



**Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Química**



**ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE PARTÍCULAS
FINAS (PM_{2.5}) MEDIANTE LA TÉCNICA PIXE PARA INFERIR
TENDENCIAS, IDENTIFICAR FUENTES DE EMISIÓN Y SU
POSIBLE IMPACTO AL MICROCLIMA DE TLALNEPANTLA,
ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

Para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

Alma Angélica Neria Hernández

Tutores:

**Tutor Académico:
Dr. Arturo Colín Cruz
Facultad de Química
UAEM**

**Tutora Externa
Dra. Francisca Aldape Ugalde
Dpto. de Estudios del Ambiente
ININ**

Contenido

Índice de Tablas	4
Índice de Figuras	5
Resumen	7
Introducción	8
CAPÍTULO I Revisión del Estado del Arte	10
Antecedentes	11
Marco Teórico	15
1.1 Aerosoles y sus orígenes	15
1.2 Clasificación de las partículas según su tamaño	15
1.3 Composición de las partículas atmosféricas	16
1.4 Fuentes de emisión de las partículas atmosféricas	17
1.5 Fuentes de emisión de las partículas finas (PM _{2.5}) en la ZMVM	18
1.6 Distribución temporal y espacial de las partículas atmosféricas en la ZMVM	19
1.6.1 Temporalidad	19
1.6.2 Comportamiento horario	20
1.6.3 Distribución Espacial	20
1.7 Efectos a la salud de las partículas suspendidas	21
1.8 Legislación en materia de PM _{2.5}	22
1.9 Monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM	22
1.10 Muestreo de Partículas Suspendidas	23
1.11 Especiación de aerosoles	24
1.12 Principios básicos de la técnica PIXE	25
1.13 Instrumentación del Análisis PIXE	25
1.14 Comparación de la técnica PIXE con otras técnicas de análisis	26
1.15 Efectos de los aerosoles en clima	27
1.16 Microclima	28
1.17 Importancia de la zona de estudio	29
JUSTIFICACIÓN	30

HIPÓTESIS.....	30
OBJETIVO GENERAL	31
OBJETIVOS PARTICULARES	31
CAPÍTULO 2 Metodología	32
2.1 Selección del conjunto de muestras de partículas atmosféricas $PM_{2.5}$	34
2.2 Caracterización elemental de las $PM_{2.5}$	34
2.2.1 Preparación de las muestras para su análisis	34
2.2.2 Irradiación de muestras.....	35
2.2.3 Cálculo de concentraciones y creación de la base de datos	37
2.3 Comparativo longitudinal.....	37
2.4 Análisis de las tendencias estacionales	37
2.5 Factores de Enriquecimiento.....	38
2.6 Caracterización del sitio para la identificación de fuentes de emisión.....	38
2.7 Identificación de fuentes de emisión	38
2.8 Análisis del impacto de las $PM_{2.5}$ al microclima del área de estudio	39
2.8.1 Relación entre el contenido de sulfato de partículas $PM_{2.5}$ y la atenuación solar	39
2.8.2 Estimación de la atenuación solar	40
2.8.3 Impacto de las $PM_{2.5}$ en la temperatura local.....	41
CAPÍTULO 3 Resultados y Discusión.....	42
3.1 Selección y Clasificación de las Muestras de $PM_{2.5}$	43
3.2 Irradiación y Obtención de espectros.....	43
3.3 Análisis Cualitativo y Cuantitativo de las Muestras de $PM_{2.5}$	43
3.4 Comparativo longitudinal de las concentraciones elementales	48
3.4.1 Estadística Descriptiva.....	51
3.5 Variación Estacional de los elementos químicos presentes. Series de tiempo 2014-2015.....	52
3.5.1 Comparativo longitudinal de las tendencias estacionales.....	58
3.6 Factores de Enriquecimiento.....	60
3.6.1 Comparativo longitudinal de los factores de enriquecimiento	63
3.7 Reconocimiento del sitio bajo estudio	63
3.7.1 Perfil de vientos del sitio	64
3.7.2 Ubicación geográfica de las fuentes de emisión cercanas al sitio	65

3.8	Identificación de fuentes de Emisión.....	67
3.8.1	Matrices de correlación.....	67
3.8.2	Asociación de perfiles elementales con fuentes de emisión.....	69
3.9	Análisis del impacto de las $PM_{2.5}$ en el microclima de la zona de estudio.....	72
3.9.1	Identificación de días adecuados para analizar cambios en UV-A por efecto de $PM_{2.5}$	72
3.9.2	Relación entre el contenido de sulfato de partículas $PM_{2.5}$ y la atenuación solar.....	75
3.9.3	Estimación de la atenuación solar.....	77
3.9.4	Impacto de las $PM_{2.5}$ en la Temperatura local.....	80
3.10	Utilidad y relevancia de los resultados obtenidos.....	81
CAPÍTULO 4 Conclusiones.....		82
REFERENCIAS.....		85
ANEXOS.....		91

Índice de Tablas

Tabla 1	Procesos de Formación de las partículas con base en su tamaño.....	16
Tabla 2	Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA).....	23
Tabla 3	Comparativo MDL (ng/m^3) de técnicas para análisis elemental de PM.....	27
Tabla 4	Estaciones Climáticas consideradas para la clasificación de muestras.....	43
Tabla 5	Concentraciones Elementales 2014-2015.....	45
Tabla 6	Concentraciones Elementales 2004-2006.....	49
Tabla 7	Estadística Descriptiva.....	51
Tabla 8	Concentraciones estacionales promedio.....	58
Tabla 9	Factores de enriquecimiento por temporada 2014.....	60
Tabla 10	Factores de enriquecimiento por temporada 2015.....	62
Tabla 11	Comparativo longitudinal de los FE.....	63
Tabla 12	Ubicación de fuentes de área circundantes a la estación de monitoreo TLA.....	66
Tabla 13	Matriz de correlación de la estación Seca-Fría (Oct 2005 – Feb 2006).....	67
Tabla 14	Matriz de correlación de la estación Seca-Fría (Oct 2014 – Feb 2015).....	68
Tabla 15	Correlación entre parejas de elementos.....	68
Tabla 16	Parámetros de análisis de la correlación UV-A y SO_4 particulado.....	76
Tabla 17	Días seleccionados para elaborar perfiles de radiación.....	78

Índice de Figuras

Fig. 1 Partícula derivada de la combustión.....	16
Fig. 2 Principales categorías emisoras de $PM_{2.5}$ por jurisdicción.....	18
Fig. 3 Series de tiempo de los promedios diarios $PM_{2.5}$ durante 2015	19
Fig. 4 Distribución horaria de las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ durante 2015	20
Fig. 5 Promedio anual de las concentraciones de $PM_{2.5}$ por estación de monitoreo 2015.....	21
Fig. 6 Deposición de PM en el sistema respiratorio.....	21
Fig. 7 Ubicación de las Estaciones de Monitoreo del SIMAT	22
Fig. 9 Muestreador $PM_{2.5}$	24
Fig. 8 Colocación de Filtro para $PM_{2.5}$	24
Fig. 10 Filtro limpio y filtro con PM.....	24
Fig. 11 Interacción del Protón con el electrón de la capa más interna del átomo y la emisión del rayo X.	25
Fig. 12 Nubes Cafés por efecto de aerosoles antropogénicos.	28
Fig. 13 Distribución espacial de las $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México.	29
Fig. 14 Etapas de la metodología del Proyecto	33
Fig. 15 Preparación de muestras para Irradiación	34
Fig. 16 Colocación de Muestras en la Regleta de Irradiación	35
Fig. 17 Etapas del Análisis PIXE	36
Fig. 18 Espectro característico de una muestra de PM por análisis PIXE	36
Fig. 19 Ubicación del sitio de muestreo (TLA) y del sitio de referencia Montesillo (MON)	40
Fig. 20 Identificación de elementos en el espectro	44
Fig. 21 Espectro ajustado con AXIL	44
Fig. 22 Reporte de áreas de AXIL	45
Fig. 23 Serie de tiempo de Azufre TLA 2014-2015.....	52
Fig. 24 Serie de tiempo de Azufre TLA 2014-2015.....	52
Fig. 25 Serie de tiempo de Potasio TLA 2014-2015.....	53
Fig. 26 Serie de tiempo de Calcio TLA 2014-2015	53
Fig. 27 Serie de tiempo de Titanio TLA 2014-2015	54
Fig. 28 Serie de tiempo de Vanadio TLA 2014-2015	54
Fig. 29 Serie de tiempo de Cromo TLA 2014-2015	55
Fig. 30 Serie de tiempo de Manganeseo TLA 2014-2015	55

Fig. 31 Serie de tiempo de Hierro TLA 2014-2015.....	56
Fig. 32 Serie de tiempo de Níquel TLA 2014-2015.....	56
Fig. 33 Serie de tiempo de Cobre TLA 2014-2015.....	57
Fig. 34 Serie de tiempo de Zinc TLA 2014-2015.....	57
Fig. 35 Serie de tiempo de Plomo TLA 2014-2015.....	58
Fig. 36 Concentraciones promedio por temporada para periodos 04-06 y 14-15.	59
Fig. 37 FE por temporada TLA 2014.....	61
Fig. 38 FE por temporada TLA 2015.....	62
Fig. 39 Comparativo longitudinal de los FE.....	63
Fig. 40 Diagrama de vientos de TLA 2014-2015.....	64
Fig. 41 Búsqueda de fuentes de emisión cercaras a TLA.....	65
Fig. 42 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 115082.5.....	69
Fig. 43 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3287.....	70
Fig. 44 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 4158.....	70
Fig. 45 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3201.....	71
Fig. 46 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3979.....	71
Fig. 47 Serie de tiempo del Potasio 2014-2015 con indicadores de valores atípicos.....	72
Fig. 48 Ejemplo comparativo entre un día con nubosidad y un día despejado para el sitio de interés. .	73
Fig. 49 Imágenes satelitales de las fechas: a) 23/01/14, b) 29/01/14, c) 04/0214, d) 12/03/14, e) 05/04/14,	74
Fig. 50 Imágenes satelitales de las fechas: g) 10/06/14, h) 26/10/14, i) 01/12/14, 07/12/14.....	75
Fig. 51 Correlación entre los valores máximos diarios de UV-A y la concentración de SO_4 particulado de muestras de 10 días de 2014 con cielos despejados y baja velocidad del viento.....	76
Fig. 52 Perfiles horarios de NO_x de los sitios MON y TLA durante 17 días de la estación de seca-fría (noviembre de 2014 a febrero de 2015) con cielos despejado y baja velocidad del viento.....	77
Fig. 53 Perfiles horarios UV-A de los sitios MON y TLA durante 17 días seleccionados en la temporada de seca-fría (Nov2014-Feb2015) con cielos despejado y bajo viento.....	79
Fig. 54 Correlación entre los máximos diarios de temperatura y los máximos de concentración másica de $PM_{2.5}$ durante 73 días de la temporada seca (Nov2013 to Feb2014).....	80

Resumen

En la presente investigación se analizó la composición elemental de partículas atmosféricas con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm (PM_{2.5}) colectadas en el municipio de Tlalnepantla (TLA), Estado de México durante los años 2014-2015. El análisis se realizó mediante la técnica PIXE (Espectroscopia de Emisión de Rayos-X Inducidos por Protones). La información obtenida se usó para describir el comportamiento temporal de los elementos, calcular las aportaciones antropogénicas y naturales, identificar las posibles fuentes de emisión y evaluar el impacto en el microclima de la zona de estudio. Así mismo, estos resultados fueron comparados con resultados de un estudio previo realizado en el mismo sitio pero 10 años antes del periodo analizado. Esta comparación se realizó con el fin de evaluar la evolución de la calidad del aire en materia de PM_{2.5} a lo largo de 10 años.

