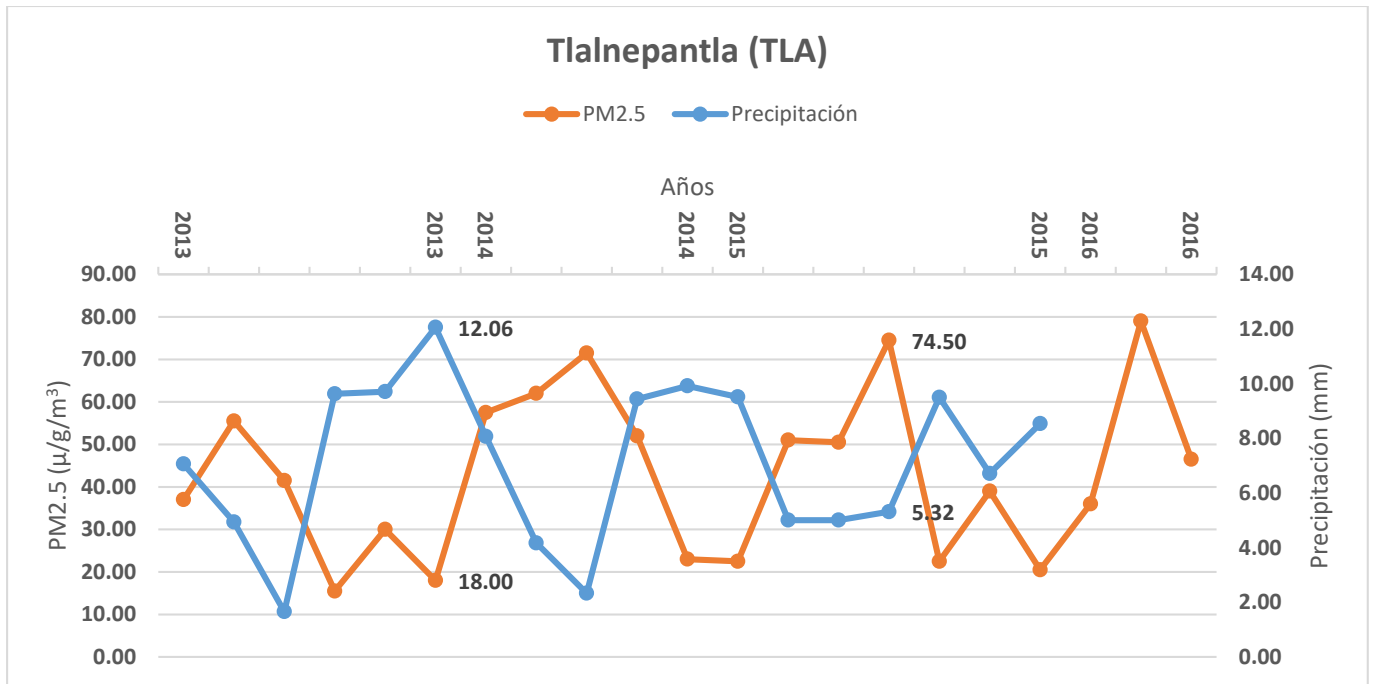


Figura 4.6: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (TLA) (Elaboración propia)

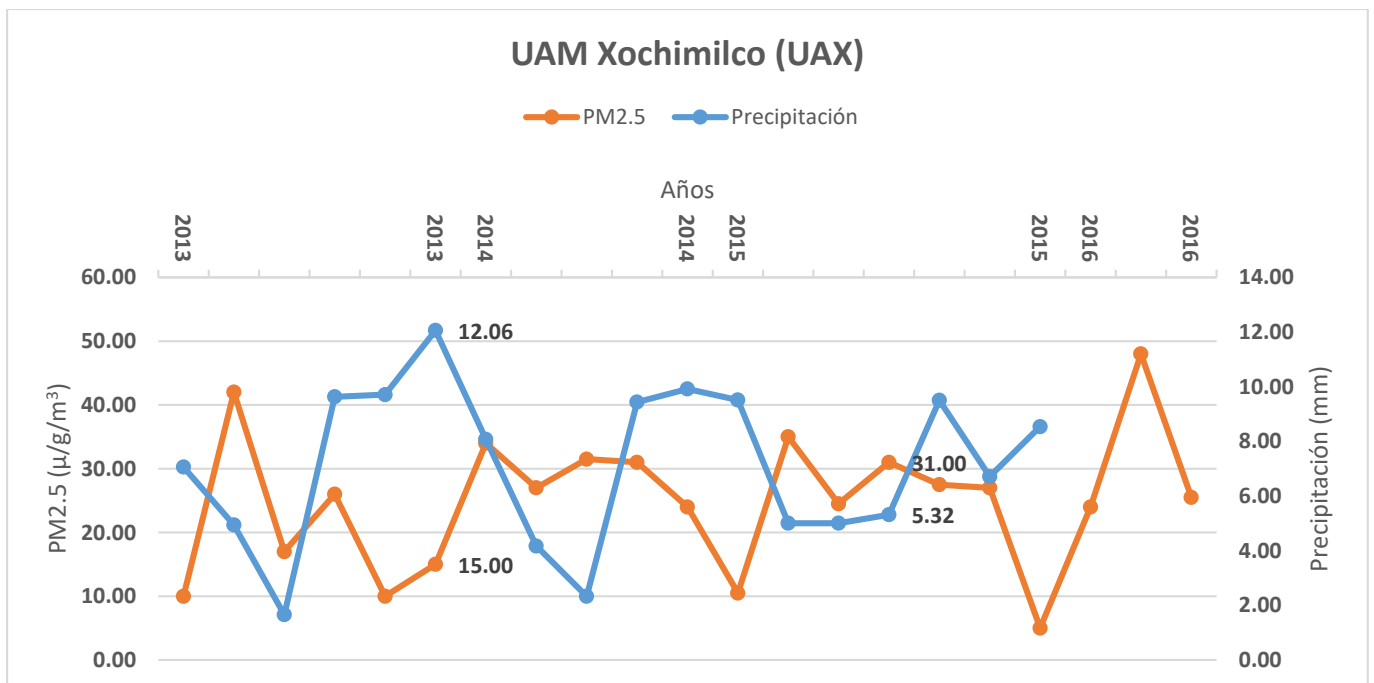


Figura 4.7: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (UAX) (Elaboración propia)

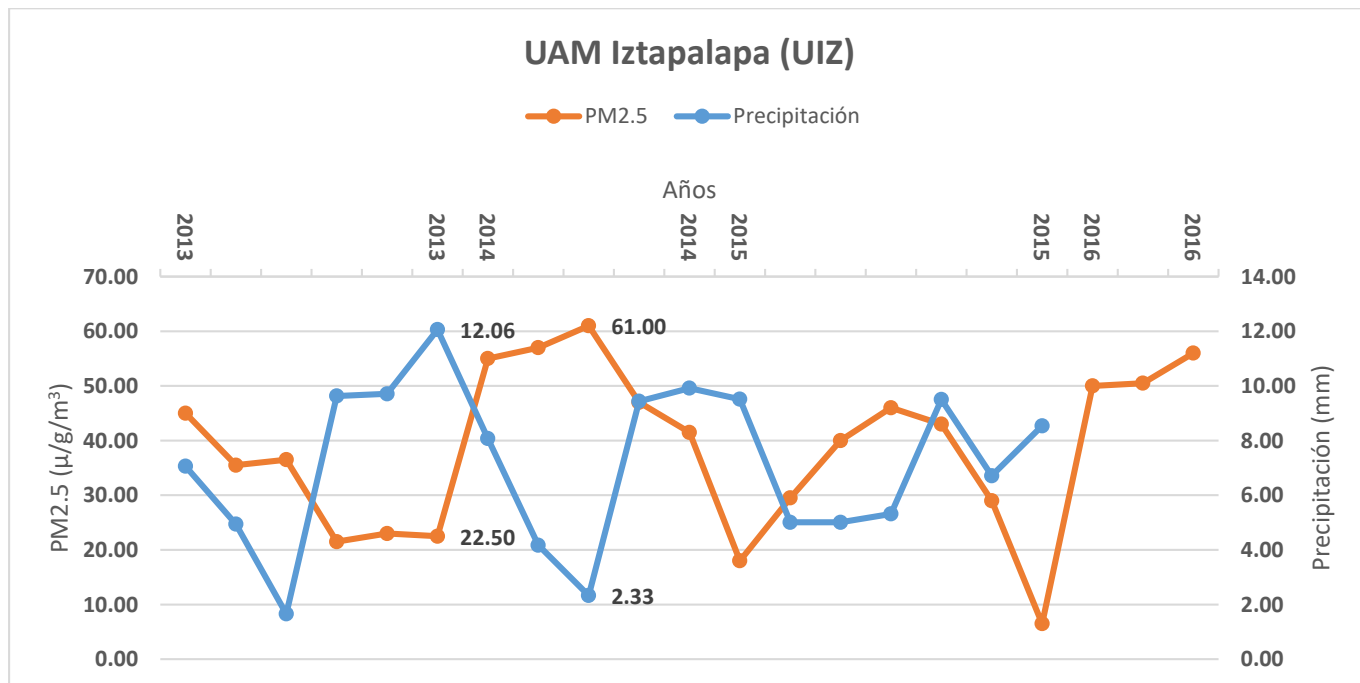


Figura 4.8: Relación precipitación-PM2.5 2013 a 2016 (UIZ) (Elaboración propia)

PM10

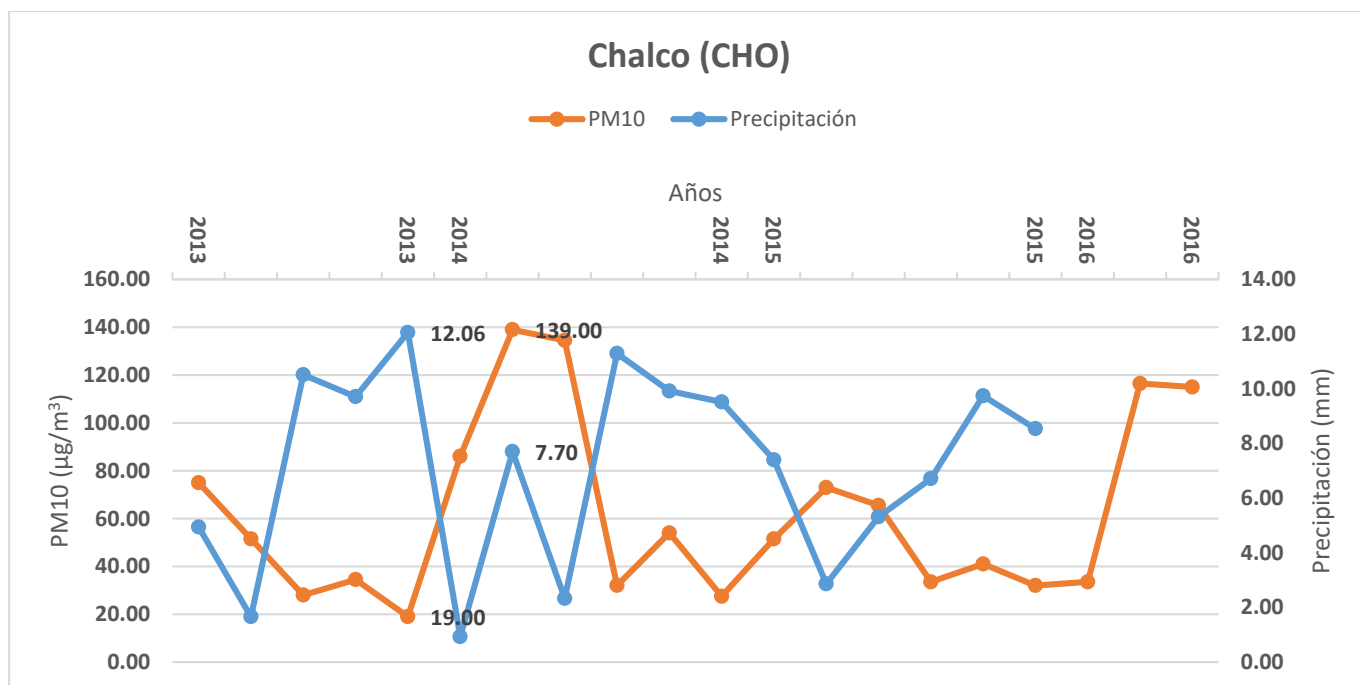


Figura 4.9: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (CHO) (Elaboración propia)