Las muestras de material particulado provienen de los muestreos realizados por la Red Manual del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) adscrito a la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX (SEDEMA). El análisis del contenido elemental se realizó en el Laboratorio PIXE del Departamento de Estudios del Ambiente del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Las concentraciones elementales de la mayoría de los elementos analizados fueron mayores durante el primer período de análisis (noviembre de 2004 a marzo de 2006). Las concentraciones de Ca, Ti y Fe fueron más altas en el segundo período debido a que una mayor cantidad de actividades relacionadas con la construcción ocurrieron en 2014-2015. El análisis de las tendencias estacionales mostró que la estación seca-fría tuvo las concentraciones elementales más altas debido a la pobre dispersión de contaminantes causada por las inversiones térmicas. El cálculo del factor de enriquecimiento permitió clasificar los elementos en dos fuentes principales: origen natural (K, Ca, Ti, Cr, Mn y Fe), relacionados con la corteza terrestre, y origen antropogénico (Cl, V, Ni, Cu, Zn, Pb y S). Con el fin de mejorar la identificación de las fuentes, la matriz de correlación se utilizó para separar cinco grupos de elementos y asociarlos con estudios previos y perfiles de referencia SPECIATE Versión 4.5 US-EPA. Las fuentes identificadas en el sitio fueron: Combustión de combustible fósil, incineración de residuos municipales y peligrosos, polvo de construcción, polvo de camino pavimentado y suelo industrial.

Con base en la hipótesis propuesta, se demostró que la presencia y composición de las PM_{2.5} ocasionaron un impacto en el microclima al interferir en la transmitancia de la radiación UV. Una correlación de -0.72 entre los valores de UV-A y las concentraciones de sulfato en las partículas, indicó que altas concentraciones de sulfatos en PM_{2.5} están correlacionadas de manera inversa con valores bajos de UV-A debido a las propiedades de dispersión de radiación UV en aerosoles de sulfato. Además, se observó una atenuación solar del 27% al comparar el perfil UV-A en el sitio TLA con el perfil UV-A en el sitio de referencia seleccionado, la estación de monitoreo Montesillo, Texcoco (MON), esto indica que la contaminación del aire tiene un impacto en la cantidad de radiación UV-A medido en la superficie en cada sitio.

Introducción

El término partículas finas, $PM_{2.5}$, se refiere a partículas atmosféricas con un diámetro aerodinámico menor o igual $2.5 \mu m$. Diversos autores como Charlson *et al.*, (1992); Tai *et al.*, (2010); Patadia *et al.*, (2013) y Cheng *et al.*, (2016); entre otros, han encontrado que las $PM_{2.5}$ tienen impactos adversos sobre la salud humana, la visibilidad, los ecosistemas y el cambio climático.

Se entiende por aerosol al sistema conformado por pequeñas partículas o gotas de líquido suspendidas en una fase gaseosa, el tamaño de las partículas oscila entre 1 y 1000 micrones, las que se encuentran suspendidas en el aire tienen diámetros menores a 30 micras (IMAAC, 2020). Los aerosoles, en especial aquellos con alto contenido de sulfatos, son importantes contribuyentes a las plumas transoceánicas y transcontinentales formadas por nubes marrones atmosféricas que pueden interceptar la luz solar absorbiéndola y reflejándola, dando lugar a un efecto atenuador en la superficie de la Tierra, afectando el clima y la temperatura de amplias regiones del mundo (Ramanathan, 2007).

Las partículas atmosféricas tienen un impacto severo en la salud pública ya que afectan al sistema respiratorio y provocan enfermedades como asma, bronquitis, enfermedad pulmonar obstructiva, cáncer, fiebre, tos, constricción de los bronquios e inflamación de los pulmones (Kumar, 2017). Por lo cual es importante la recolección y el posterior análisis del material particulado para conocer su composición y evaluar sus impactos a la salud y al ambiente.

Las partículas atmosféricas pueden ser colectadas con instrumentos de tipo semiautomático que están conectados a una bomba que genera el vacío necesario para hacer pasar el flujo de aire a través del sistema, las partículas presentes en este flujo de aire están depositadas en filtros de membrana, los cuales además de ser analizados gravimétricamente para obtener la concentración en $\mu g/m^3$ en aire, preservan las muestras de material particulado susceptibles de ser analizadas a través de diversas técnicas para conocer su composición. En general, los componentes químicos predominantes del material particulado atmosférico son sulfatos, nitratos, amonio, sales marinas, polvo mineral, compuestos orgánicos, carbono negro y carbono elemental (Pöschl, 2005).

La técnica PIXE es aceptada por la comunidad científica como una de las técnicas básicas utilizadas en el estudio elemental de materia particulada aerotransportada, en virtud de las múltiples cualidades que ofrece para el estudio de este tipo de contaminantes. Está considerada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) como una de las técnicas para estudiar el contenido elemental de las partículas atmosféricas, así como por la Agencia de Protección Ambiental de la Unión Europea. Es una de las técnicas más utilizadas debido a que puede realizar el análisis en masas extremadamente pequeñas, cuando es calibrada y validada, proporciona resultados confiables para la identificación y cuantificación elementos metálicos (Johansson and Johansson, 1976)

La información sobre la caracterización de partículas atmosféricas contribuye a mejorar el entendimiento sobre los problemas ambientales y daños a la salud de la población ocasionados por este contaminante, lo cual se traduce en una oportunidad para modificar las políticas públicas ambientales para la mitigación del impacto de las partículas.



CAPÍTULO I

Revisión del Estado del Arte

Antecedentes

El desarrollo de nuestro entendimiento del fenómeno así como las regulaciones en materia de contaminación del aire han sido influenciados fuertemente por diversos episodios de contaminación a lo largo de la historia, tal es el caso del Gran Incendio de Londres en 1666. Muchos de estos eventos atrajeron la atención científica para estudiar el problema. El primer tratado sobre contaminación atmosférica: *Fumifugium, o la Inconveniencia del aire y del humo diseminado de Londres* fue escrito por John Evelyn en 1661.

En el trabajo de Brimblecombe (2011), se describen algunos de los principales episodios de contaminación atmosférica, siendo uno de los primeros en ser documentados, el caso de Muese Valley, Bélgica, en diciembre de 1930, donde las emisiones de numerosos hornos de coque, plantas de acero y diversas fábricas se acumularon a causa de una inversión térmica durante una semana cobrando la vida de aproximadamente 60 personas y muchas cabezas de ganado.

En octubre de 1952 en Londres, un sistema de alta presión ocasionó que el humo de carbón se acumulara bajo una inversión térmica a lo largo de 5 días, ocasionando que mucha gente desarrollara enfermedades respiratorias en tan solo 12 horas llevando al límite a los servicios de emergencias; una semana después el Ministerio de Salud hizo un estimado de 4703 víctimas mortales. El Parlamento presionó para que el episodio de niebla se tomara en serio y, aunque ya se contaba con legislación en materia contaminación del aire dentro de la Ley de Salud Pública de 1936, el gobierno se vio obligado a formar el Comité Beaver, cuyo informe allanó el camino para la Ley de Aire Limpio de 1956 (Brimblecombe, 2011).

En México en 1972 se realizaron los primeros intentos para aplicar criterios internacionales para el análisis de contaminantes del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, utilizando los métodos empleados por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA) para la medición de dióxido de azufre por el método de pararosnilina y para el muestreo de partículas suspendidas utilizando muestreadores de alto volumen y el análisis gravimétrico (SEDUE, 1987).

En 1986 el deterioro de la calidad del aire de la Ciudad de México era un problema grave que comprometía seriamente la salud y calidad de vida de sus habitantes. Para conocer y dimensionar esta problemática se instaló la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), con el objetivo de generar información cuantitativa sobre el deterioro progresivo que sufría la calidad del aire. Los datos que generó la RAMA durante sus primeros años confirmaron la magnitud de la crisis ambiental que ya era evidente para los habitantes de la ciudad: la presencia de elevadas concentraciones de contaminantes tóxicos. El problema era de tal severidad que la Ciudad de México fue reconocida como la ciudad más contaminada del planeta (SEDEMA, 2012).

Entre los primeros estudios serios en materia de contaminación atmosférica por partículas atmosféricas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) están los de Aldape *et al.*, (1991) y Aldape *et al.*, (1991b) sobre el contenido elemental de muestras colectadas en partícula fina durante los años de 1988, 1989 y los primeros meses de 1990. En ellos se reporta el contenido elemental, sus máximos, mínimos, y promedios, donde se observa niveles altos de azufre y plomo.

Por otro lado, en las dos últimas décadas se han publicado algunos estudios realizados en materia de caracterización de aerosoles en la ZMVM como el de Aldape *et al.*, (1996) donde se obtuvieron las variaciones temporales de las concentraciones elementales desde el azufre al plomo obtenidos por PIXE. Aldape *et al.*, (1996b), obtuvieron las concentraciones elementales en fracción fina y fracción gruesa así como los factores de enriquecimiento para identificar las posibles fuentes de emisión de muestras colectadas de manera simultánea en 3 sitios.

González *et al.*, (1999) realizó un análisis de la distribución de las fracciones durante el periodo diurno y nocturno, así como la distribución y abundancia promedio diaria del polen; encontrando que la concentración de partículas es mayor en el periodo diurno superando los límites máximos permisibles de la norma, mientras que el polen presentó un comportamiento en relación inicio de la floración de árboles.

Chow *et al.*, (2002), presenta los resultados después de un mes de muestreo (Feb-Mar, 1997) en 6 diferentes sitios de la ZMVM en términos de la composición química de PM_{10} y $PM_{2.5}$, encontrando que la mayor parte de la masa del material particulado está compuesto por carbono, sulfatos, nitratos, amonio y componentes de la corteza terrestre, siendo para las partículas finas los aerosoles carbonosos los que constituyen el 50% de la masa de PM, seguidos por un 30% de aerosoles inorgánicos y 15% de material geológico.

En Salcedo *et al.*, (2006) se describe la caracterización de aerosoles menores a 1 μm de diámetro aerodinámico durante una campaña de 2 meses en 2003 mediante un monitor de especiación química de aerosoles por espectrometría de masas, el cual aportó información en tiempo real. Las distribuciones de las especies mostraron un modo de acumulación que contiene principalmente compuestos orgánicos oxigenados y compuestos inorgánicos secundarios. Los resultados obtenidos aportan información en materia de la neutralización de aerosoles así como la evidencia de producción fotoquímica de aerosoles secundarios.

De acuerdo con Aldape *et al.*, (2012), después de un estudio de 2 años (2003-2004) en 7 sitios de la ZMVM, a partir del contenido de azufre en las partículas es factible determinar el contenido de sulfatos en la atmósfera aplicando un factor de conversión, lo cual a su vez es congruente con otros estudios previos. Así mismo concuerda con Salcedo *et al.*, (2006) sobre la formación secundaria y regional de sulfatos a partir de las emisiones de SO_2 . También se resalta la importancia de los aerosoles de sulfatos como uno de los contaminantes más importantes para el cambio climático debido a sus propiedades ópticas.

Flores *et al.*, (2017), retoma la importancia de los sulfatos en materia de cambio climático así como la importancia de la medición confiable de los mismos, por lo que presenta los resultados de comparación de dos métodos distintos para la medición de sulfatos: PIXE y el Monitor de Aerosoles y Gases en Aire Ambiente (MARGA), analizando muestras de $PM_{2.5}$ en el norte de la ZMVM para el caso de PIXE y el monitoreo continuo

en el mismo sitio por parte del MARGA. Se encontró una buena concordancia entre ambos ejercicios lo cual otorga un voto de confianza adicional al protocolo de PIXE adoptado por el ININ.

Estos estudios sobre partículas atmosféricas en la ZMVM han ofrecido amplios resultados sobre sus propiedades físicas y químicas, pero algunos de ellos con un enfoque limitado en cuanto a campañas cortas de muestreo. Por lo que es necesaria la realización de estudios con periodos de muestreo más largos con una frecuencia menor de muestreo para poder efectuar un análisis estadístico más confiable (Aldape *et al.*, 2012).

El análisis de composición elemental de partículas atmosféricas es un proceso complejo debido a las concentraciones de sus componentes, algunas incluso del orden de ng/m³ lo cual conlleva la necesidad de equipos con gran sensibilidad y bajos límites de detección. Las limitaciones tecnológicas de la época (1980 - 1990) se tradujeron en un auge en el uso de las técnicas nucleares, las cuales aprovechaban las propiedades atómicas de los analitos para su identificación y cuantificación.

La técnica PIXE fue una de las técnicas pioneras con las que se llevaron a cabo los primeros estudios de muestras atmosféricas a nivel mundial en virtud de las bondades con las que cuenta, precisamente para estudios de muestras de aerosoles atmosféricos aerotransportados (Johansson and Johansson, 1976); (Matter and X-ray, 1999).

La relación entre los aerosoles y su impacto en la alteración de algunos de los parámetros meteorológicos se ha estudiado a lo largo de las últimas tres décadas. Charlson *et al.*, (1992), describe la influencia de los aerosoles en el cambio climático al reflejar la luz ultravioleta del sol e incrementar el albedo de las nubes, estimando una reducción global promedio de -1 a -2 W/m² debido a los aerosoles antropogénicos de sulfatos.

En el trabajo de Ramanathan *et al.*, (2001), se detalla cómo estos cambios en la radiación solar tienen un impacto en el ciclo hidrológico al alterar la estructura de la temperatura de la atmósfera y la disminución de precipitaciones, y como estas alteraciones comprometen la disponibilidad del agua dulce. Diversos autores como Collins *et al.*, (2001); Huang *et al.*, (2006) y Nabat *et al.*, (2014), entre varios otros, han demostrado la relación entre las variables meteorológicas y la composición de los aerosoles, empleando simulación y modelación de estas variables.

Particularmente en la Ciudad de México, se ha analizado el efecto de la contaminación del aire y su impacto en la radiación ultravioleta. Jáuregui & Luyando, (1999) estimaron la atenuación de la radiación en la Ciudad de México comparando la intensidad de radiación global observada en una estación en el centro de la ciudad, en relación con la observada en un ambiente rural más limpio. Encontraron que, en promedio, la ciudad recibe en días despejados durante la estación seca un 21,6% menos de energía solar que el entorno rural.

Matsumoto *et al.*, (2014) midió la radiación solar global horizontal durante 14 años consecutivos (1999 a 2012). Como parte de sus conclusiones, encontraron que a partir de las comparaciones de irradiancia solar entre las ubicaciones norte y sur, se detectaron ligeras diferencias en el perfil de irradiación durante los dos

días medidos, probablemente debido a las condiciones atmosféricas naturales, pero también debido a los procesos antropogénicos.

Los trabajos citados anteriormente ponen de manifiesto que la contaminación del aire es un problema serio que representa un alto riesgo para la población. Particularmente hablando de México se puede observar que la calidad del aire ha tenido una evolución favorable pasando de ser la ciudad más contaminada a reducir considerablemente las concentraciones de algunos contaminantes, esto gracias a diversas políticas públicas tales como el programa “Hoy no Circula”, el programa de Verificación Vehicular de emisiones contaminantes, el endurecimiento en la vigilancia ambiental a través de inspecciones a las industrias, el incremento de alternativas y cobertura de transporte público, entre otras. Pero a pesar de esta situación la ZMVM todavía atraviesa por eventos de contingencias ambientales en materia de calidad del aire debido a altas concentraciones de Material Particulado (PM) y Ozono. Lo cual es un indicativo de que aún hay un amplio campo de investigación referente a identificar los patrones de formación y dispersión de contaminación del aire, las fuentes de emisión así como los efectos a la salud de los seres vivos.

Por lo que el presente trabajo tiene por objeto aportar información significativa en materia de las tendencias del comportamiento de las $PM_{2.5}$ y sus posibles fuentes de emisión a partir de la caracterización elemental de muestras recolectadas a lo largo de 2 años, lo cual a su vez permite realizar un análisis estadístico confiable con un mayor número de datos. Asimismo se pretende inferir la relación entre la composición de las partículas y su posible efecto en la modificación de las variables meteorológicas de la zona de estudio.

Marco Teórico

1.1 Aerosoles y sus orígenes

El término aerosol es un concepto fisicoquímico que define la dispersión coloidal de pequeñas partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso (IMAAAC, 2020). Existen dos fuentes principales de partículas finas en la atmósfera: La Materia Particulada Primaria, que se deriva directamente de la dispersión de sólidos de la superficie de la Tierra, así como también la que es emitida directamente por fuentes antropogénicas; (Brimblecombe, 1996).

La Materia Particulada Secundaria: son aquellas que se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos, llamados precursores. Los principales gases precursores de las partículas 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 partículas de sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos (INECC, 2020)

En el trabajo de Eatough *et al.*, (1981) se describe la conversión de los gases dióxido de azufre a partículas de sulfatos y Khoder, (2002) describe la conversión de dióxido de nitrógeno a partículas nitratos, a través de las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, así como su relación con la lluvia ácida.

1.2 Clasificación de las partículas según su tamaño

Las partículas suspendidas también se clasifican por su tamaño, pero como tienen una infinidad de formas no es posible caracterizarlas con una sola dimensión geométrica real. Por ello, se utiliza el diámetro aerodinámico como un indicador del tamaño de la partícula; este indicador es igual al diámetro de una partícula esférica de densidad unitaria que tiene la misma velocidad terminal que la partícula considerada, independiente de su forma, tamaño o densidad bajo condiciones de temperatura, presión y humedad existentes (WHO, 2006).

El tamaño de las partículas suspendidas es una característica muy importante, porque mientras más pequeño sea su diámetro aerodinámico mayor será su capacidad de penetrar a áreas más profundas del sistema respiratorio. Las Partículas Suspendidas Totales (PST), comprenden un rango de tamaño entre 0.005 y 100 micrómetros o micras (μm) de diámetro aerodinámico; sin embargo, la mayoría de las partículas presentes en la atmósfera tienen un tamaño menor a 40 μm . La fracción gruesa la componen las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10 μm ($PM_{2.5-10}$), la fracción fina comprende las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm ($PM_{2.5}$), y las ultrafinas se refieren a las partículas menores a 1 μm (PM_1), (INECC, 2020). En la Tabla 1 se presentan los procesos de formación de los diversos tamaños de partículas suspendidas.

Tabla 1 Procesos de Formación de las partículas con base en su tamaño. Fuente: INECC 2020

	TAMAÑO DE PARTÍCULAS		
	ULTRAFINAS (PM ₁)	FINAS (PM _{2.5})	GRUESAS (PM ₁₀)
PROCESO DE FORMACIÓN	Nucleación de gases atmosféricos, incluidos H ₂ SO ₄ , NH ₃ y algunos compuestos orgánicos	Condensación de Gases Coagulación de partículas pequeñas	Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión, rompimiento de sólidos/gotas Evaporación de aerosoles
	Condensación de gases	Reacción de gases en o sobre las partículas	Suspensión de polvos
		Evaporación de neblina y gotas en agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado	Reacción de gases en o sobre partículas

1.3 Composición de las partículas atmosféricas

La composición química de la materia particulada varía dependiendo de la locación, la temporalidad, la cercanía a las fuentes de emisión y también de las condiciones ambientales. En la Fig. 1 se muestra una micrografía de una partícula atmosférica generada a partir de un proceso de combustión.

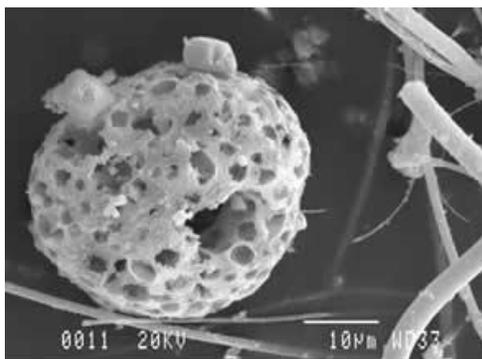


Fig. 1 **Partícula derivada de la combustión**
Fuente: http://www.aragonaire.es/particulate_matter.php?n_action=classification

La fracción gruesa de partículas está compuesta predominantemente por elementos químicos provenientes del suelo debido a la erosión, y de procesos naturales como el polen, erupciones de volcanes, biomasa, etc., entre los cuales se encuentran los siguientes elementos Si, Fe, Al, Ca, Mg y carbón orgánico. Las partículas finas contienen elementos químicos asociados principalmente a fuentes antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, quema de biomasa y actividades industriales (procesos que se realizan en petroquímicas, fertilizantes, plantas termoeléctricas, refinerías, industrias químicas, etc). Muchos elementos pueden encontrarse en la fracción PM_{2.5}, como lo son S, Pb, Si, Zn, V, Cu, Cd, Cr, Carbono Negro (BC), Fe, K, Na, Carbono Orgánico (OC), Cl y N (Droprinichinski, 2017). De acuerdo con INECC, (2020) los compuestos mayoritarios de las PM son:

Sulfatos. Son principalmente componentes secundarios que se originan de la oxidación del SO_2 , aunque pueden estar presentes como un componente primario derivado de la sal de los mares o de la materia mineral, como el yeso.

Nitratos. La forma más común de los nitratos en las partículas suspendidas es como NH_4NO_3 , compuesto que se deriva de la neutralización de vapores de HNO_3 por NH_3 . También los nitratos pueden estar presentes como nitrato de sodio.

Amonio. Los compuestos más comunes de amonio presentes en las partículas son el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) y el nitrato de amonio (NH_4NO_3).

Sodio y cloro. Principalmente se originan de la sal marina.

Carbón elemental. Está constituido principalmente por carbón negro (hollín) formado durante la combustión de combustibles fósiles y biomasa.

Carbón orgánico. Comprende los compuestos orgánicos, tanto primarios, derivados de fuentes móviles o industriales, como secundarios, resultado de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles.

Componentes minerales. Se originan del material de suelo y roca por procesos de la fuerza del viento, de construcción y demolición. Los suelos y las rocas son ricos en aluminio, sílice, hierro y calcio.

Agua. Hay componentes en las partículas ambientales, especialmente las sales como $(NH_4)_2SO_4$, NH_4NO_3 y $NaCl$, que pueden tomar agua de la atmósfera y convertirse en gotas líquidas. Esta agua puede representar un componente significativo de la masa de las partículas.

1.4 Fuentes de emisión de las partículas atmosféricas

De acuerdo con INECC, (2020), las fuentes de emisión de las partículas pueden dividirse en Antropogénicas y Naturales. A su vez, las fuentes antrópicas en fuentes fijas o estacionarias, fuentes de área y fuentes móviles, mientras que las naturales se dividen en biogénicas y geogénicas.

Fuentes fijas o estacionarias Estas fuentes se refieren a toda instalación establecida en un solo lugar y que tenga como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. En este tipo de establecimientos, las emisiones de partículas primarias pueden generarse a través de actividades de combustión o como resultado de diversos procesos que se llevan a cabo dentro de las fuentes fijas.

Fuentes de área. Las fuentes de área incluyen aquellas fuentes que son demasiado numerosas y dispersas, pero que en conjunto son emisoras significativas de contaminantes. Ejemplo de ellas son las gasolineras, tintorerías, actividades de construcción, quemadas agrícolas, resuspensión de polvos de caminos, entre otras.

Fuentes móviles. Son todas las fuentes motorizadas con autorización para circular por caminos públicos, como motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, así como aquellas que no circulan por carretera, como maquinaria de uso agrícola, locomotoras, embarcaciones marinas, maquinaria para construcción, entre otras. Las emisiones de este tipo de fuentes son principalmente un producto de la combustión y evaporación de los combustibles utilizados, así como del desgaste tanto de los frenos como de las llantas.

Fuentes geogénicas. Comprenden todas las de origen geológico, como los volcanes, y las que tienen que ver con el suelo; aunque en algunos casos también se consideran fuentes geogénicas los incendios forestales y la erosión eólica

1.5 Fuentes de emisión de las partículas finas (PM_{2.5}) en la ZMVM

Con base en el Inventario de Emisiones de la CDMX 2014 (SEDEMA, 2016), en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se generan más de 31 000 toneladas anuales de PM₁₀, de las cuales, el 41% son PM_{2.5} (casi 13 000 toneladas). Las mayores emisiones de PM_{2.5}, provienen de los municipios conurbados del Estado de México, excepto para las actividades de la construcción y la operación de tractocamiones y autobuses.

Como se ilustra en la Fig. 2, las actividades de la construcción y las vialidades pavimentadas son las principales categorías de emisión de PM_{2.5}, contribuyendo con el 16% y 12% respectivamente. Sin embargo, se presentan varias categorías importantes de mencionar, como es la combustión habitacional, debido a la cantidad de gas LP que se utiliza en dicho sector, los tractocamiones por el tipo de combustible que utilizan (diésel), al igual que los autobuses y camiones pesados de carga, estos tres tipos de vehículos aportan el 17% del total de este contaminante. El sector industrial tiene aportes significativos de PM_{2.5}, principalmente en el sector químico de jurisdicción federal y por la fabricación de productos a base de minerales no metálicos (cementerías, concreteras, caleras, otros), debido a los procesos de combustión y el manejo de las materias primas.