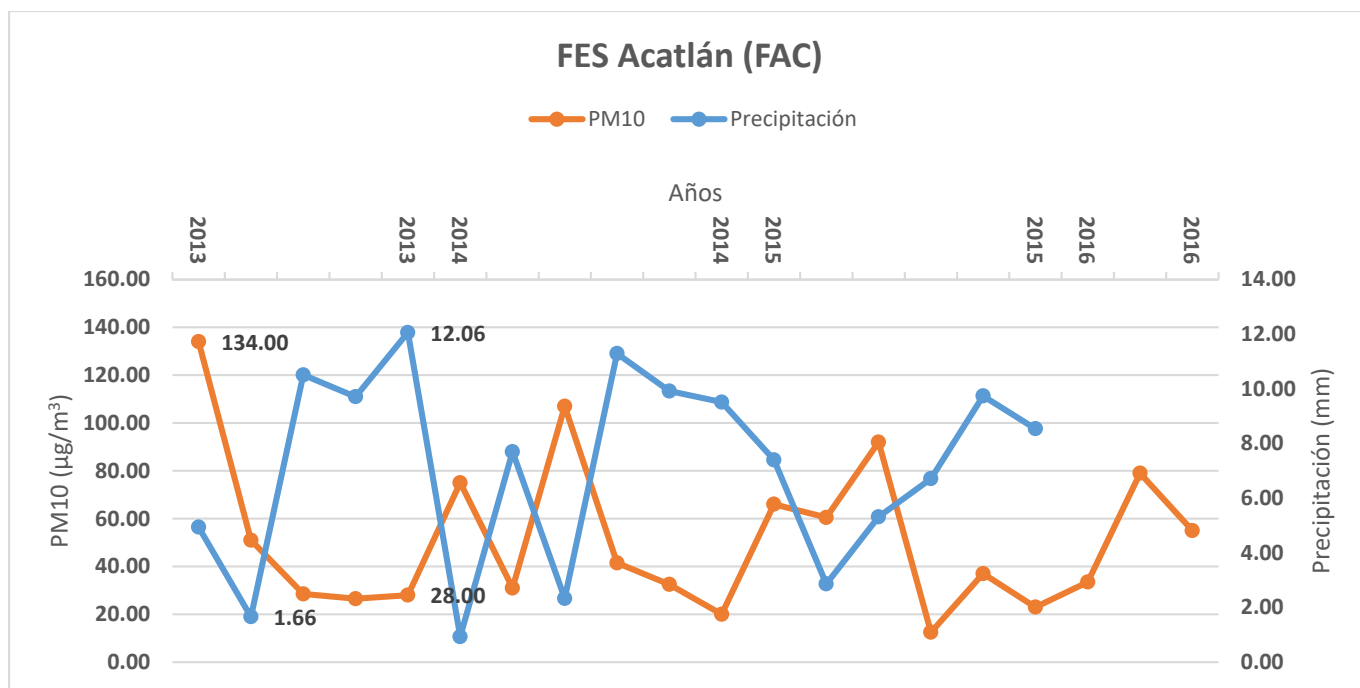


Figura 4.10: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (FAC) (Elaboración propia)

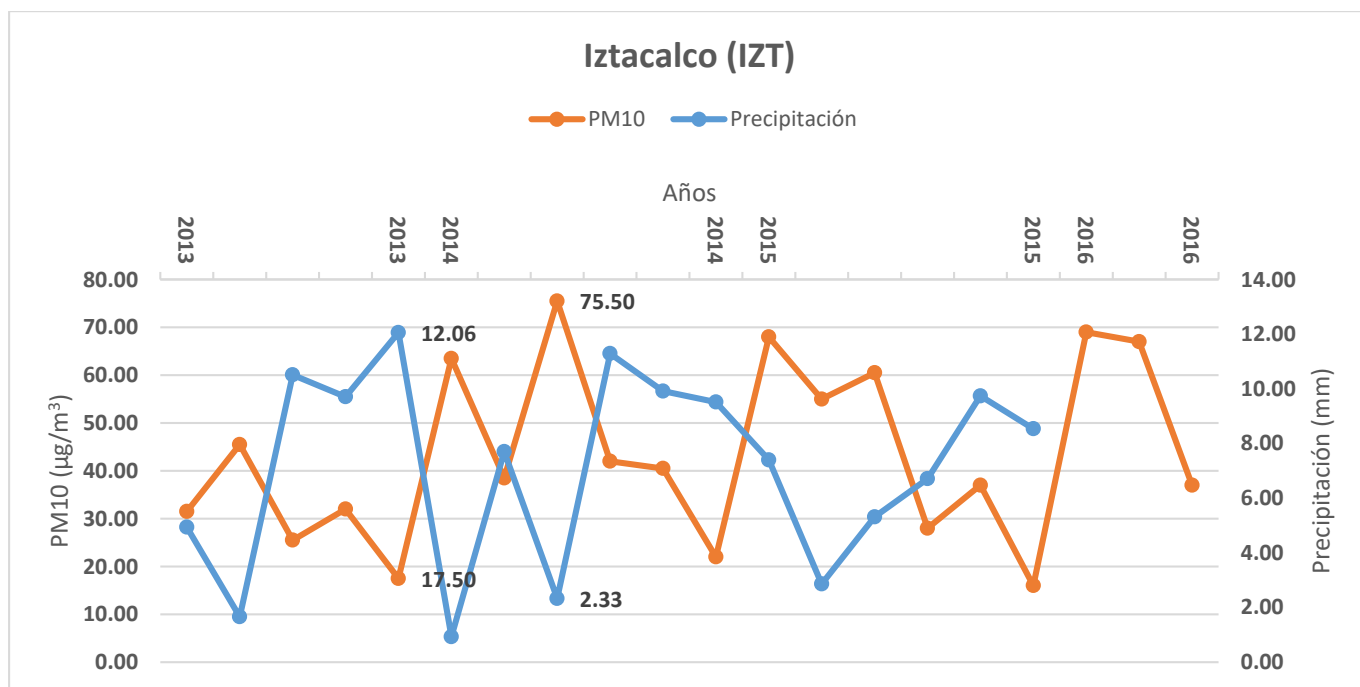


Figura 4.11: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (IZT) (Elaboración propia)

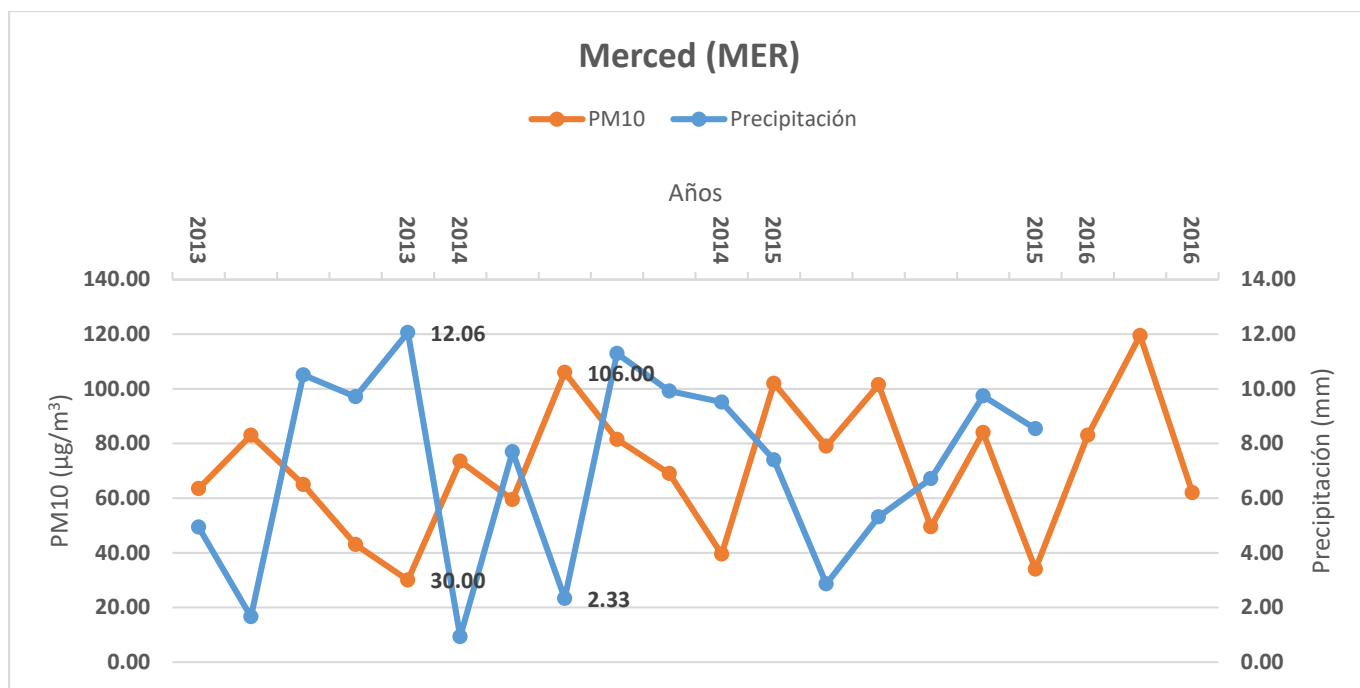


Figura 4.12: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (MER) (Elaboración propia)

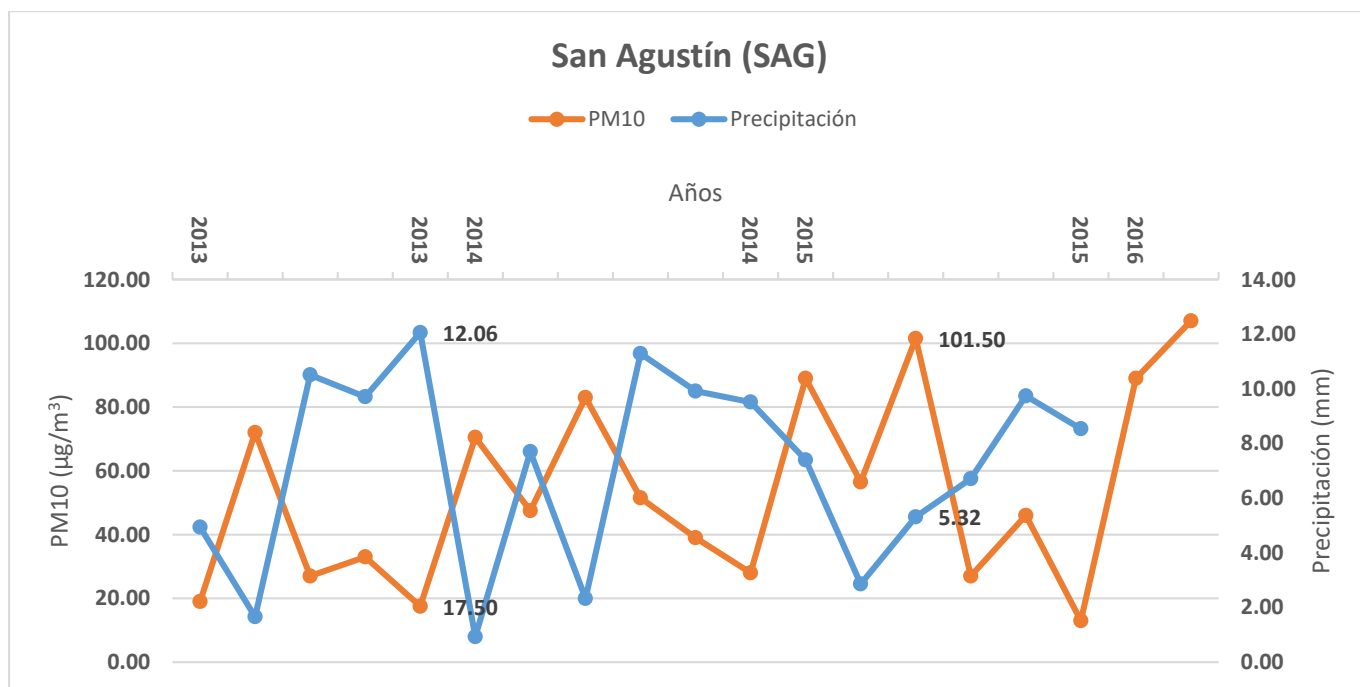


Figura 4.13: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (SAG) (Elaboración propia)

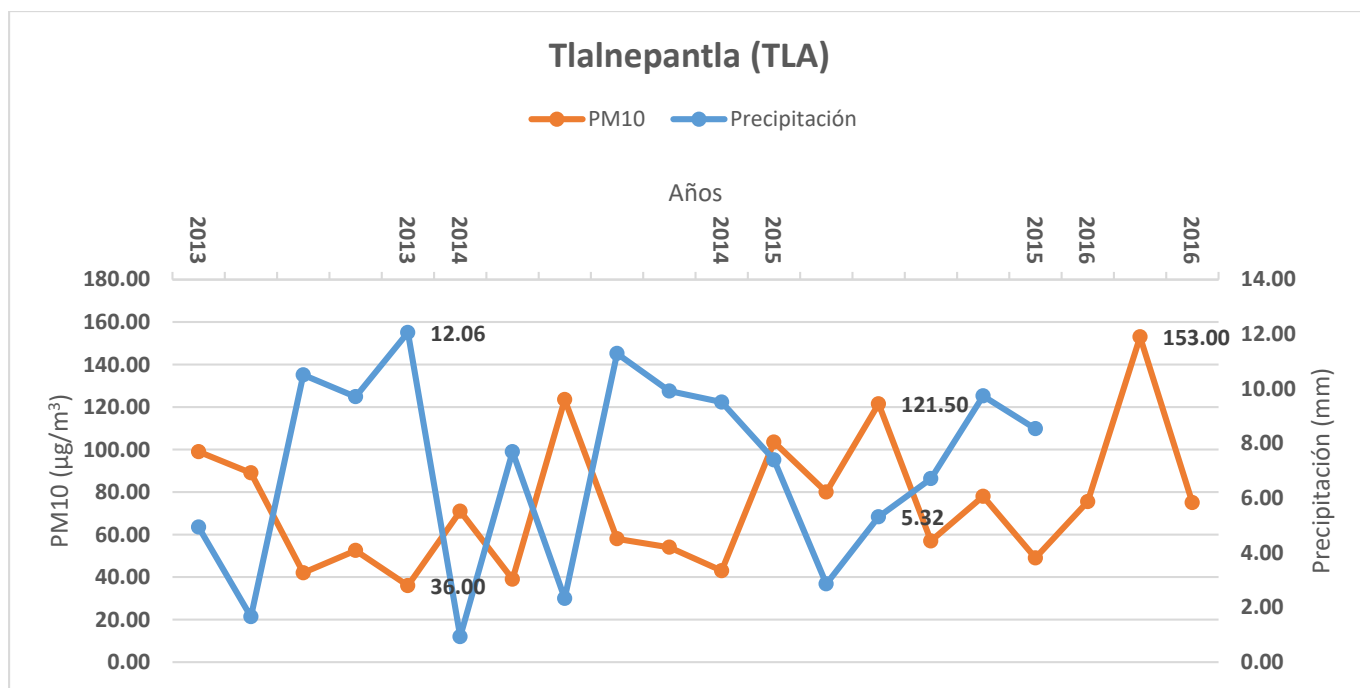


Figura 4.14: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (TLA) (Elaboración propia)