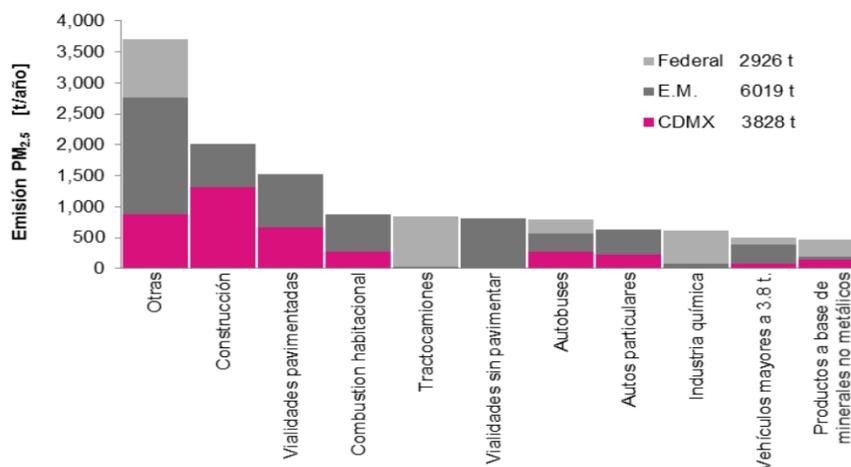


Fig. 2 Principales categorías emisoras de PM_{2.5} por jurisdicción.

Fuente: Inventario de emisiones de la CDMX (SEDEMA, 2016)

La distribución espacial se ve influenciada por la densidad de población, considerando que las mayores emisiones provienen de las actividades de la construcción, de las vialidades y de la combustión en el sector habitacional, las zonas de mayor concentración se encuentra en los municipios con alta población. Asimismo, se observan algunos puntos de altas emisiones, debido a que se conjuntan las actividades industriales, básicamente en Azcapotzalco y Tlalnepantla de Baz (SEDEMA, 2016).

1.6 Distribución temporal y espacial de las partículas atmosféricas en la ZMVM

1.6.1 Temporalidad

Con base en las observaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA, se ha identificado una temporada del año en la cual se observa un incremento importante en las concentraciones de partículas suspendidas y que ha denominado *Temporada de Partículas*. Se presenta generalmente durante los meses de la temporada seca-fría (desde noviembre hasta mediados de febrero) (Fig. 3), meteorológicamente se caracteriza por una disminución en la temperatura y la humedad, ausencia de lluvia, disminución en la intensidad solar y un incremento en la frecuencia y duración de los episodios de inversión térmica en la cuenca. Adicionalmente, los niveles de contaminación por partículas suspendidas, tanto PM_{10} como $PM_{2.5}$, se incrementan significativamente durante diciembre por las celebraciones propias de la temporada, el aumento en la actividad vehicular y el uso de juegos de pirotecnia.

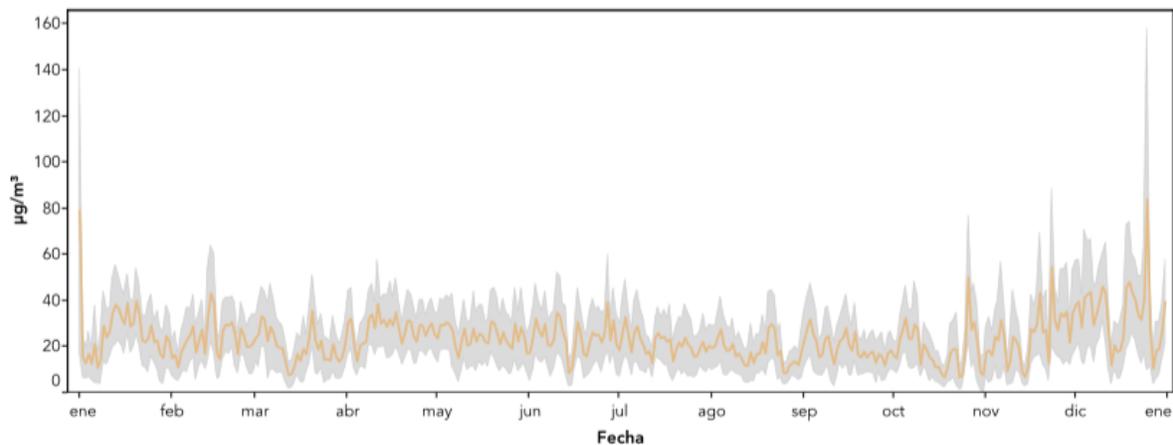


Fig. 3 **Serie de tiempo de los promedios diarios $PM_{2.5}$ durante 2015**
Fuente: SEDEMA, 2016

1.6.2 Comportamiento horario

La mayor parte de las partículas con diámetros mayores a $2.5 \mu m$ se originan en la resuspensión del polvo del suelo, por el paso de los automóviles. Esta contribución será mayor en las zonas en donde hay actividad vehicular intensa. En las estaciones de monitoreo ubicadas en la zona conurbada, los máximos diurno y vespertino son evidentes y pueden ser de magnitudes similares, mientras que en las estaciones de monitoreo localizadas en la Ciudad de México se distingue el pico matutino, pero el pico vespertino es significativamente menor. Además, el pico matutino generalmente tiene un desfase de 1 a 3 horas con respecto a las estaciones ubicadas en la zona conurbada. Lo anterior se puede explicar por la diferencia en los patrones del tránsito entre ambas zonas. Por otra parte, la concentración de $PM_{2.5}$ exhibe un pico de concentración centrado alrededor de las 11:00 de la mañana (Fig. 4). Este incremento está asociado directamente con la formación de aerosoles secundarios a partir de la oxidación de los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, para formar nitratos y sulfatos, respectivamente. Además de la contribución de aerosoles orgánicos secundarios (SEDEMA, 2015).

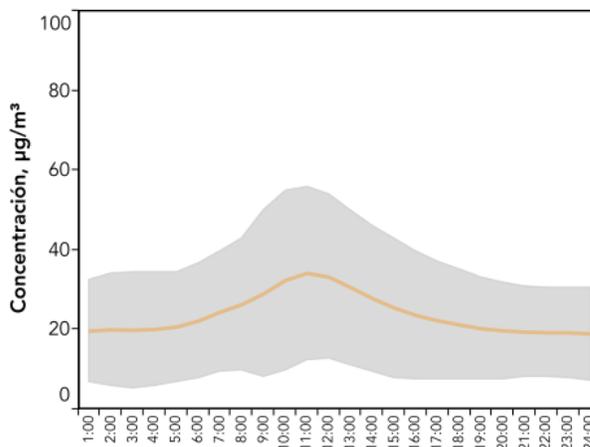


Fig. 4 **Distribución horaria de las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ durante 2015**
Fuente: SEDEMA, 2016

1.6.3 Distribución Espacial

Históricamente las concentraciones máximas se han registrado en estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana, esto por las contribuciones del polvo resuspendido proveniente de las zonas agrícolas del norte, por la industria abundante en esa región y el intenso tránsito vehicular (Fig. 5). Durante la temporada seca son frecuentes las tolvaneras en las estaciones ubicadas cercanas a los terrenos de uso agrícola (SEDEMA, 2016).

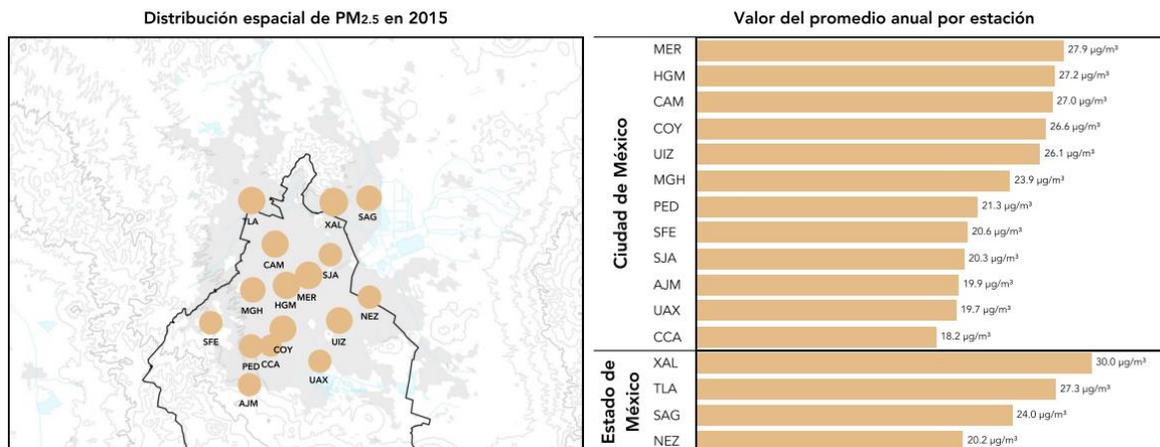


Fig. 5 Promedio anual de las concentraciones de PM_{2.5} por estación de monitoreo 2015
Fuente: SEDEMA, 2016

1.7 Efectos a la salud de las partículas suspendidas

El tamaño de la materia particulada es un factor muy importante en la definición de los efectos a la salud (Fig. 6), ya que las partículas más pequeñas penetran más profundamente en el sistema respiratorio y pueden incluso alcanzar el torrente sanguíneo (Droprinchinski, 2017).

Las partículas atmosféricas tienen un impacto severo en la salud pública ya que afectan al sistema respiratorio ocasionando problemas de salud como asma, bronquitis, enfermedad obstructiva, cáncer, fiebre, tos, constricción de los bronquios e inflamación de los pulmones (Kumar, 2017).

Existen pruebas sólidas que apoyan la relación causal entre la exposición a partículas finas (PM_{2.5}) con los efectos cardiovasculares y el incremento de la mortalidad. Los efectos específicos incluyen muerte por problemas cardiovasculares, ingresos hospitalarios por cardiopatía isquémica e insuficiencia cardíaca congestiva, cambios en la variabilidad de la frecuencia cardíaca, marcadores de estrés oxidativo y marcadores de aterosclerosis (SEDEMA, 2016).

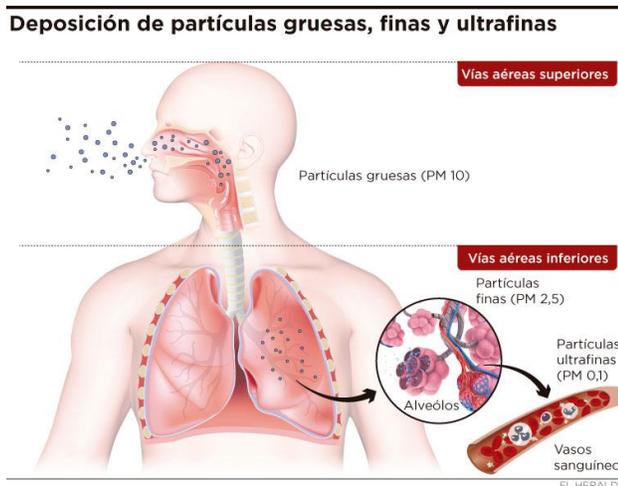


Fig. 6 Deposición de PM en el sistema respiratorio
Fuente: El Heraldo, 2016

1.8 Legislación en materia de PM_{2.5}

En México la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-2014) establece los indicadores para partículas suspendidas:

Partículas menores a 10 μm : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual; **75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , promedio de 24 h.

Partículas menores a 2.5 μm : 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual; **45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , promedio de 24 h.

Es decir, un sitio cumple con el límite de 24 horas cuando el promedio aritmético de las mediciones horarias a lo largo de 24 horas, es menor o igual que 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀ y 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}.

De acuerdo con el Informe Anual de Calidad del Aire 2016 (SEDEMA, 2017), las concentraciones de PM_{2.5} excedieron los valores de la norma 78 días del 2016.

1.9 Monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM

La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) es responsable del monitoreo de la calidad del aire de la ZMVM, para tal propósito cuenta con la Dirección de Monitoreo Atmosférico, la cual a su vez se encarga de la operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) que es el responsable de la medición permanente de los principales contaminantes del aire.

El SIMAT cuenta con más de 30 sitios de monitoreo distribuidos en el área metropolitana, comprendiendo demarcaciones del Distrito Federal y la zona conurbada del Estado de México (Fig. 7). Estos sitios se conocen como estaciones de monitoreo de la calidad del aire, y en la mayoría se utilizan equipos continuos para realizar la medición de los contaminantes criterio requeridos por la normatividad federal: dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y partículas suspendidas (PM). En algunos de ellos se realizan también mediciones continuas de las principales variables meteorológicas de superficie (temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa) incluyendo la radiación solar ultravioleta (SIMAT, 2019).

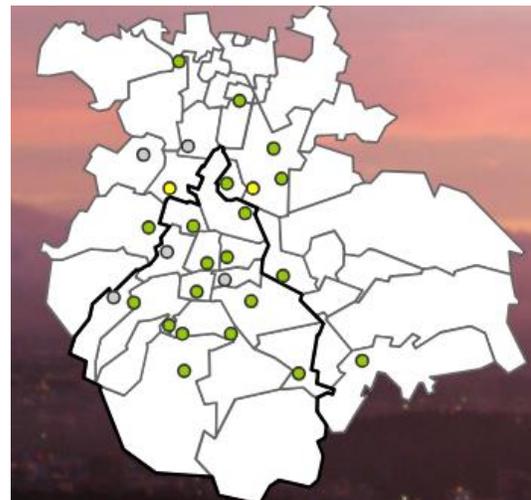


Fig. 7 **Ubicación de las Estaciones de Monitoreo del SIMAT**

Fuente: <https://aire.cdmx.gob.mx>

apropiada el estado de la calidad del aire, por ello, la operación del programa de monitoreo requiere también de metodologías y estándares para la medición, así como de un programa continuo de aseguramiento de la calidad.

El SIMAT difunde el índice de calidad del aire, a través de su sitio web (<https://aire.cdmx.gob.mx>), redes sociales y por vía telefónica (IMECAtel 5278-9931). El Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) es un indicador diseñado para informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, muestra que tan contaminado se encuentra el aire y cuáles podrían ser los efectos en la salud.

El índice se calcula para cinco de los contaminantes criterio: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas; se representa con una escala que va de 0 a 500, donde el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante. Un valor menor a 100 se considera satisfactorio y con un bajo riesgo para la salud. Cualquier nivel superior a 100 implica algún riesgo para la salud, entre más grande es el valor del índice, mayor es la contaminación y el riesgo, como se muestra en la Tabla 2 (SIMAT, 2019).

Tabla 2 **Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA)**

Fuente: (SIMAT, 2019).

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.

1.10 Muestreo de Partículas Suspendidas

El SIMAT cuenta con la Red Manual la cual es responsable de la recolección de muestras de partículas suspendidas para su análisis gravimétrico como referencia a los equipos automáticos. Esta red está integrada por 11 sitios y utiliza equipos manuales para realizar muestreos de 24h que se realizan una vez cada seis días en cada sitio.

El método manual de muestreo se realiza con instrumentos de tipo semiautomático (Fig. 8) que están conectados a una bomba que genera el vacío necesario para hacer pasar el flujo de aire a través del sistema a una tasa de 16.6 L/min ($1 \text{ m}^3/\text{h}$) (Partisol, 2000).

En un principio el aire ingresa al cabezal el cual, debido a su diseño aerodinámico, sólo permite el ingreso de partículas atmosféricas con diámetros aerodinámicos iguales o menores a 10 micrómetros (μm), las cuales son conducidas a un ciclón de corte que sólo permite el paso a partículas $PM_{2.5}$ que son dirigidas hasta impactarse en una membrana de teflón de 47 mm de diámetro y $2 \mu\text{m}$ de poro, como se presenta en la Fig. 9. El equipo cuenta con un microprocesador y un sistema de control de flujo volumétrico que se integran para mantener los parámetros precisos de muestreo (BGI, 2007).



Fig. 9 **Muestreador $PM_{2.5}$**
Fuente: SEDEMA, 2015



Fig. 8 **Colocación de Filtro para $PM_{2.5}$**
Fuente: BGI, 2010

Los filtros son pesados antes del muestreo, en condiciones óptimas de humedad y ausencia de estática, así como también posteriormente al muestreo con el fin de cuantificar la masa de partículas (Fig. 10). Este dato aunado al flujo de aire del muestreador, permite calcular la concentración ambiental de PM en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esta concentración es un valor de referencia para los equipos automáticos (SEDEMA, 2016).



Fig. 10 **Filtro limpio y filtro con PM**
Fuente: SEDEMA, 2014

1.11 Especiación de aerosoles

La composición química de las partículas es muy diversa y depende, principalmente de la fuente emisora y del mecanismo de formación de las partículas. En términos generales se divide en fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica contiene cientos o miles de compuestos dentro de los que se encuentran el carbono elemental, carbón orgánico (que comprende los compuestos orgánicos tanto primarios como secundarios que son resultado de la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles) y material biológico que

incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y metales térreos (Blanco, et al, 2015).

Conocer la composición de las partículas, así como su concentración elemental es importante, ya que permite un mejor entendimiento de sus fuentes de emisión, interacción en la química atmosférica y sus efectos a la salud, entre otros aspectos.

La composición de los aerosoles atmosféricos puede ser analizada mediante diversas técnicas como Fluorescencia de Rayos X (XRF), Espectroscopia de Inducción de Plasma Acoplado (ICP), Absorción Atómica, Espectroscopia de Masas (MS), Análisis por Activación Neutrónica y la Espectroscopia de Emisión de Rayos X Inducidos por Partícula cargada (PIXE), entre otras técnicas.

La Técnica PIXE es aceptada por la comunidad científica como una de las técnicas básicas utilizadas en el estudio del contenido elemental de materia particulada aerotransportada, en virtud de las múltiples cualidades que ofrece para el estudio de este tipo de contaminantes (Johansson and Johansson, 1976).

1.12 Principios básicos de la técnica PIXE

Las partículas con carga (protones), que provienen de un acelerador, son transportados hasta una cámara al alto vacío (10^{-7} tors) en la cual está contenida la muestra a ser analizada. El haz de protones excita los electrones de las capas más internas de los átomos de la muestra. La excitación electrónica provoca a su vez la emisión de rayos X.

Los protones provocan la excitación de los átomos de la muestra, sacando un electrón de una de las capas más internas creando a su vez una vacancia como se observa en la Fig. 11. Posteriormente, se produce una desexcitación mediante la transferencia de una electrón de la capa inmediata superior a la vacancia creada. Mediante este proceso un fotón de energía característico del elemento presente en la muestra es emitido, permitiendo identificar al elemento correctamente (Johansson, 1995).

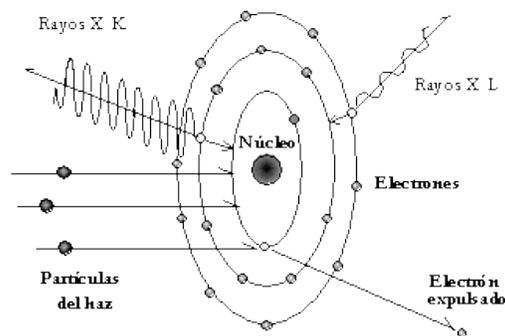


Fig. 11 **Interacción del Protón con el electrón de la capa más interna del átomo y la emisión del rayo X.** Fuente: Física, UNAM, 2015

1.13 Instrumentación del Análisis PIXE

El sistema está compuesto por una fuente radiactiva de Cs a partir de la cual se obtienen los protones, los cuales son conducidos al acelerador donde, a través de campos electromagnéticos los protones son atraídos

e impulsados, para después pasar a la línea y obtener la forma de un haz condensado por medio de filtros aerodinámicos y colimadores.

Posteriormente, el haz llega a la cámara de irradiación donde incide sobre un área específica de la muestra ocasionando una alteración en la distribución de los electrones desestabilizando a los átomos, los cuales vuelven a su estado de equilibrio mediante la emisión de rayos X característicos, lo cual es a su vez una respuesta medible.

El Detector de Ge(Li) es un diodo transductor tipo PIN que capta los rayos X y los convierte en pulsos eléctricos que pasan al preamplificador y amplificador donde mediante diversos filtros paso banda se amplifica la amplitud de los pulsos eléctricos los cuales pasan al convertidor analógico-digital (ADC) del Analizador Multi-Canal (MCA) en donde la señal analógica se convierte en dígitos numéricos y donde al graficar estas cuentas se obtiene un espectro característico (Gedke, 1972).

A partir del espectro se identifican los elementos presentes en éste, usando como referencia una curva de calibración de energía contra canal, la cual es construida a partir de estándares de alta pureza. Una vez identificados los elementos se procede a cuantificar la abundancia de cada elemento presente en el espectro. La abundancia del elemento es proporcional a la cantidad de rayos X producidos durante la irradiación y a la carga de protones para excitar cada átomo. A su vez la cantidad de rayos X es igual al área bajo el pico y la carga es un parámetro experimental que se mide (Ruiz, 2009).

1.14 Comparación de la técnica PIXE con otras técnicas de análisis

Las principales ventajas de PIXE son su carácter multielemental, la alta sensibilidad, límites de detección absolutos hasta de 10^{-12} g, su capacidad para analizar muestras muy pequeñas, en masa y en dimensiones, su rapidez de análisis (tiempos de bombardeo de 10 a 15 minutos por muestra), la posibilidad de automatización y el hecho de que, en general, es no destructiva. Comparada con la técnica de Fluorescencia de Rayos X por dispersión de energía (XRF-DE), PIXE permite analizar más rápidamente masas más pequeñas. Otra característica importante es que se puede complementar con técnicas de análisis de haces de iones (IBA), tales como espectrometría de dispersión elástica, análisis por reacción nuclear, siendo factible la medición simultánea de elementos ligeros (Li, B, C, N, O y F) (Aldape, *et al.*, 2010).

Las desventajas más serias es que requiere de un acelerador de partículas y que comercialmente los sistemas PIXE no son muy comunes ni se encuentran disponibles de inmediato. La gran mayoría de los laboratorios PIXE han construido sus propios sistemas y los sistemas comerciales son usualmente construidos bajo pedido. Otras limitaciones de la técnica, las cuales son compartidas también por XRF, son que sufre de interferencias espectrales, que los efectos de la matriz deben ser tomados en cuenta y que no permite mediciones directas de elementos ultra trazas que están presentes a niveles de ng/g. El análisis de depósitos pequeños de aerosoles, colectados por muestreadores compactos que proveen una buena resolución en tiempo o tamaño de partícula.

En la Tabla 3 se presentan los Límites Mínimos de Detección (MDL) de las técnicas analíticas más populares para el análisis de materia particulada. Después de Inducción de Plasma Acoplado a Espectrómetro de Masas (ICP-MS), PIXE es la siguiente con los MDL menores, para la mayoría de los elementos listados.

Tabla 3 **Comparativo MDL (ng/m³) de técnicas para análisis elemental de PM**

Fuente: Constructo del Autor

	(Furger et al., 2017)	(Dillner et al., 2007)		Presente estudio
	ICP-OES	ICP-MS	XRF	PIXE
S	7.7			17.3
Cl				8.47
K	37.8	0.8	6	4.24
Ca	49.2	1.4	4	2.4
Ti	1.04	0.4	4	2.14
V		0.8	2	2.04
Cr		0.5	2	1.81
Mn		0.9	2	1.88
Fe	3.4	0.4	2	1.91
Ni				2.81
Cu		0.6	1	4.8
Zn		1.1	1	4.56
Pb		0.1	2	29.3

1.15 Efectos de los aerosoles en clima.

De acuerdo con Kaufman *et al.*, (2002), los efectos de los aerosoles sobre el clima difieren de los de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) de dos maneras adicionales. Debido a que la mayoría de los aerosoles son altamente reflectantes, elevan el albedo de nuestro planeta, enfriando así la superficie y contrarrestando efectivamente el calentamiento de los gases de efecto invernadero en un rango de 25 a 50%. Sin embargo, los aerosoles que contienen partículas de grafito negro y carbón alquitranado (presentes en el humo y en la bruma urbana) son oscuros y, por lo tanto, absorben fuertemente la luz solar entrante y su albedo disminuye. Los efectos de este tipo de aerosol son dobles, tanto el calentamiento de la atmósfera como el enfriamiento de la superficie antes de que se produzca una redistribución de la energía en la columna.