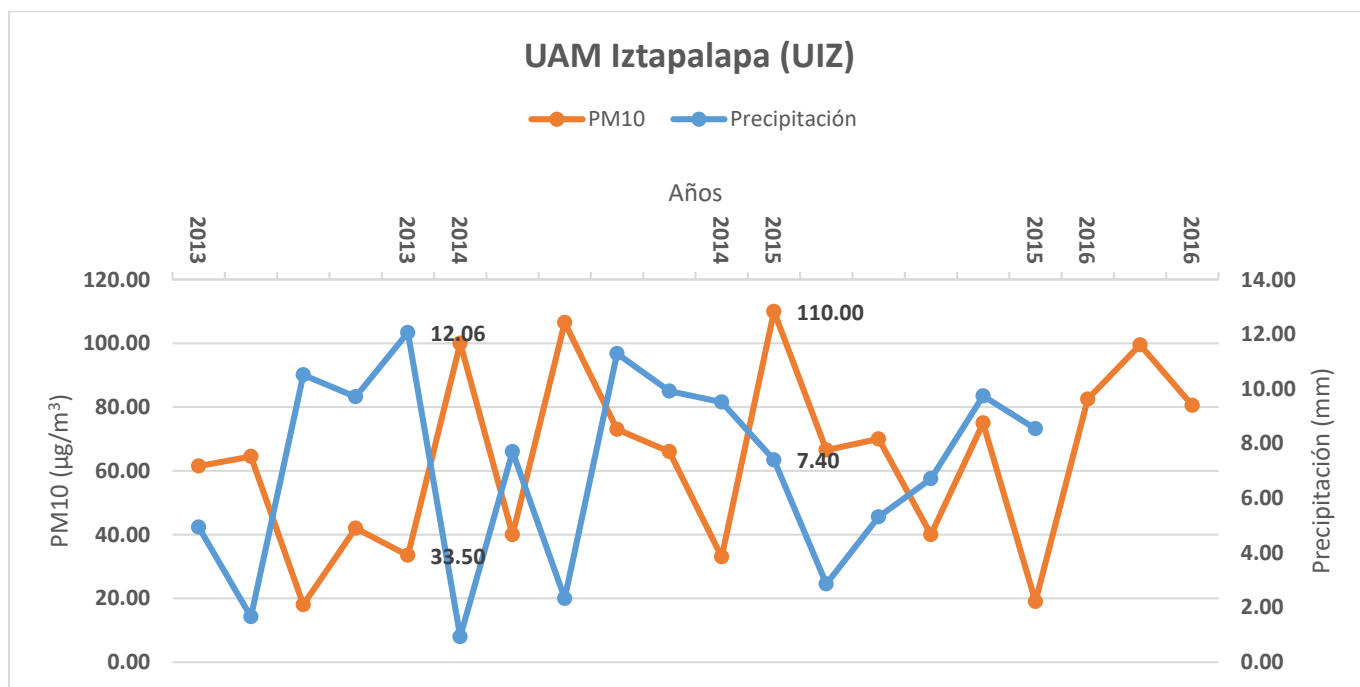


Figura 4.15: Relación precipitación-PM10 2013 a 2016 (UIZ) (Elaboración propia)

4.2 Interpolación con SURFER™

Para el caso de la interpolación con el software SURFER™ se muestran resultados para el periodo comprendido entre los años 2013 a 2018 para el mes más contaminado (valor promedio máximo) y para el mes menos contaminado (valor promedio mínimo) de cada año para valores de PM2.5 y PM10 y considerando todas las estaciones que reportaron datos para estos.

Los resultados se muestran a continuación (ver figuras 4.16 a 4.39):

PM2.5

Año 2013

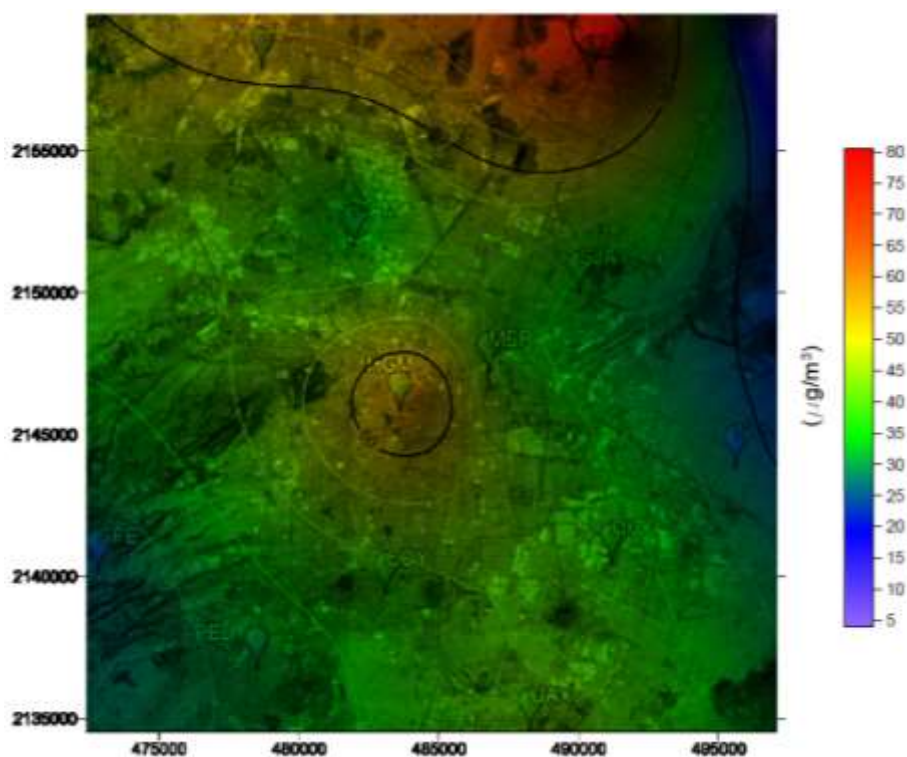


Figura 4.16: Concentración de PM2.5 Noviembre 2013 (Elaboración propia)

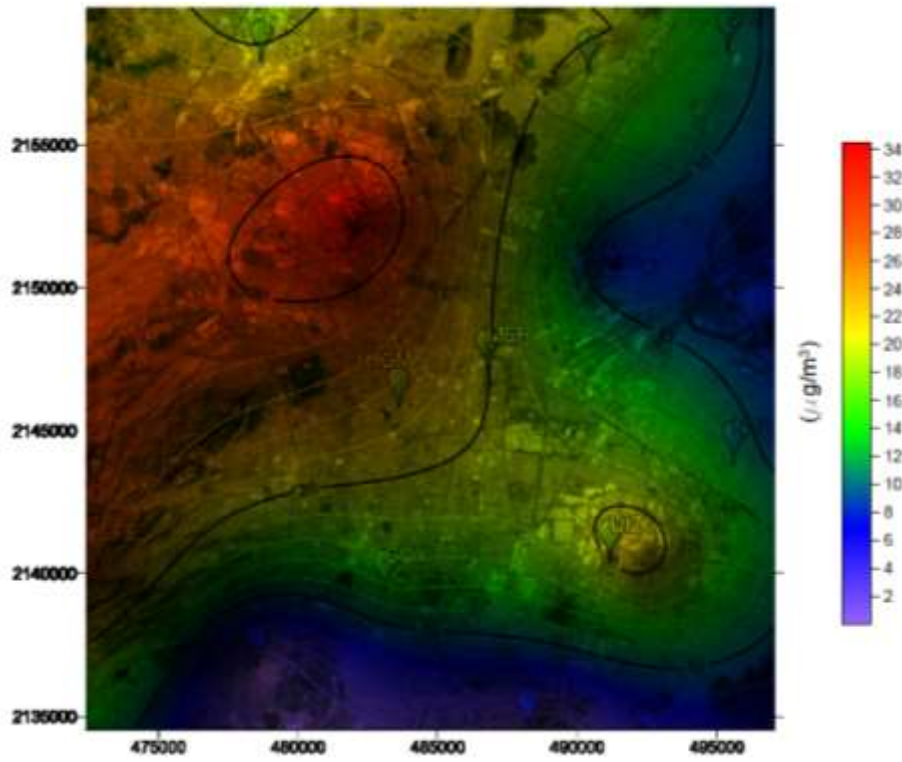


Figura 4.17: Concentración de PM2.5 Octubre 2013 (Elaboración propia)

Año 2014

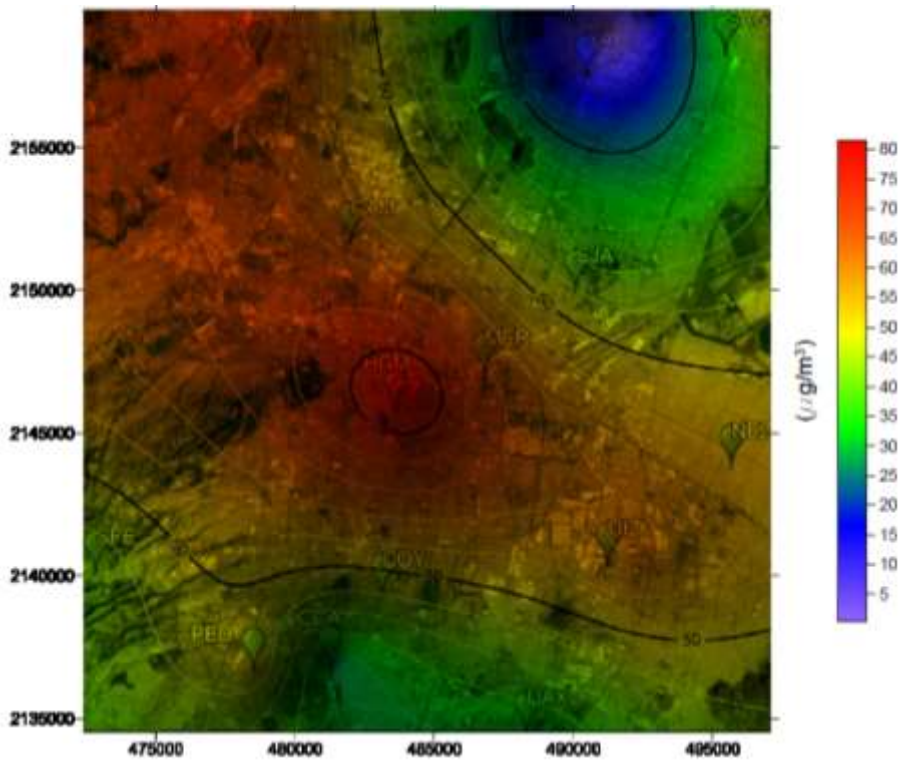


Figura 4.18: Concentración de PM2.5 Diciembre 2014 (Elaboración propia)

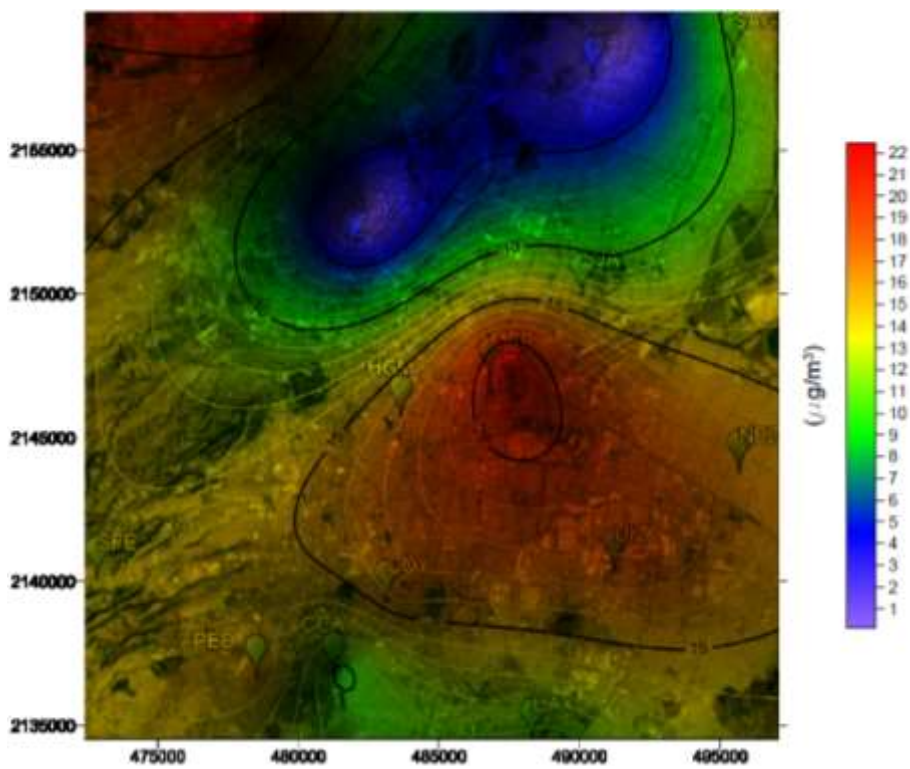


Figura 4.19: Concentración de PM2.5 Septiembre 2014 (Elaboración propia)

Año 2015

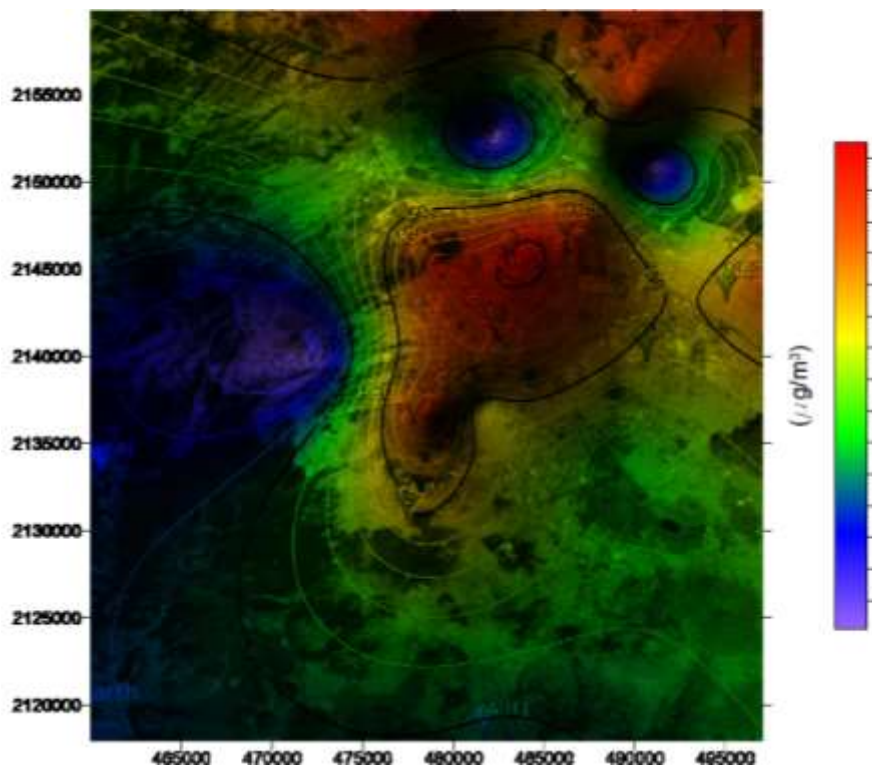


Figura 4.20: Concentración de PM2.5 Diciembre 2015 (Elaboración propia)

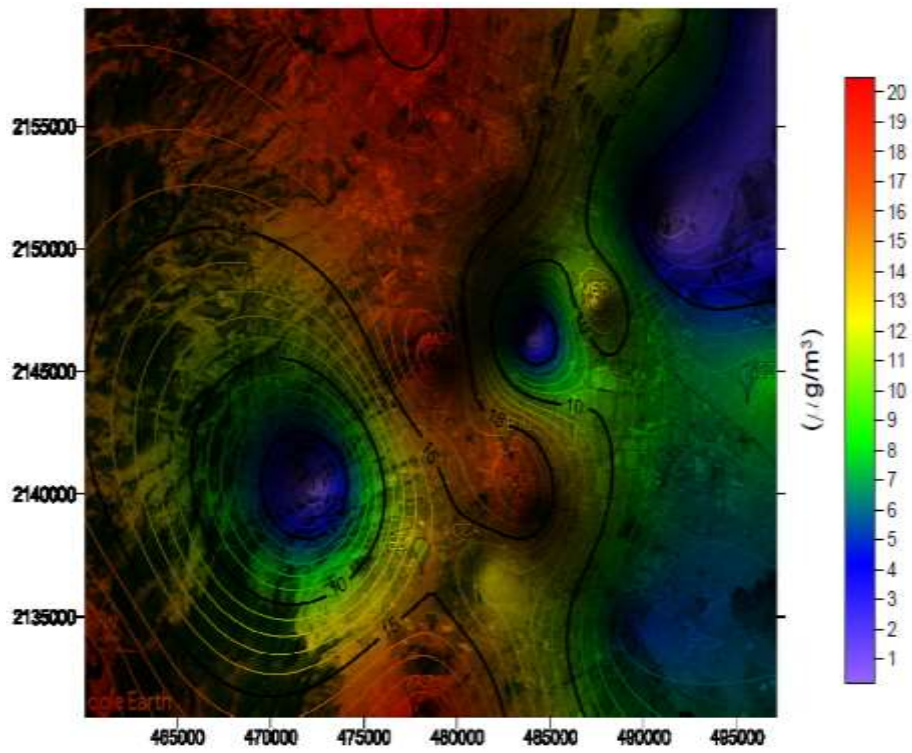


Figura 4.21: Concentración de PM2.5 Octubre 2015 (Elaboración propia)

Año 2016

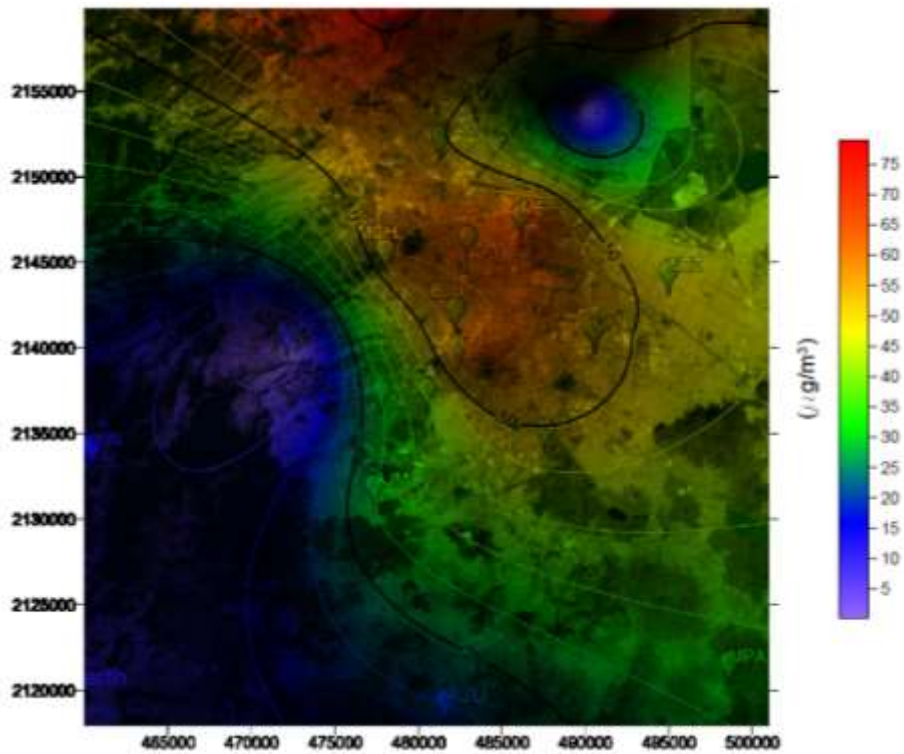


Figura 4.22: Concentración de PM2.5 Febrero 2016 (Elaboración propia)

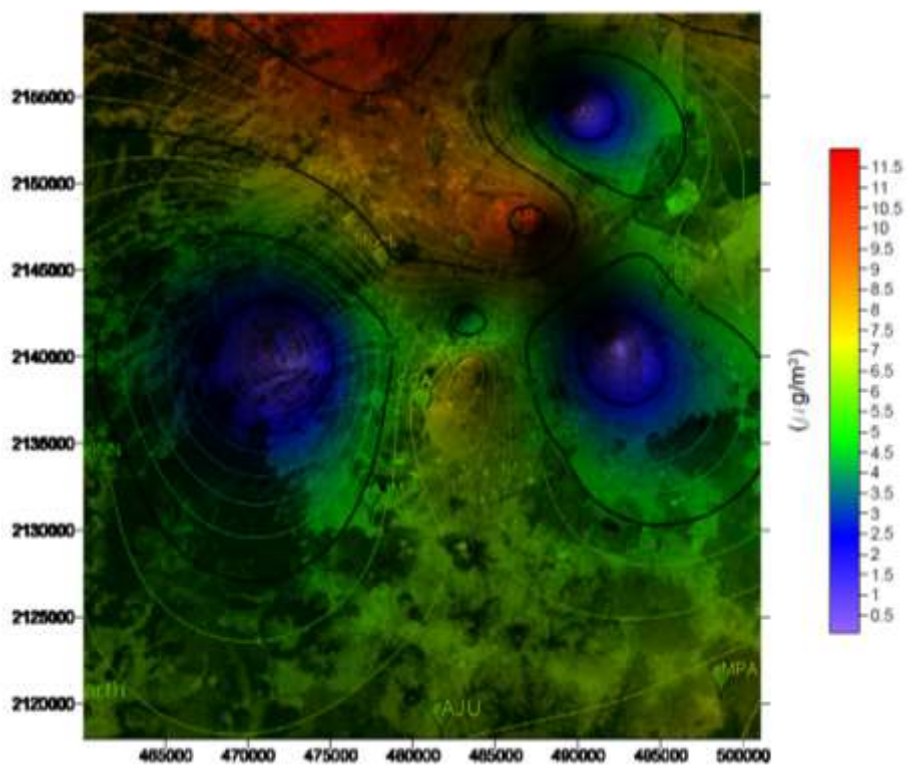


Figura 4.23: Concentración de PM2.5 Noviembre 2016 (Elaboración propia)

Año 2017

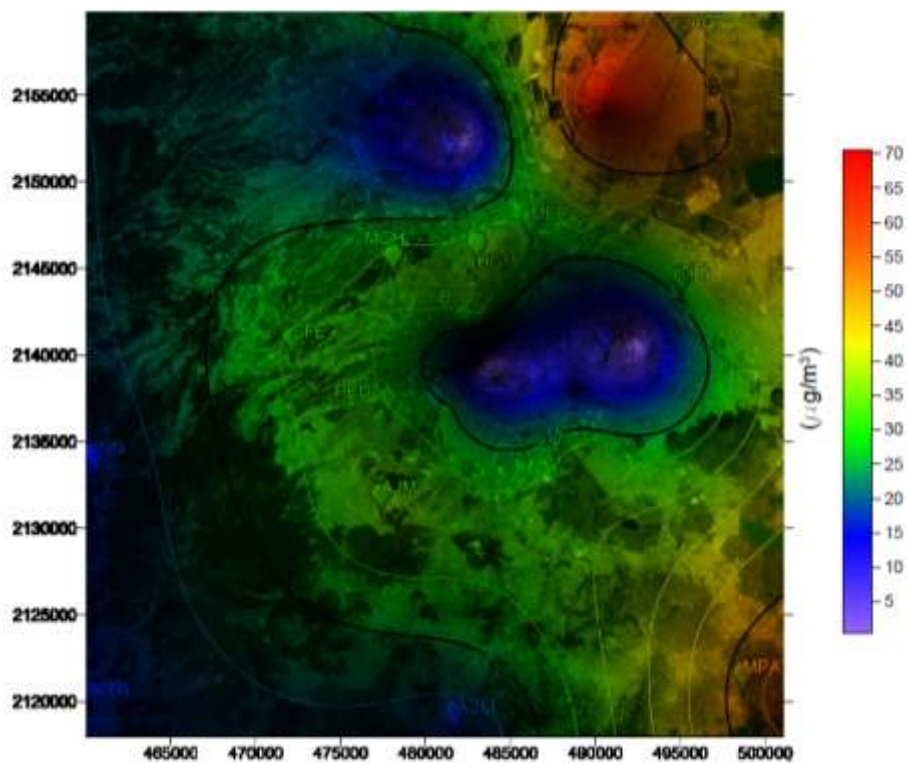


Figura 4.24: Concentración de PM2.5 Diciembre 2017 (Elaboración propia)