La segunda forma en que los aerosoles difieren de los GEI es a través del efecto de los aerosoles sobre las nubes y la precipitación. En las regiones contaminadas, las numerosas partículas de aerosol comparten el agua condensada durante la formación de nubes, reduciendo el tamaño de las gotas de las nubes en un 20-30%, provocando un aumento en la reflectancia de la luz solar de hasta un 25% y enfriando la superficie de la Tierra. Las gotas de nubes, más pequeñas y contaminadas, son ineficaces en la producción de precipitación, por lo que en última instancia pueden modificar los patrones de precipitación en regiones pobladas (Kaufman *et al.*, 2002).

El oscurecimiento global (Global Dimming) se define como la reducción gradual en la cantidad de radiación que llega a la superficie de la Tierra. Este fenómeno, no tan conocido como el calentamiento global, también se atribuye a actividades antropogénicas y es originado por la acumulación de partículas-aerosoles que crean en la atmósfera grandes nubes de tono café (Fig. 12), en las que los aerosoles actúan como núcleos de condensación de humedad, lo que da lugar a la formación de nubes con esa tonalidad, interceptando una gran cantidad de radiación solar, lo que provoca el oscurecimiento global (Aldape *et al.*, 2010).

Tai *et al.*, (2010), demostró mediante modelos de regresión lineal múltiple que la variación diaria en meteorología puede explicar hasta en un 50% de la variabilidad de $PM_{2.5}$, con respecto a la temperatura, la humedad relativa (HR), la precipitación y la circulación. La temperatura se correlaciona positivamente con el sulfato, el carbono orgánico (OC) y el carbono elemental (EC). La HR está positivamente correlacionada con sulfato y nitrato, pero negativamente con CO y EC. La precipitación está fuertemente correlacionada negativamente con todos los componentes de $PM_{2.5}$.



Fig. 12 **Nubes Cafés por efecto de aerosoles antropogénicos.**
Fuente: NASA, 2005

1.16 Microclima

Se entiende por microclima a un sector terrestre de reducidas dimensiones, participe de unos rasgos particulares en relación al entorno en que se integra debido a condiciones naturales particulares o a modificaciones artificiales inducidas por el hombre (Saiz, 2015).

Dentro del ámbito de la ecología, se define como un clima local de características distintas a las de la zona en que se encuentra (RAE, 2020). Además de existir microclimas naturales, existen otros generados artificialmente los cuales son creados fundamentalmente en las ciudades o áreas urbanas.

De acuerdo con Tumini, 2013, las características principales del microclima urbano son:

- Temperaturas mayores que en su entorno, especialmente en el periodo nocturno
- Reducción de la amplitud térmica diaria y modificación de las horas pico de temperatura
- Modificación del régimen de vientos en distribución e intensidad por la presencia de edificios y las turbulencias ocasionadas por la configuración geométrica y temperatura de las superficies urbanas
- Modificación de la cantidad e intensidad de las precipitaciones, a consecuencia de la reducción de la evotranspiración y los flujos ascendentes del aire

1.17 Importancia de la zona de estudio

De acuerdo con el Informe de la Calidad del Aire de la CDMX (SEDEMA, 2016), en materia de distribución espacial de las $PM_{2.5}$, las concentraciones máximas se observaron en las estaciones ubicadas en la zona conurbada del Estado de México, esto debido a la contribución de partículas originadas por el intenso tránsito vehicular, las actividades agrícolas en los alrededores, así como el polvo levantado por el viento proveniente de las zonas erosionadas que rodean a la región urbana y las derivadas de la actividad fabril de los grandes parques industriales de la región, como se muestra en la Fig. 13.

Particularmente, el Municipio de Tlalnepantla de Baz, está ubicado al noreste del Estado de México a una altitud de 2250 msnm y se destaca por ser uno de los municipios con el mayor número de industrias en el Estado de México, así mismo tiene un número considerable de vialidades importantes y altos índices de tráfico vehicular, ambos factores son importantes en términos de emisión antropogénica de material particulado. Cabe mencionar también que 21.1% de la superficie del municipio corresponde a suelo no urbanizado, lo cual es una fuente natural importante de partículas (Ruiz, 2009).

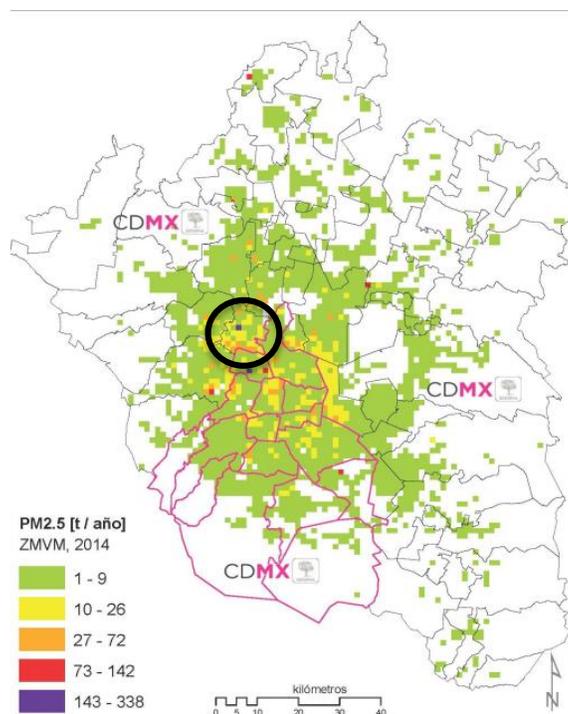


Fig. 13 **Distribución espacial de las $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México.**

Fuente Inventario de Emisiones de la CDMX (SEDEMA, 2016)

JUSTIFICACIÓN

Las ciudades y lugares densamente poblados se caracterizan por tener una mala calidad del aire debido a las diversas fuentes de emisiones antropogénicas y de las condiciones geográficas del lugar, lo cual tiene repercusiones importantes en la salud de la población a causa de una mayor incidencia de enfermedades respiratorias, así como la disminución de la calidad de vida a causa de los efectos tóxicos de ciertos componentes en los aerosoles. Aunado a los impactos a la salud de los seres vivos, también se manifiesta una alteración importante del ambiente en términos de disminución de la visibilidad, formación de contaminantes secundarios y alteraciones en el clima, así como también daño arquitectónico ya que algunos componentes de las partículas reaccionan con los materiales de construcción (Kuzmichev & Loboyko, 2016).

La atmósfera circundante al municipio de Tlalnepantla de Baz representa un objeto de estudio de interés al estar afectada por diversas emisiones antropogénicas y naturales producto de la actividad industrial que acontece en la zona, las emisiones vehiculares de las vías de comunicación, la re-suspensión de partículas de polvo proveniente de las zonas erosionadas y las emisiones de las fuentes de área.

La información generada en materia de caracterización de aerosoles obtenida con precisión mediante la técnica PIXE, permite el análisis de tendencias, la identificación de fuentes de emisión y la evaluación de los impactos al microclima. Esta información es necesaria para un mejor entendimiento del fenómeno y de los efectos a la salud, así como para el desarrollo de estrategias de mitigación y la modificación de políticas públicas ambientales para contener los impactos ambientales antes mencionados.

HIPÓTESIS

La composición elemental, de las partículas atmosféricas PM_{2.5} provenientes de Tlalnepantla, Estado de México, conlleva información sobre las tendencias del comportamiento temporal, fuentes de emisión y su posible afectación al microclima. Esta dinámica y variación posiblemente ha modificado las variables meteorológicas, ocasionando cambios en el microclima en el sitio de estudio durante 2014-2015.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la composición elemental de partículas finas (PM_{2.5}) proveniente de muestras colectadas en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México, durante los años 2014-2015, mediante la técnica de PIXE para deducir sus tendencias, fuentes de emisión y su posible impacto al microclima de la zona de estudio.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Analizar el conjunto de muestras de PM_{2.5} mediante la técnica PIXE para identificar y cuantificar los elementos representativos contenidos en las muestras.
2. Describir el comportamiento temporal de los elementos de las PM_{2.5} a través de la elaboración de series de tiempo.
3. Separar la componente antropogénica de la natural durante las estaciones climáticas aplicando el Factor de Enriquecimiento
4. Identificar las fuentes de emisión del contenido elemental mediante el uso de la matriz de correlación así como la comparación de los grupos de elementos identificados con estudios previos y los perfiles de emisión de referencia de la base SPECIATE US-EPA Versión 4.5.
5. Inferir los posibles impactos al Microclima de la zona de estudio a través del análisis de las variaciones de radiación UV-A y temperatura atribuibles la presencia de PM_{2.5}
6. Analizar la evolución de las concentraciones ambientales y composición elemental de las PM_{2.5} a lo largo de 10 años, mediante la comparación con los resultados de composición elemental de un estudio previo conducido en el mismo sitio de estudio.



CAPÍTULO 2

Metodología

En la Fig. 14 se presenta el diagrama con las etapas de la metodología propuesta para desarrollar el proyecto de investigación:

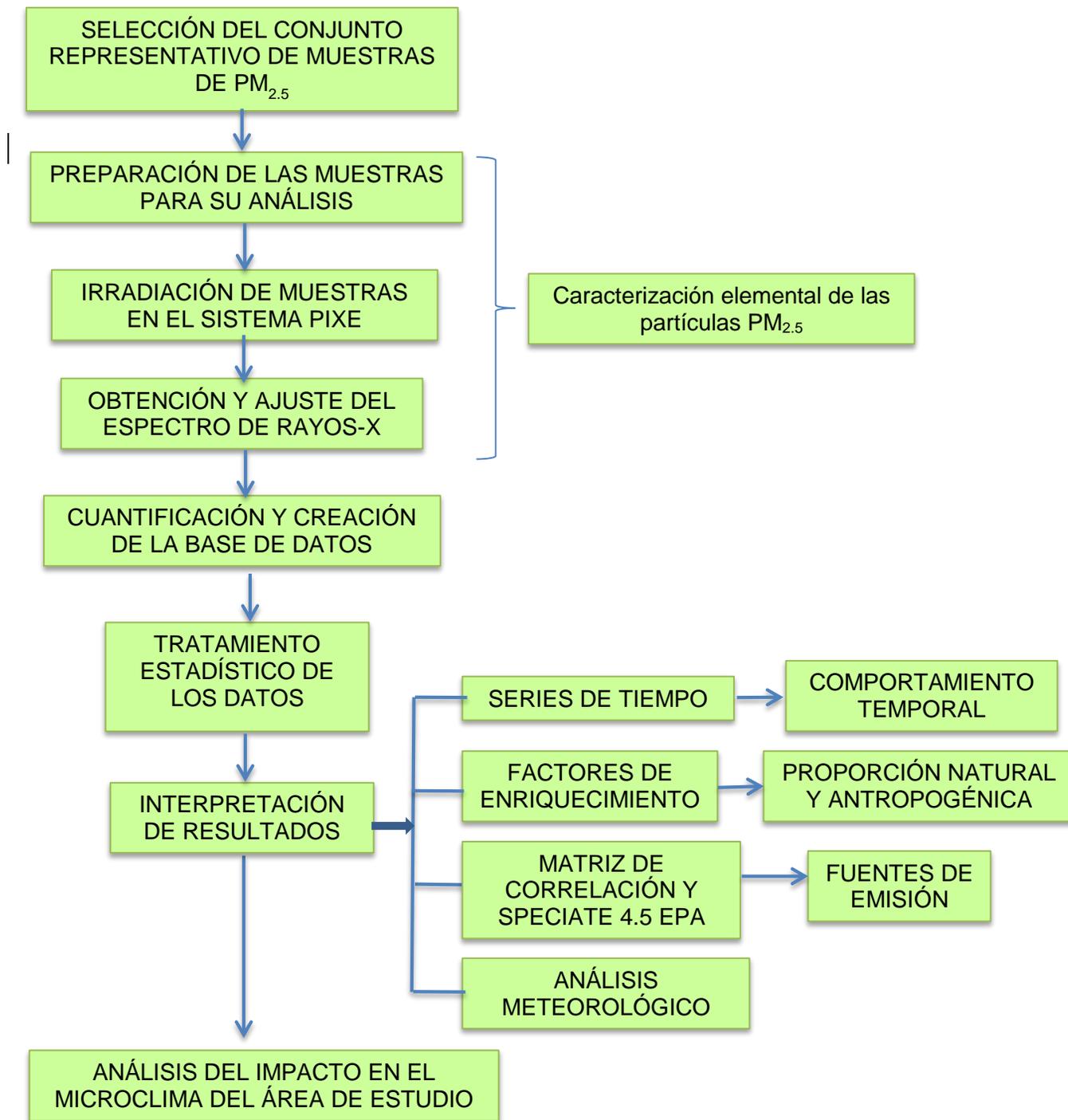


Fig. 14 **Etapas de la metodología del Proyecto.** Fuente Constructo del Autor

A continuación se detallan las etapas del proyecto:

2.1 Selección del conjunto de muestras de partículas atmosféricas PM_{2.5}

El laboratorio PIXE, perteneciente al Departamento de Estudios del Ambiente del ININ, tiene bajo resguardo, previa autorización, los filtros con partículas atmosféricas PM_{2.5} del periodo bajo estudio y que, a su vez, provienen de los muestreos realizados por la Red Manual del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA en la estación de Tlalnepantla. Cada muestra fue colectada semanalmente (una muestra cada 6 días) y corresponde a un día completo de muestreo (24 h). Las PM_{2.5} fueron colectadas en filtros de Teflón de 47mm de diámetro.