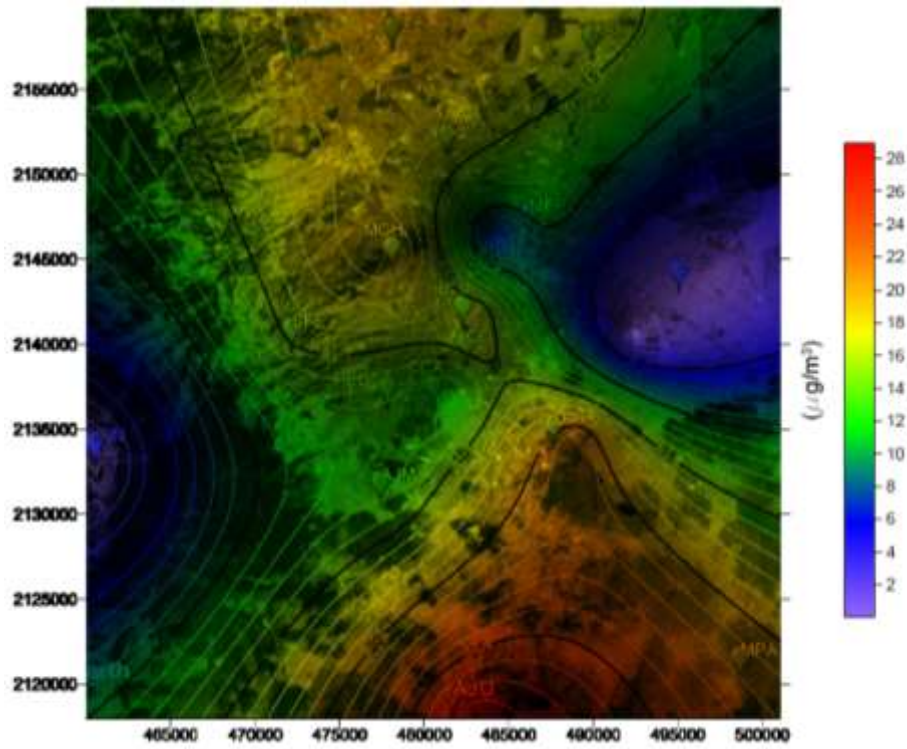


Figura 4.25: Concentración de PM2.5 Abril 2017 (Elaboración propia)

Año 2018

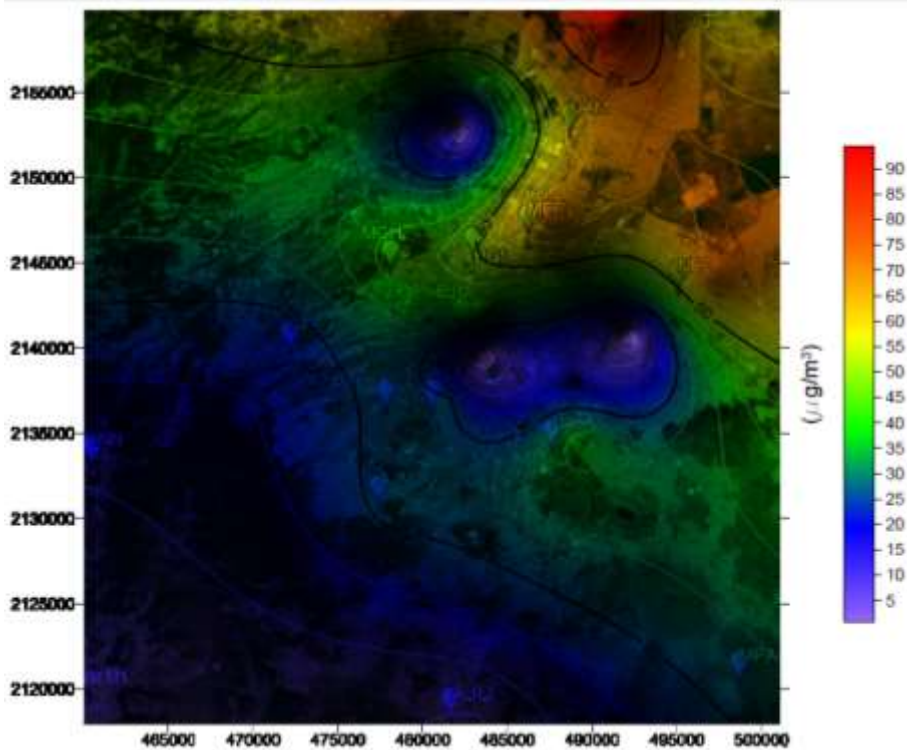


Figura 4.26: Concentración de PM2.5 Enero 2018 (Elaboración propia)

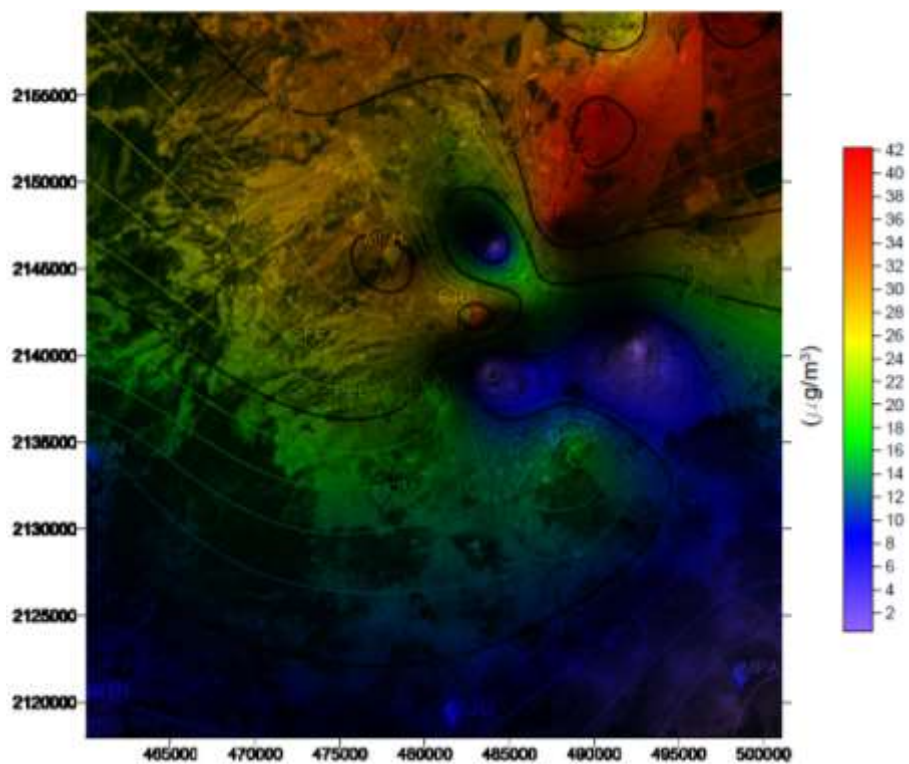


Figura 4.27: Concentración de PM2.5 Febrero 2018 (Elaboración propia)

PM10

Año 2013

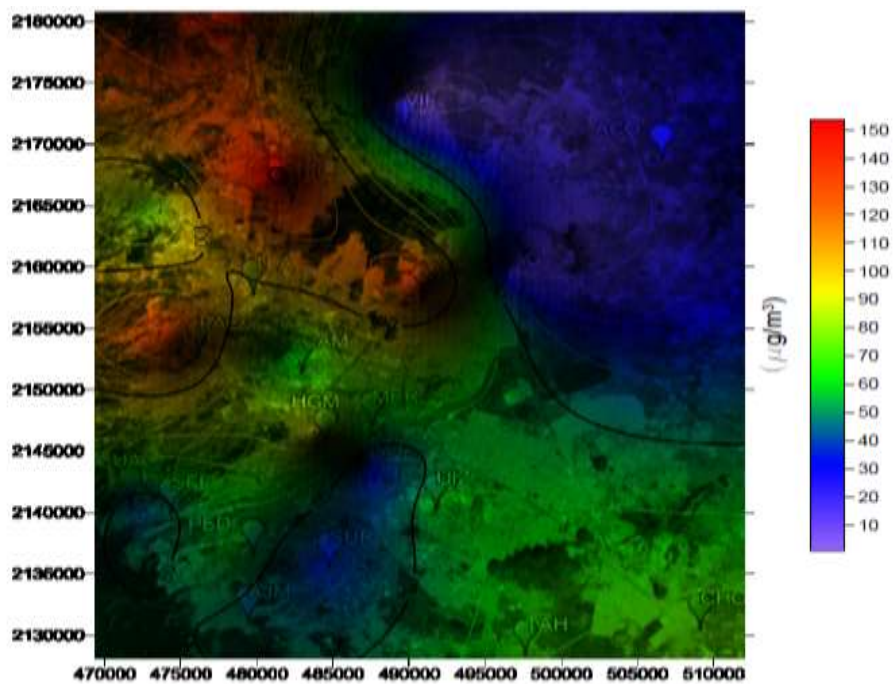


Figura 4.28: Concentración de PM10 Noviembre 2013 (Elaboración propia)

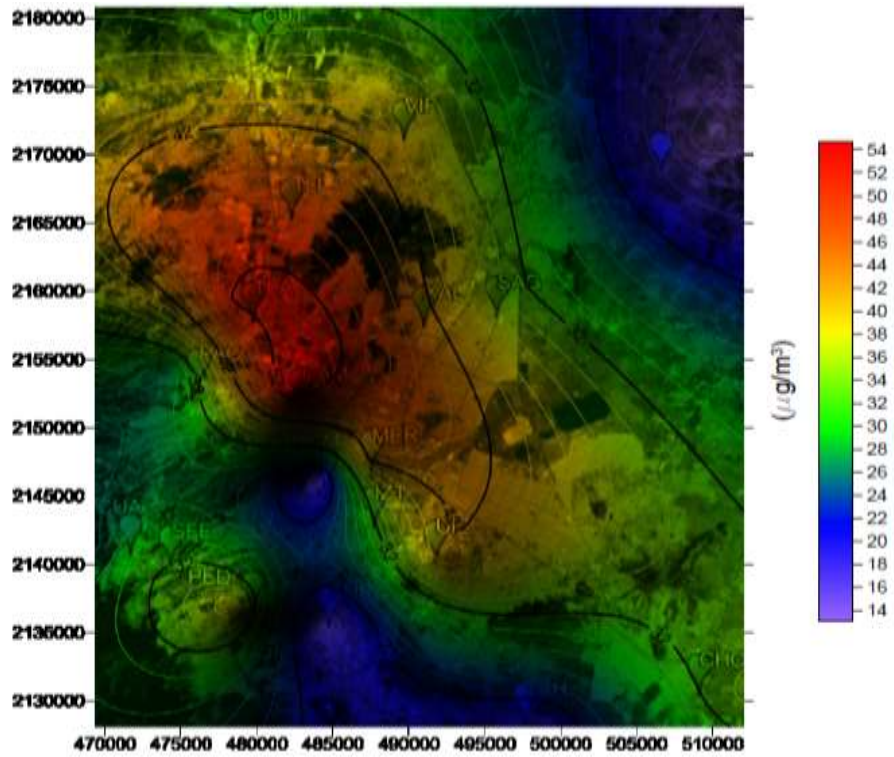


Figura 4.29: Concentración de PM10 Septiembre 2013 (Elaboración propia)

Año 2014

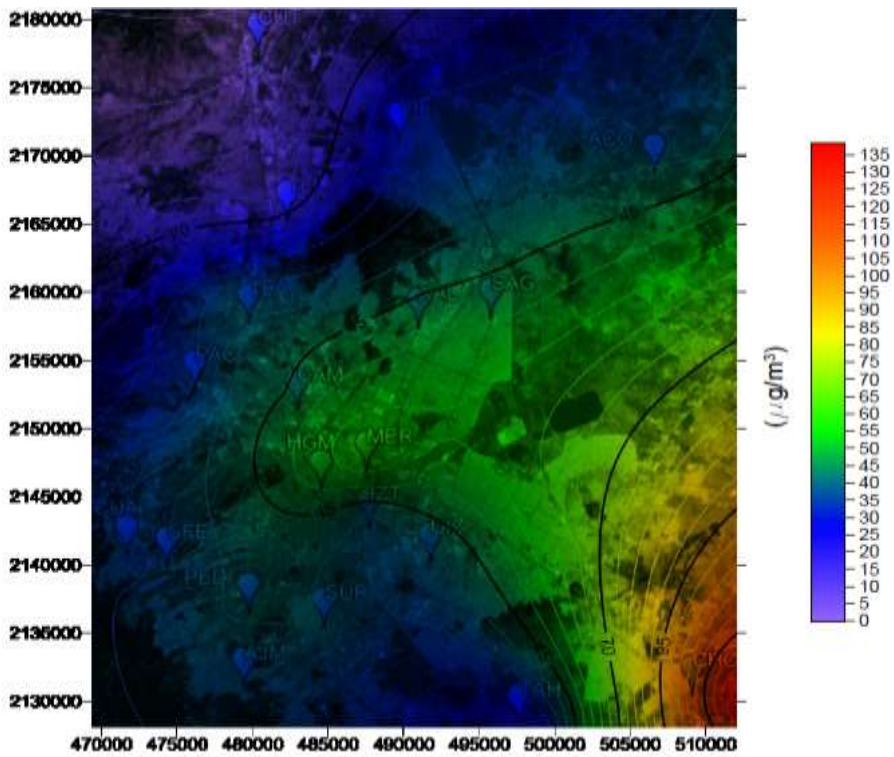


Figura 4.30: Concentración de PM10 Abril 2014 (Elaboración propia)

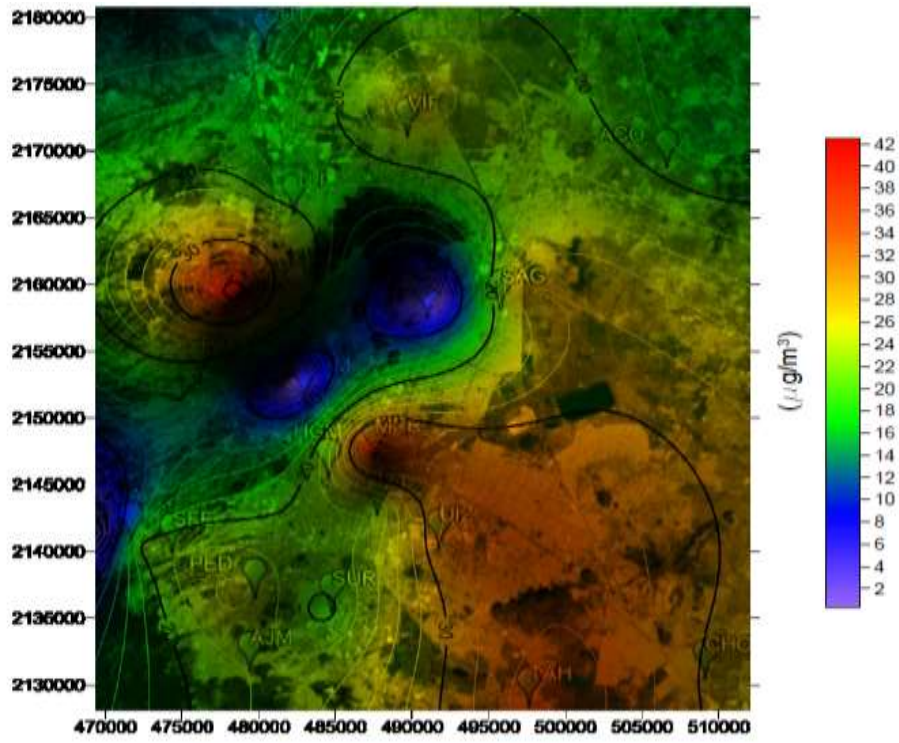


Figura 4.31: Concentración de PM10 Septiembre 2014 (Elaboración propia)

Año 2015

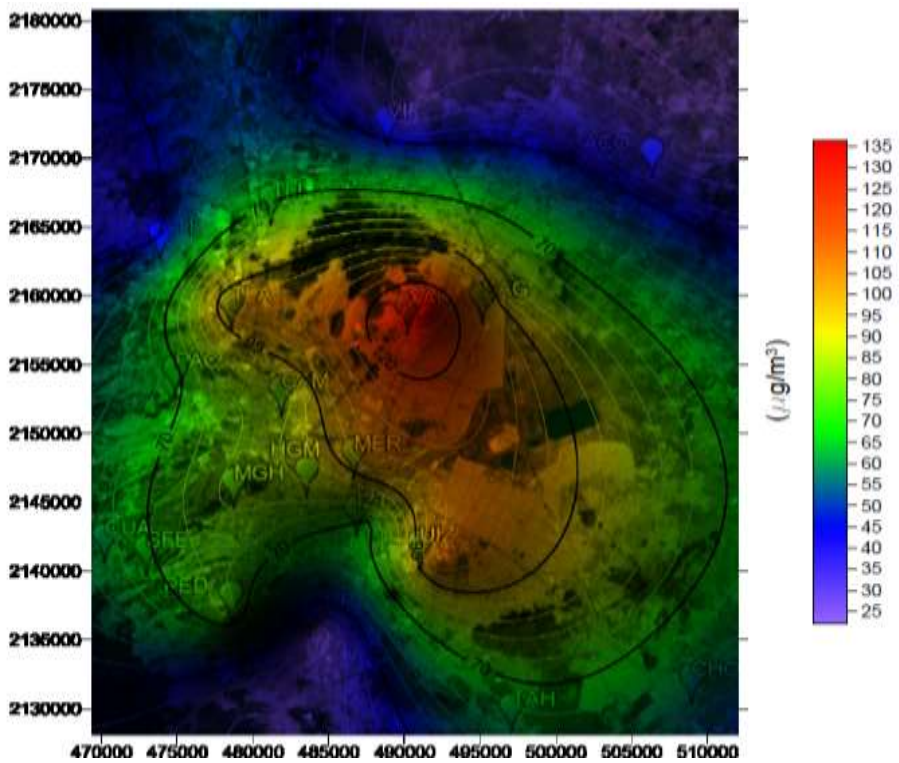


Figura 4.32: Concentración de PM10 Junio 2015 (Elaboración propia)

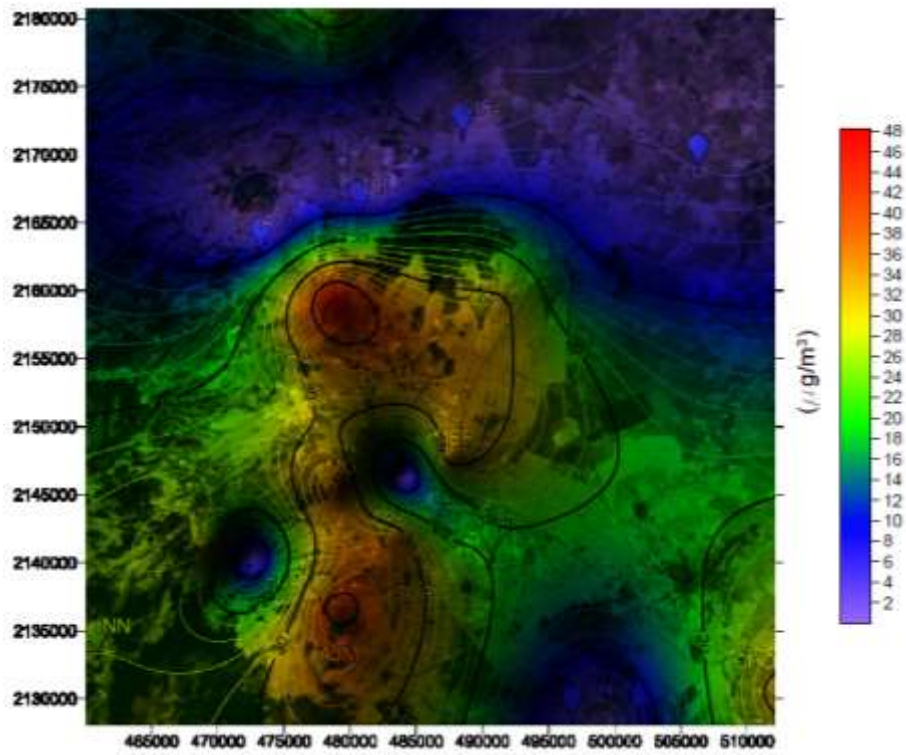


Figura 4.33: Concentración de PM10 Octubre 2015 (Elaboración propia)

Año 2016

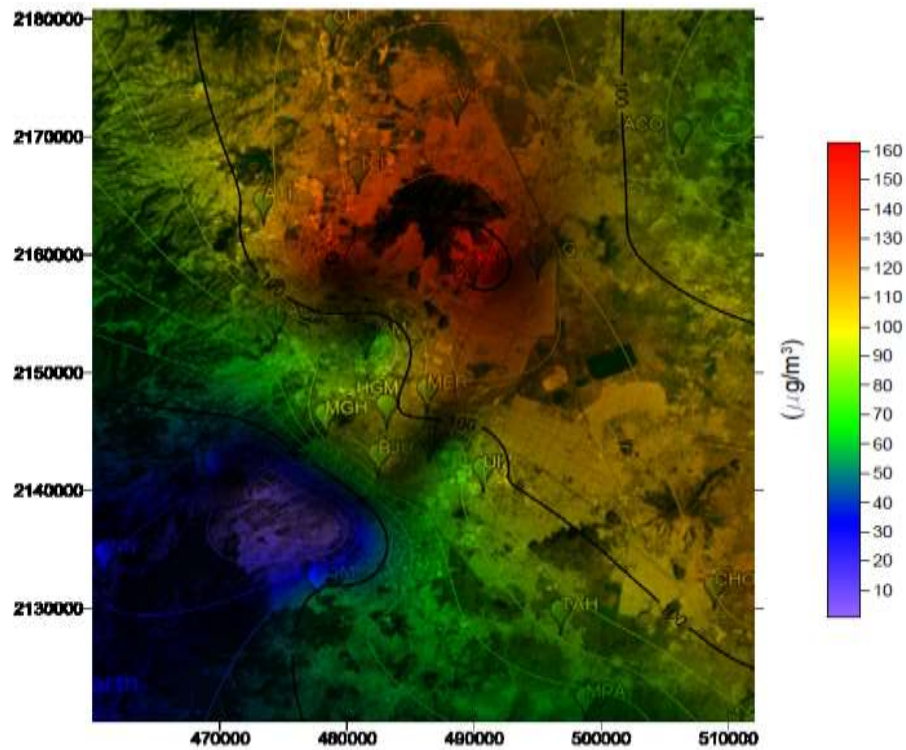


Figura 4.34: Concentración de PM10 Febrero 2016 (Elaboración propia)

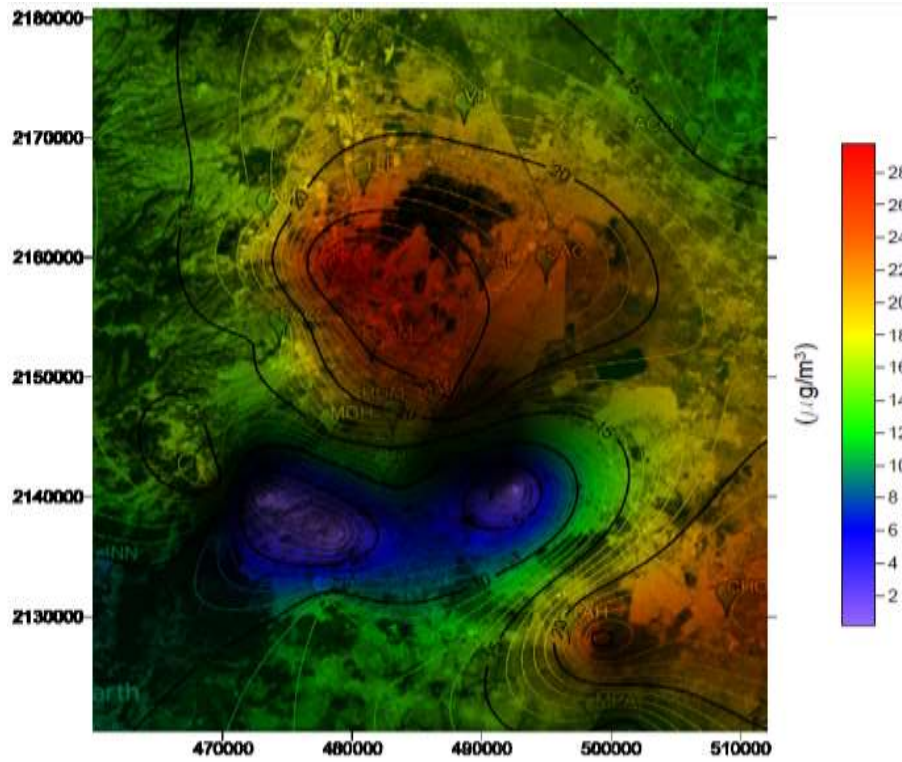


Figura 4.35: Concentración de PM10 Noviembre 2016 (Elaboración propia)