Se integró un conjunto representativo de muestras de PM_{2.5} seleccionando los filtros pertenecientes al periodo comprendido entre 2014 y 2015. Las muestras fueron clasificadas de acuerdo con las estaciones climáticas seca-fría (noviembre – febrero), seca-caliente (marzo – mayo) y lluvias (junio-octubre) haciendo un total aproximado de 116 muestras.

Esta clasificación se justifica con base en fines comparativos de las características de cada periodo como son los parámetros meteorológicos propios de cada estación, así como las variaciones en las contribuciones de las fuentes de emisión.

2.2 Caracterización elemental de las PM_{2.5}

2.2.1 Preparación de las muestras para su análisis

Los filtros de teflón fueron cortados extrayendo una cuarta parte de éste, empleando para ello un dispositivo diseñado especialmente por personal del laboratorio PIXE para este propósito, ya que minimiza el riesgo de pérdida de material particulado. El dispositivo consiste en un soporte donde se coloca el filtro de PM con sumo cuidado mediante el uso de pinzas, posteriormente se coloca por encima del filtro una base circular que cuenta con cuchillas afiladas y posicionadas de tal forma que al hacer presión, sólo éstas tienen contacto con la superficie del filtro cortando la porción de interés sin comprometer la integridad de la muestra restante (Fig. 15).



Fig. 15 **Preparación de muestras para Irradiación.**
Fuente: Constructo del Autor

Las porciones de interés fueron acopladas en pequeños marcos de aluminio a forma de soporte para la irradiación. Cada uno de estos marcos fueron atornillados en la regleta de irradiación en lotes de 10 (Fig. 16).



Fig. 16 **Colocación de Muestras en la Regleta de Irradiación**

Fuente: Constructo del Autor

Cabe mencionar que, una de las ventajas del análisis PIXE, es que la sección transversal del haz de protones usado para irradiar la muestra es significativamente pequeña comparada con el área del filtro, de tal manera que se salvaguarda gran parte del filtro el cual puede ser utilizado posteriormente para realizar un análisis en el resto del filtro por una técnica diferente y complementar la información.

El diseño de los muestreadores de $PM_{2.5}$ se basan en cálculos de aerodinámica, tal que permite que las partículas se distribuyan uniformemente en el filtro. De acuerdo con el estudio de Widziewicz *et al.*, (2015) no hay diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de metales medidas en diferentes secciones del filtro.

2.2.2 Irradiación de muestras

La irradiación de las muestras se realizó en el sistema PIXE acoplado al acelerador tándem de 2MeV Tandatron instalado en el Laboratorio PIXE del Departamento de Estudios del Ambiente del ININ.

La irradiación acontece en la cámara a 45° del haz de protones de 2 MeV y a 45° del detector. Al irradiar la muestra con el haz de protones, éstos interactúan con los electrones de la capa más interna del átomo, denominada capa K, como se muestra en la Fig. 17, a) y b), al producirse la vacancia los electrones de capas más próximas ocupan esas vacancias produciendo una emisión de energía en la forma de un Rayo-X, Fig. 17c), lo que permite la identificación del elemento. El Detector de Ge(Li) capta los rayos X y los convierte en pulsos eléctricos que pasan a un sistema electrónico (preamplificador, amplificador y multicanal) que proporciona un espectro característico de la muestra analizada.

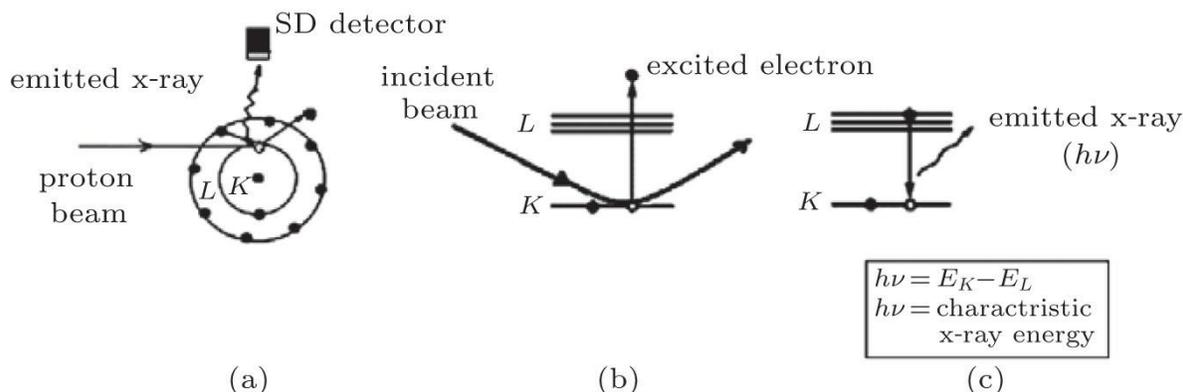


Fig. 17 **Etapas del Análisis PIXE** Fuente: Shad et al., 2015

Del espectro que se produjo como resultado de la irradiación de la muestras se identifican los elementos presentes en él, para este propósito, se utiliza una curva de calibración de energía contra canal que se elabora con estándares de alta pureza. En la Fig. 18 se presenta un espectro característico de una muestra de PM.

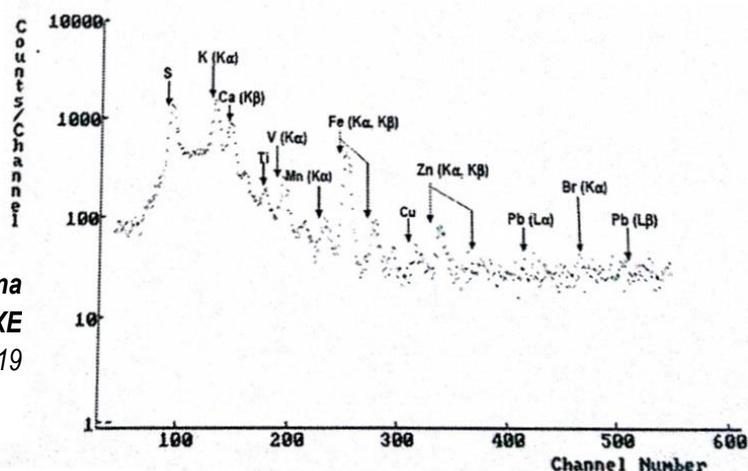


Fig. 18 **Espectro característico de una muestra de PM por análisis PIXE**
Fuente: Fuente: Ruiz, 2019

Una vez identificados los elementos se procede a cuantificar la abundancia de cada elemento presente en el espectro. La abundancia del elemento es proporcional a la cantidad de rayos X producidos durante la irradiación y a la carga de protones para excitar cada átomo. A su vez la cantidad de rayos X es igual al área bajo el pico y la carga es un parámetro experimental que se mide.

El área bajo el pico se calculó mediante el uso del software AXIL (Analysis of X-Ray Spectra by Iterative Least square fitting) cuya licencia se encuentra en posesión del laboratorio PIXE del ININ. Este proceso se conoce como Ajuste del Espectro. Este software utiliza un método iterativo no lineal por mínimos cuadrados que proporciona el área bajo la curva de cada pico (elemento). Una ventaja del programa es que deconvoluciona

los picos, además de restar el fondo de radiación. Una vez obtenida el área bajo la curva se utilizan estos valores para calcular la concentración elemental.

2.2.3 Cálculo de concentraciones y creación de la base de datos

Los elementos de interés serán elegidos con base en su representatividad y significancia tanto en cantidad así como en su presencia en las partículas atmosféricas en relación a las posibles fuentes de emisión, por lo que se analizaron 13 elementos: S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb.

Antes de iniciar el cálculo de la concentración, se debe contar con una curva de calibración o sensibilidad que proporciona el factor de respuesta $[k(z)]$ del sistema. Esta curva es construida usando películas delgadas espectroscópicamente puras (patrones de alta pureza). En el cálculo de concentración elemental intervienen varios parámetros como la carga con que se irradió la muestra, el área colectada de cada filtro, el volumen de aire muestreado y el área bajo cada pico, entre otros.

Una vez calculadas las concentraciones de los 13 elementos analizados, éstas fueron integradas en una base de datos, donde cada elemento corresponde a una columna mientras que las fechas de cada muestreo son las respectivas filas.

2.3 Comparativo longitudinal

Con el fin de darle una mayor perspectiva al presente estudio se optó por incluir datos de análisis elemental de muestras de PM_{2.5} del mismo sitio de estudio, Tlalnepantla, pero cuyo muestreo aconteció 10 años antes a las muestras analizadas en el presente estudio, del 3 de Noviembre 2004 al 26 de marzo 2006. Se trató igualmente de muestreos de 24h efectuados cada 6 días. Las condiciones de muestreo y análisis de las muestras fueron realizados bajo los mismos protocolos del presente estudio y pueden ser consultados en el trabajo de Tesis de Licenciatura de Ruiz, (2009).

Se aplicó un análisis estadístico básico que proporciona la estadística descriptiva de los datos, (máximos, mínimos, promedios y desviación estándar) para ambos periodos de estudio y poder efectuar la comparación entre ambos periodos.

Este comparativo longitudinal permitió hacer un análisis de la evolución del fenómeno de la contaminación por PM_{2.5} en el sitio a lo largo de 10 años y evaluar si las medidas de mitigación optadas por el Gobierno de la Ciudad de México han funcionado o no.

2.4 Análisis de las tendencias estacionales

Las concentraciones elementales de las muestras analizadas (2014-2015) fueron graficadas a lo largo del periodo de análisis para obtener una serie de tiempo para cada elemento y observar cómo varía su comportamiento a lo largo del tiempo para identificar los patrones estacionales.

Así mismo, las concentraciones estacionales se evaluaron clasificando las muestras de ambos períodos en tres estaciones climáticas (Jauregui, 1973): estación seca-fría (octubre-febrero), estación seca-caliente (marzo-mayo) y estación lluviosa (junio-septiembre) para observar diferencias estacionales debido a sus respectivas condiciones climáticas. Para la delimitación específica de cada estación climática, se consideraron las variaciones de temperatura y el comienzo y el final de las estaciones lluviosas, lo cual implica considerar algunos días previos o posteriores a los periodos mencionados.

2.5 Factores de Enriquecimiento

En un intento por determinar si los contaminantes en el aire se debieron a fuentes naturales o antropogénicas, se calcularon los factores de enriquecimiento (EF) a partir del conjunto de datos para cada período de estudio. El factor de enriquecimiento es una relación entre la concentración de un elemento en el aire y la de las fuentes naturales (corteza terrestre). En este estudio, se calculó un EF para cada elemento en ambos períodos. En la siguiente ecuación, uno de los elementos más abundantes, el hierro, se utiliza como referencia para la contribución natural. De acuerdo con Lawson y Winchester (1979), el factor de enriquecimiento se define como:

$$EF = \frac{\left(\frac{X}{Fe_a}\right)_{Aire}}{\left(\frac{X}{Fe_c}\right)_{Corteza}}$$

Donde $(X / Fe_a)_{aire}$ y $(X / Fe_c)_{corteza}$ se refieren a la relación de concentración del elemento X a la de Fe en el aire y en la corteza terrestre promedio, respectivamente.

2.6 Caracterización del sitio para la identificación de fuentes de emisión

Se realizó un reconocimiento de los alrededores de sitio de muestreo para poder identificar las fuentes de emisión cercanas tales como vialidades e industrias, entre otras fuentes representativas. Esto mediante imágenes satelitales y búsqueda específica por Google Maps ®.