Año 2017

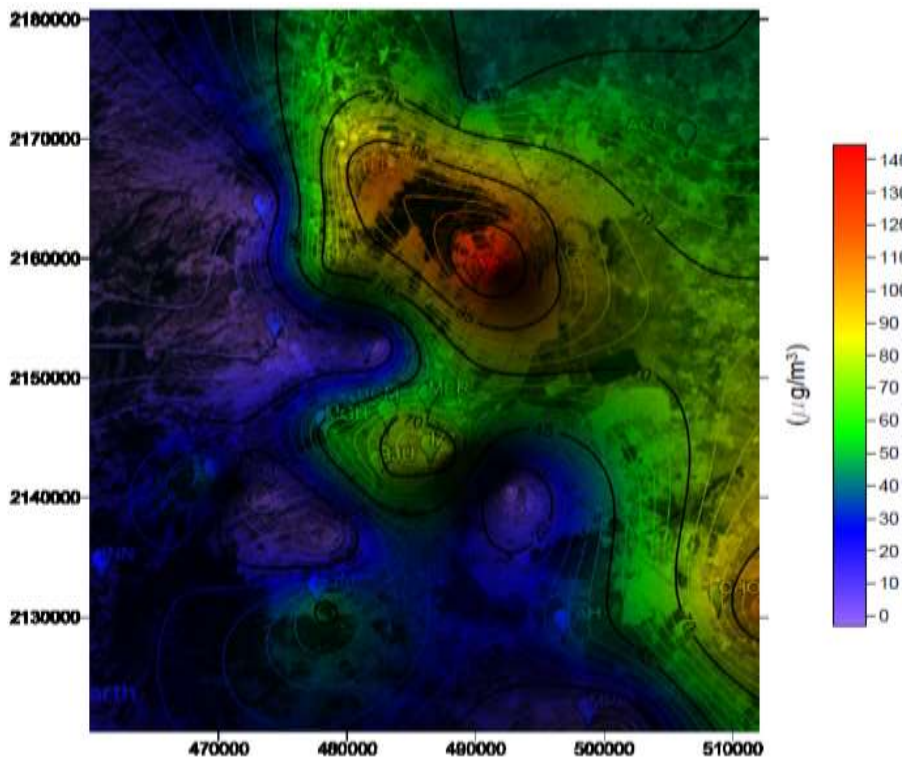


Figura 4.36: Concentración de PM10 Noviembre 2017

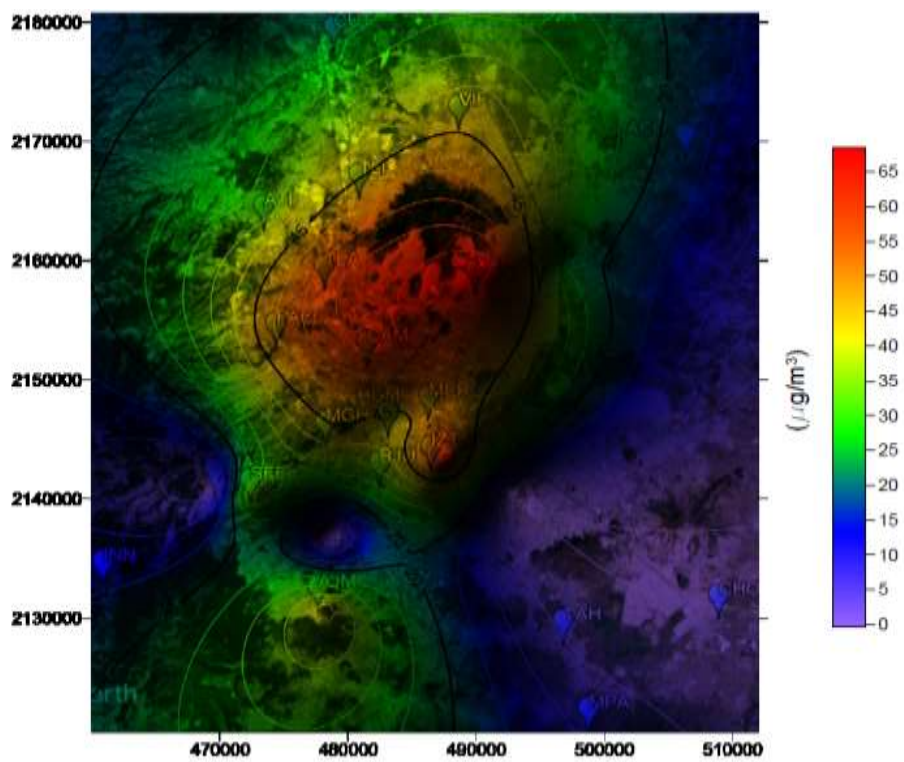


Figura 4.37: Concentración de PM10 Septiembre 2017 (Elaboración propia)

Año 2018

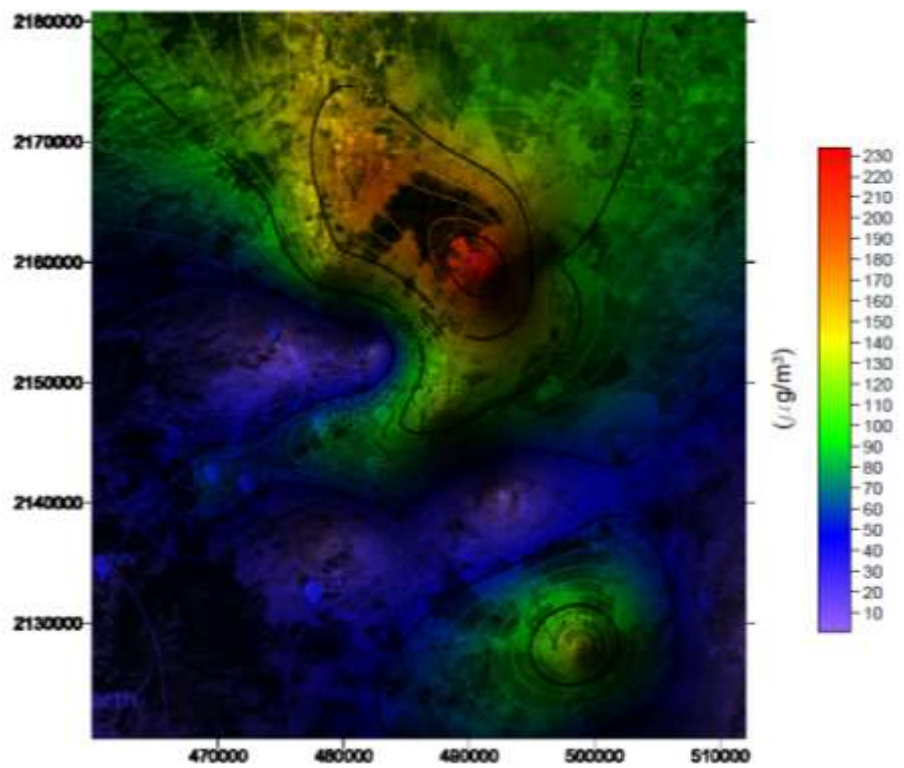


Figura 4.38: Concentración de PM10 Enero 2018 (Elaboración propia)

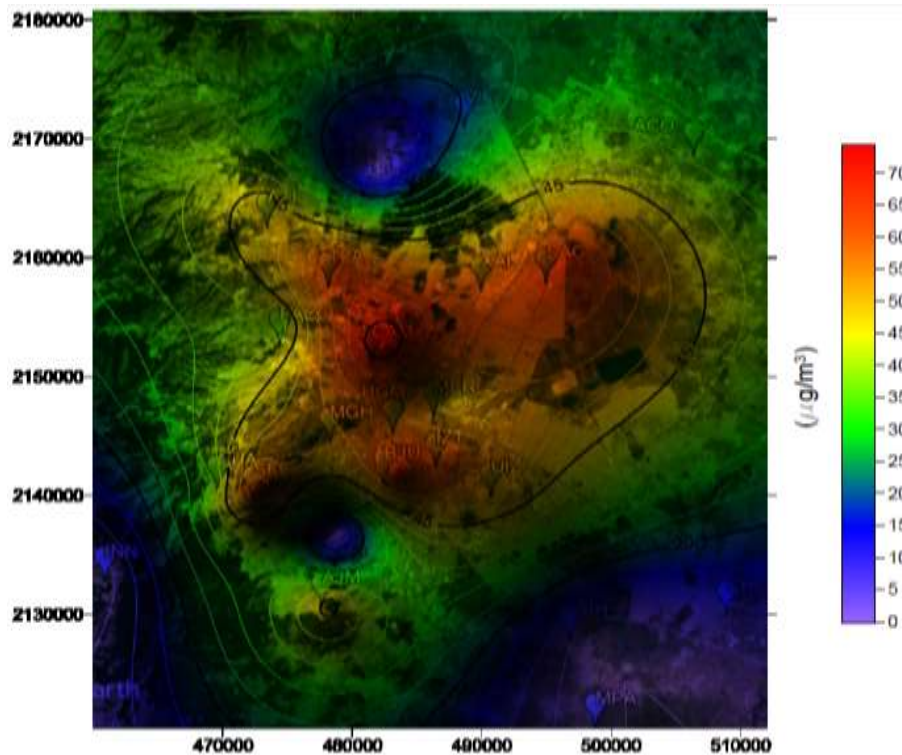


Figura 4.39: Concentración de PM10 Mayo 2018 (Elaboración propia)

4.3 Análisis

Respecto a los resultados que se obtuvieron en el caso de la relación precipitación-contaminante se observaron comportamientos en donde la precipitación se relaciona directamente con el comportamiento del contaminante a lo largo del tiempo, se hace notar que las variables siguen una tendencia en todas las estaciones ya que cuando la precipitación aumenta, la concentración del contaminante disminuye y viceversa cuando la precipitación disminuye, la concentración del contaminante va en aumento, lo cual permite afirmar lo siguiente:

“A mayor cantidad de precipitación, menor contaminación en la atmósfera y por el contrario a menor cantidad de precipitación mayor contaminación existirá en la atmósfera.”

Este principio se puede sustentar en el estudio hecho en la ciudad de Santiago de Chile por René Garreaud en su artículo “Factores meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago” en donde menciona que los vientos provenientes de la costa cargados de humedad

favorecen la formación de nubes que originan la precipitación y nota que las concentraciones de contaminantes caen marcadamente. (Garreaud, 2006).

También el autor L. Blanco Becerra en su artículo “Influence of precipitation scavenging on the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia” ratifica lo dicho por Garreaud; y es que en los meses de precipitación se registran bajas concentraciones de contaminación atmosférica a diferencia de los meses más secos en donde registró niveles altos de contaminación en la atmósfera.

Cabe destacar que aunque el último año de reporte de las estaciones climatológicas (pluviométricas y pluviográficas) fue 2015 los valores para 2016 de ambos contaminantes vuelven a aumentar en la época de estiaje siguiendo el principio anterior.

Analizando los casos particulares para cada estación se observa que la estación con el mayor valor promedio a lo largo de todo el periodo de tiempo analizado para datos de PM_{2.5} fue la estación Hospital General de México (HGM) con un valor de 82 µg/m³ y por el contrario las estaciones con el menor valor promedio a lo largo del periodo de análisis fueron Coyoacán (COY) y Nezahualcóyotl (NEZ), ambas con 61 µg/m³, por otro lado, para datos de PM₁₀ la estación que reportó el mayor valor promedio en el periodo de análisis fue Tlalnepantla (TLA) con 153 µg/m³ y la de menor valor promedio fue Iztacalco (IZT) con 75.5 µg/m³.

Para el caso de la interpolación con SURFER™ se puede observar que los meses más contaminados a lo largo de los años son enero, febrero y diciembre mientras que los menos contaminados son septiembre y octubre.

En cuanto al comportamiento en el espacio se observa que la zona centro y la zona nor-este de la ZMCM son las más contaminadas al encontrarse allí las estaciones que registraron la mayor concentración tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀, como es el caso de las estaciones Xalostoc (XAL) y Merced (MER) que registran valores muy por encima de la norma.

Mientras que por otro lado la zona menos contaminada es la zona sur-oeste al tener en su ubicación las estaciones que registraron los valores promedio menores de concentración, como son la estación Investigaciones Nucleares (INN), Ajusco (AJU) y Ajusco Medio (AJM).

Es importante destacar el caso particular del mes de enero de 2018 para PM₁₀ ya que es una fecha reciente; aunque en la figura 57 predominan valores en un rango de entre 10 y 70 µg/m³

(tonalidades azules en el mapa), la estación Xalostoc (XAL) registró un valor por encima de los $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual excede en gran cantidad los valores registrados a lo largo de nuestro periodo de análisis, además los alrededores a dicha estación oscilan en un rango de entre los 140 y $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por lo que resulta alarmante en comparación con los años anteriores. Lo mismo ocurre para el caso de partículas $\text{PM}_{2.5}$, en el mismo mes y mismo año la estación Xalostoc (XAL) registró valores anormales a comparación de años pasados; en meses anteriores los rangos máximos oscilaron entre 75 y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pero en esa ocasión llegaron a por encima de los $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y al igual que para PM_{10} los alrededores a la estación también muestran concentraciones altas de $\text{PM}_{2.5}$.

Por último se observa que la tendencia de comportamiento a lo largo de toda la ZMCM así como a lo largo de los años es bastante similar ya que las zonas más contaminadas y menos contaminadas son muy similares y se repiten en la mayoría de los resultados mostrados.

Capítulo 5. Conclusiones

Se lograron identificar los parámetros que se utilizan para medir la calidad del aire en la ZMCM por medio de la medición de los contaminantes criterio que se han establecido como los más importantes.

También se logró identificar la relación que existe entre las partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} ya que se pudo identificar que tienen la misma composición y son originadas por las mismas fuentes.

Se cumplió el objetivo principal que se había propuesto; ya que se logra identificar la distribución a lo largo del tiempo de la concentración de contaminantes $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} y su relación con los meses de estiaje y de lluvia en la ZMCM, así como la distribución espacial de concentración de contaminantes $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se logran identificar las zonas más y menos contaminadas de la ZMCM.

Por otro lado se pudo establecer la importancia que tiene la variable precipitación en el aumento o disminución de la contaminación por material particulado y se logró establecer una relación entre ambos componentes.

En cuanto al tema de la interpolación espacial se pudieron comprender los principios de operación básicos que se utilizan para realizar estimaciones con estos métodos.

A lo largo de la ejecución de este trabajo se pudo observar que la interpolación espacial puede ayudar al monitoreo de contaminantes así como a las áreas de ingeniería ambiental para poder realizar estimaciones y revisiones en la calidad del aire y comportamientos en el tiempo y espacio, es importante mencionar que aunque existan estas opciones de análisis las mediciones en campo y los resultados reales son muy importantes para determinar con mejor precisión la calidad del aire y poder predecir los riesgos y afectaciones que estos tienen en el medio ambiente y en la población.

Al iniciar este proyecto se tenía incertidumbre debido a la poca cantidad de fechas seleccionadas y a los problemas que tiene la propia red de monitoreo (estaciones mal distribuidas, monitoreo no continuo en todas las estaciones etc.), a pesar de todo eso los resultados obtenidos fueron favorables y proporcionan una idea certera del comportamiento de las variables analizadas; por supuesto no hay que perder de vista que se pueden realizar muchas modificaciones a las consideraciones hechas para mejorar este trabajo.

Se puede concluir que los principales factores para la gran cantidad de contaminación en el aire son la gran concentración de industrias, población y vehículos congregados en la ZMCM; a esto también se suma la poca cantidad de vegetación y áreas verdes, y por si fuera poco las que existen se deterioran día con día por lo que de no tomarse acciones correctivas y preventivas como una mejor distribución en el uso de suelo, una red de transporte público mejor estructurada y/o mejores leyes que regulen las operaciones ilícitas en materia de contaminación atmosférica por parte de las industrias en años venideros podríamos estar en una situación parecida a la de las grandes ciudades como Pekín o Los Ángeles.

Con la realización de esta tesis se promueve la continuación de trabajos similares que sean menos y rápidos sin perder una precisión aceptable para permitir a las autoridades la creación de planes y programas para mejorar la situación de la contaminación atmosférica para así poder garantizar el bienestar de la población y una vida plena para la misma.

Bibliografía

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Cuaderno estadístico y geográfico de la Zona Metropolitana del Valle de México 2014 – 2015”. Ciudad de México. Mayo, 2018.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. “Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Mayo, 2018.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, “Información sobre calidad del aire”, disponible en la página web: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/>, consultada en Mayo 2018.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. “Datos horarios para contaminantes PM 10 Y PM 2.5”, disponibles en la página web: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnml=%27&opcion=Zg==>, consultado en mayo 2018.

OECD (2015), *OECD “Territorial Reviews: Valle de México”, México*, OECD Publishing, Paris.

CONAPO (2015a), Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010, disponible en la página web oficial:

[www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices de Marginacion 2010 por entidad federativa y municipio](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices_de_Marginacion_2010_por_entidad_federativa_y_municipio) , consultado el día 17 de mayo 2018.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México “Índice de la Calidad del Aire” disponible en la página web: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Zw==>, consultado en mayo, 2018.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, “Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM 2.5”, México, 2011; disponible en la página web: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf> consultado el día 23 de julio de 2018.

Dra. Telma G. Castro “Impacto Regional por la emisión de contaminantes atmosféricos de una megaciudad (Ciudad de México)” SEMARNAT-CONACYT (2008).

A. Aragón Piña, G. Torres Villaseñor, P. Santiago Jacinto, M. Monroy Fernández “Scanning and transmission electron microscope of suspended lead rich particles in the air of San Luis Potosí, México” Atmospheric Environment 5235-5243, 36-33 (2002).

Environmental Protection Agency (2009), “Integrated Science Assessment for Particulate Matter”. EPA/600/R-08/139F. Julio, 2018

Secretaría de Salud, “Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental, valores permisibles PM10 y PM2.5”, disponible en la página web: <http://vlex.com/vid/mite-permisibles-particulas-suspendidas-aire-524746826>, Id. vLex: VLEX-524746826, consultada el día 29 de julio de 2018.

Organización Mundial de la Salud “Air Quality and Health” disponible en la página web [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), consultada en Julio, 2018.

Geological Service of United States (USGS) “Acquisition Calendar of Landsat 8 OLI/TIRS” disponible en la página web: https://landsat.usgs.gov/landsat_acq, consultado en julio 2018

Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>), consultada en Julio, 2018

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Imágenes de Satélite Landsat 8”, disponible en la página web: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx> consultada en Agosto 2018.

Riojas-Rodríguez, Horacio, Schilman, Astrid, López-Carrillo, Lizbeth, Finkelman, Jacobo, La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. Salud Pública de México [en línea] 2013, 55 (Noviembre-Diciembre): [Fecha de consulta: 11 de agosto de 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10628941011> ISSN 0036-3634.

Environmental Protection Agency (1996), “Sampling of Ambient Air for Total Suspended Particulate Matter (SPM)”. Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air”. EPA/625/R-96/010A.

INE-SEMARNAT (2009), “Estudio sobre la variabilidad estacional de la composición y toxicidad de partículas finas en el valle de México”. Segundo Reporte Técnico.

Environment Canada and Health Canada (1998), “National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter”. Executive Summary. Part 1: Science Assessment Document. CEPA/FPAC Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines.

Sosa I., G. (2009), "Recent Studies in the MCMA and Their Implications on air Quality Management". Trabajo presentado en el Seminario Internacional sobre Calidad del Aire y Efectos a la Salud. Diciembre 2-3, México, D.F.

Environmental Protection Agency (1996), "Sampling of Ambient Air for Total Suspended Particulate Matter (SPM)". Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air". EPA/625/R-96/010A.

European Commission (2004), "Second Position Paper on Particulate Matter". CAFE Working Group on Particulate Matter.

García, C. E. O., Toro, M. V., & Gómez, J. C. (2013). EPOC, bronquitis crónica y síntomas respiratorios, asociados a la contaminación por PM10 en la ciudad de Medellín (Colombia). *Revista Med.* <https://doi.org/10.18359/rmed.1149>

Madrid, M. DE, Galán Labaca, I., Aránguez Ruiz, E., Gandarillas Grande, A., & María Ordóñez Iriarte Nuria Aragonés Sanz, J. (n.d.). EFECTOS A CORTO PLAZO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA MORTALIDAD: RESULTADOS DEL PROYECTO EMECAM EN EL.

World Health Organization Europe (2005), "Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide."

Burrough, P.A. & McDonnell, R.A.; 2000 *Principles of Geographical Information Systems* Oxford University Press, Oxford, 333 pp.1

Mitas, L & Mitsova, H. (1999) Spatial Interpolation en Lonngley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind (Eds.) *Geographical Information Systems*, pp. 481-492.

Garreaud D. Rene y Ruttlund José "Factores meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago", Santiago de Chile, Chile Pp. 36 a 53 (2006)

Blanco-Becerra, L. C., Gáfarro-Rojas, A. I., & Rojas-Roa, N. Y. (2015). Influence of precipitation scavenging on the PM2.5/PM10 ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2015(76), 58–65. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a07>

| MESES | Precipitación (mm) | ESTACIONES PARA PM2.5 (µg/m ³) | | | | | | | | | |
|------------|--------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| | | COY | HGM | MER | NEZ | SAG | TLA | UAX | UIZ | | |
| "MAY" 2013 | 7.06 | 48.00 | 37.00 | 51.00 | 35.00 | 54.00 | 37.00 | 10.00 | 45.00 | | |
| "NOV" 2013 | 4.94 | 37.50 | 58.00 | 36.50 | 24.50 | 4.00 | 55.50 | 42.00 | 35.50 | | |
| "DIC" 2013 | 1.66 | 30.50 | 66.00 | 45.00 | 34.00 | 39.50 | 41.50 | 17.00 | 36.50 | | |
| "JUL" 2013 | 9.63 | 17.00 | 14.50 | 30.00 | 9.00 | 7.50 | 15.50 | 26.00 | 21.50 | | |
| "SEP" 2013 | 9.71 | 29.50 | 7.00 | 22.50 | 19.00 | 21.00 | 30.00 | 10.00 | 23.00 | | |
| "OCT" 2013 | 12.06 | 14.50 | 23.00 | 19.00 | 9.00 | 9.50 | 18.00 | 15.00 | 22.50 | | |
| "MAY" 2014 | 8.07 | 54.50 | 47.50 | 58.50 | 36.00 | 48.00 | 57.50 | 34.00 | 55.00 | | |
| "NOV" 2014 | 4.17 | 46.00 | 47.00 | 46.00 | 28.00 | 46.00 | 62.00 | 27.00 | 57.00 | | |
| "DIC" 2014 | 2.33 | 47.00 | 82.00 | 61.00 | 53.50 | 47.00 | 71.50 | 31.50 | 61.00 | | |
| "JUL" 2014 | 9.44 | 43.00 | 22.00 | 57.00 | 33.00 | 50.00 | 52.00 | 31.00 | 47.00 | | |
| "AGO" 2014 | 9.92 | 28.00 | 23.00 | 42.00 | 16.50 | 21.50 | 23.00 | 24.00 | 41.50 | | |
| "SEP" 2014 | 9.51 | 16.50 | 17.00 | 22.00 | 15.50 | 15.00 | 22.50 | 10.50 | 18.00 | | |
| "FEB" 2015 | 5.01 | 59.00 | 13.00 | 29.50 | 8.00 | 41.00 | 51.00 | 35.00 | 29.50 | | |
| "MAR" 2015 | 5.01 | 36.00 | 49.50 | 50.00 | 29.50 | 48.50 | 50.50 | 24.50 | 40.00 | | |
| "DIC" 2015 | 5.32 | 62.50 | 77.50 | 66.00 | 61.00 | 71.50 | 74.50 | 31.00 | 46.00 | | |
| "MAY" 2015 | 9.50 | 33.50 | 33.50 | 40.50 | 14.50 | 34.50 | 22.50 | 27.50 | 43.00 | | |
| "AGO" 2015 | 6.71 | 16.00 | 29.50 | 33.50 | 24.50 | 15.50 | 39.00 | 27.00 | 29.00 | | |
| "OCT" 2015 | 8.54 | 18.00 | 27.30 | 14.00 | 8.50 | 15.00 | 20.50 | 5.00 | 6.50 | | |
| "ENE 2016" | 0.00 | 34.50 | 43.00 | 48.00 | 35.50 | 56.00 | 36.00 | 24.00 | 50.00 | | |
| "FEB" 2016 | 0.00 | 63.50 | 62.50 | 63.00 | 47.00 | 62.50 | 79.00 | 48.00 | 50.50 | | |
| "MAY 2016" | 0.00 | 40.50 | 47.50 | 55.00 | 38.00 | 39.00 | 46.50 | 25.50 | 56.00 | | |

Fuente: (Elaboración propia)

| ESTACIONES PARA PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | | | | | | | |
|---|--------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--|
| MESES | Precipitación (mm) | CHO | FAC | IZT | MER | SAG | TLA | UIZ | |
| "NOV 2013" | 4.94 | 75.00 | 134.00 | 31.50 | 63.50 | 19.00 | 99.00 | 61.50 | |
| "DIC 2013" | 1.66 | 51.50 | 51.00 | 45.50 | 83.00 | 72.00 | 89.00 | 64.50 | |
| "JUN 2013" | 10.51 | 28.00 | 28.50 | 25.50 | 65.00 | 27.00 | 42.00 | 18.00 | |
| "SEP 2013" | 9.71 | 34.50 | 26.50 | 32.00 | 43.00 | 33.00 | 52.50 | 42.00 | |
| "OCT 2013" | 12.06 | 19.00 | 28.00 | 17.50 | 30.00 | 17.50 | 36.00 | 33.50 | |
| "ENE 2014" | 0.93 | 86.00 | 75.00 | 63.50 | 73.50 | 70.50 | 71.00 | 100.00 | |
| "ABR 2014" | 7.70 | 139.00 | 31.00 | 38.50 | 59.50 | 47.50 | 39.00 | 40.00 | |
| "DIC 2014" | 2.33 | 134.50 | 107.00 | 75.50 | 106.00 | 83.00 | 123.50 | 106.50 | |
| "JUN 2014" | 11.29 | 32.00 | 41.50 | 42.00 | 81.50 | 51.50 | 58.00 | 73.00 | |
| "AGO 2014" | 9.92 | 54.00 | 32.50 | 40.50 | 69.00 | 39.00 | 54.00 | 66.00 | |
| "SEP 2014" | 9.51 | 27.50 | 20.00 | 22.00 | 39.50 | 28.00 | 43.00 | 33.00 | |
| "JUN 2015" | 7.40 | 51.50 | 66.00 | 68.00 | 102.00 | 89.00 | 103.50 | 110.00 | |
| "NOV 2015" | 2.86 | 73.00 | 60.50 | 55.00 | 79.00 | 56.50 | 80.00 | 66.50 | |
| "DIC 2015" | 5.32 | 65.50 | 92.00 | 60.50 | 101.50 | 101.50 | 121.50 | 70.00 | |
| "AGO 2015" | 6.71 | 33.50 | 12.50 | 28.00 | 49.50 | 27.00 | 57.00 | 40.00 | |
| "SEP 2015" | 9.74 | 41.00 | 37.00 | 37.00 | 84.00 | 46.00 | 78.00 | 75.00 | |
| "OCT 2015" | 8.54 | 32.00 | 23.00 | 16.00 | 34.00 | 13.00 | 49.00 | 19.00 | |
| "ENE 2016" | 0.00 | 33.50 | 33.50 | 69.00 | 83.00 | 89.00 | 75.50 | 82.50 | |
| "FEB 2016" | 0.00 | 116.50 | 79.00 | 67.00 | 119.50 | 107.00 | 153.00 | 99.50 | |
| "DIC 2016" | 0.00 | 115.00 | 55.00 | 37.00 | 62.00 | 81.50 | 75.00 | 80.50 | |

Fuente: (Elaboración propia)