Se realizó un análisis de las velocidades y direcciones del viento a lo largo de 2014-2015 del sitio para elaborar un diagrama de rosa de vientos para poder inferir la influencia de las fuentes de emisión cercanas con base en la dirección predominante del viento en el sitio. Los datos de viento fueron obtenidos de la página del SIMAT (SIMAT, 2020).

2.7 Identificación de fuentes de emisión

Una vez que el EF permitió clasificar los elementos en dos fuentes principales: antropogénica y natural, la matriz de correlación de las concentraciones elementales se presenta como un primer enfoque para una identificación más específica de las fuentes de emisión de los componentes elementales de las PM_{2.5}, ya que es un punto de partida para los métodos de análisis multivariados. Dado que el número de muestras por temporada era limitado (<100) no fue posible aplicar el análisis de factorización de matriz positiva (PMF) (Norris et al., 2014) para aumentar el número de perfiles elementales y la contribución de los mismos.

Se seleccionaron las concentraciones elementales de la temporada de seca-fría de octubre de 2005 a febrero de 2006 y la temporada de frío seco de octubre de 2014 a febrero de 2015 para elaborar una matriz de correlación por período.

De acuerdo con Martínez et al., (2009), la correlación (r) en términos estadísticos se define como la medida de asociación entre dos variables. Para efectos de la presente investigación, esta herramienta se utilizará para determinar la asociación entre parejas de elementos que están contenidos en las muestras de partículas colectadas. Los elementos de aquellas parejas que se correlacionan se considera que provienen de la misma fuente de emisión.

Cabe mencionar que se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (r) en vez del coeficiente de determinación (r^2) ya que el objetivo es analizar la relación entre dos variables medidas (concentraciones elementales) así como la dirección de la relación representada por el signo de la relación (-1 a 1). Mientras que r^2 representa la proporción de la variación en Y (variable dependiente) explicada por X (variable independiente) y puede adoptar cualquier valor entre 0 y 1, tal consideración no es apropiada para el caso de las concentraciones elementales ya que se consideran variables independientes.

Una vez obtenidos los perfiles elementales, éstos fueron comparados con estudios previos y con los perfiles de referencia de la base de datos SPECIATE versión 4.5 de US-EPA, para poder asociarlos a fuentes particulares de emisión.

2.8 Análisis del impacto de las PM_{2.5} al microclima del área de estudio

Los impactos al microclima fueron evaluados analizando las variaciones en la radiación UV-A que podrían estar relacionadas con la presencia de PM_{2.5}, ya que la radiación UV-A es más sensible a la presencia de aerosoles (Zerefos et al., 2009). La velocidad del viento (WS), por sus siglas en inglés Wind Speed, también se consideró con especial atención en los días con bajo WS, lo que sugiere una dispersión pobre de las partículas atmosféricas y una mayor probabilidad de atenuación de UV-A. Así mismo, también se evaluó la variación de la temperatura máxima diaria en relación con la concentración de PM_{2.5} para estimar una relación entre estas variables. Los valores horarios de las concentraciones de WS, UV-A y PM_{2.5} se obtuvieron del sitio web de la Red de Monitoreo del Aire de la Ciudad de México.

2.8.1 Relación entre el contenido de sulfato de partículas PM_{2.5} y la atenuación solar

Para poder asociar las variaciones de UV-A con los efectos de las PM_{2.5}, en vez de las nubes, se realizó una revisión exhaustiva de imágenes satelitales diarias del archivo global de NOAA (NOAA, 2020) para identificar los días de cielo despejado sobre el noroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México (MCMA) que coincidieron con las fechas de muestreo. Debido a la baja probabilidad de que el muestreo semanal ocurriera en días de cielo despejado con bajo WS, y considerando los cambios de UV-A de un año a otro debido a la actividad del Sol (Matsumoto et al., 2014) sólo se consideró un año de muestreo, 2014, también porque se tenía mayor disponibilidad de datos. En este año, se identificaron 10 días para adaptarse a todas estas condiciones.

Para este conjunto de fechas, el máximo diario de UV-A se correlacionó con el respectivo contenido de sulfato de $PM_{2.5}$, calculado a partir del S medido por la técnica PIXE. Se han realizado varios estudios para demostrar una relación de 3.00 entre el sulfato particulado medido por IC y el azufre elemental obtenido con PIXE y EDXRF, entre otras técnicas. (Eldred et al., 1983; Stevens et al., 1978). Particularmente, en el ININ se realizó una intercomparación de la medición de sulfato entre los resultados del contenido de sulfato derivados de las mediciones de azufre obtenidas del análisis PIXE de muestras $PM_{2.5}$, y los valores de contenido de sulfato obtenidos con un sistema de monitoreo semicontinuo comercial, un Monitor para AeRosoles y Gases en ambiente Aire (MARGA®). Se obtuvo una buena coincidencia en los resultados generales. (Flores et al., 2017).

2.8.2 Estimación de la atenuación solar

Con el fin de analizar la atenuación UV-A que podría estar parcialmente relacionada con las $PM_{2.5}$, se consideró un sitio de referencia, con menor concentración de contaminantes en el aire, para comparar el perfil horario de UV-A del sitio TLA con el perfil UV-A del sitio de referencia, de acuerdo con el protocolo descrito en Jáuregui y Luyando, (1999). El sitio de referencia elegido fue la estación de monitoreo Montesillo (MON) del SIMAT, que se encuentra en el límite este de MCMA ($19^{\circ}27'37.49''$, $98^{\circ}54'10.27''$ NO) en el Municipio de Texcoco en el Estado de México en un área semi-rural a 32.6 Km SE del TLA (Fig. 19). Asimismo este sitio se encuentra alejado de zonas industriales y con alto tráfico vehicular. Se consideró un conjunto de 17 días con cielos despejados y bajo WS para ambos sitios, entre noviembre de 2014 y febrero de 2015, para analizar la atenuación UV-A; debido a la disponibilidad de los datos, solo se evaluó un invierno. La temporada seca-fría se eligió debido a la acumulación de $PM_{2.5}$ causada por las inversiones térmicas y, además, a una menor tasa de producción de ozono en comparación con la temporada seca-caliente.

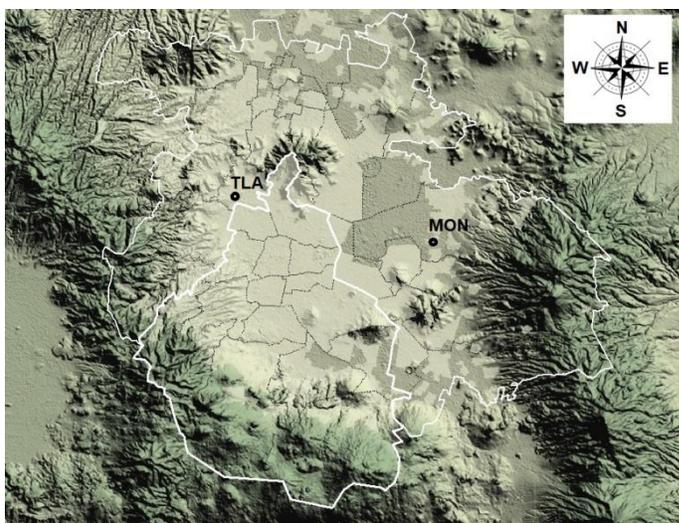


Fig. 19 **Ubicación del sitio de muestreo (TLA) y del sitio de referencia Montesillo (MON).** Fuente SIMAT (2020)

2.8.3 Impacto de las $PM_{2.5}$ en la temperatura local

Con base en la hipótesis de que las $PM_{2.5}$ impactan en el microclima local al interferir con la transmitancia de la radiación UV, se esperaría también que al ser menor la energía calorífica que llega a la superficie haya un impacto en la temperatura local.

Para probar esta hipótesis, la temperatura máxima diaria en el sitio se correlacionó con la concentración máxima de $PM_{2.5}$ durante la estación seca-fría (noviembre de 2013 a febrero de 2004). Los valores horarios de temperatura y las concentraciones de $PM_{2.5}$ se obtuvieron del sitio web SIMAT (SIMAT, 2020). Dentro de este conjunto de datos, solo se consideraron los días con valores promedio diarios de WS inferiores a 2.5 m/s. Esto para aumentar la probabilidad de acumulación de partículas, causando un impacto negativo en la transmitancia de la luz solar y disminuyendo la temperatura máxima en el sitio.



CAPÍTULO 3

Resultados y Discusión

3.1 Selección y Clasificación de las Muestras de $PM_{2.5}$

A partir del conjunto de muestras disponibles se seleccionó un total de 116 muestras, de las cuales 61 corresponden a 2014 y 55 muestras a 2015. Las muestras fueron clasificadas en 3 estaciones climáticas: Seca-Fría, Seca-Caliente y Lluvias con base en lo propuesto por (Jauregui, 1973). La Tabla 4 presenta las fechas específicas que delimitan las temporadas.

Tabla 4 Estaciones Climáticas consideradas para la clasificación de muestras

Fuente: Constructo del Autor

	Seca-Fría 2014	Seca-Caliente 2014	Lluvias 2014	Seca-Fría 2014-2015	Seca-Caliente 2015	Lluvias 2015	Seca-Fría 2015
Inicio	5-Ene	16-Feb	17-May	14-Oct-2014	1°- Mar	6-May	27-Oct
Final	10-Feb	11-May	8-Oct	17-Feb-2015	30-Abr	21-Oct	26-Dic

Cabe mencionar que la delimitación de las estaciones se realizó con base en la disponibilidad de las muestras así como en la observación de los datos meteorológicos reportados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (SIMAT), con particular interés en las temperaturas, el comienzo y final de las temporadas de lluvias.

3.2 Irradiación y Obtención de espectros

Las muestras fueron irradiadas en el Sistema PIXE acoplado en el acelerador Tandetrón 2.0 del Departamento de Estudios del Ambiente del ININ.

Se realizó un bombardeo por protones de 1.6 MeV utilizando corrientes de haz de iones de típicamente 6 nA. Los rayos-X característicos se detectaron con un detector Ge (Li) ubicado fuera de la cámara de irradiación en un ángulo de 90 ° con respecto a la dirección del haz de iones. El análisis permitió identificar y cuantificar el contenido elemental de las $PM_{2.5}$ depositadas en las membranas. 13 elementos (S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb) se detectaron consistentemente.

3.3 Análisis Cualitativo y Cuantitativo de las Muestras de $PM_{2.5}$

A partir de los espectros generados producto de la irradiación de las muestras se identifican los elementos presentes en éstos. La identificación se realizó con base en la energía y el canal característicos de cada elemento (Fig. 20).

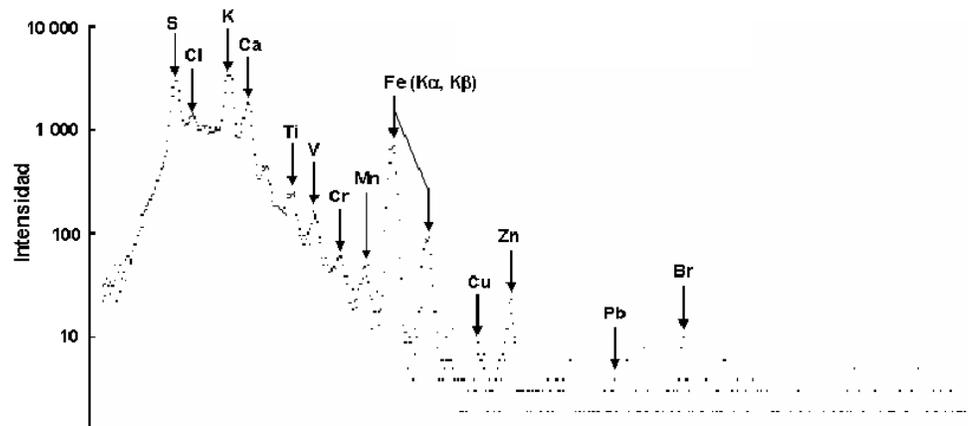


Fig. 20 **Identificación de elementos en el espectro.** Fuente: Constructo del Autor

El ajuste de los espectros por medio de un método iterativo por mínimos cuadrados, a través del software AXIL, permitió obtener el área bajo la curva de cada pico correspondiente a un elemento en específico discriminando el fondo de radiación como se observa en la figura 21.

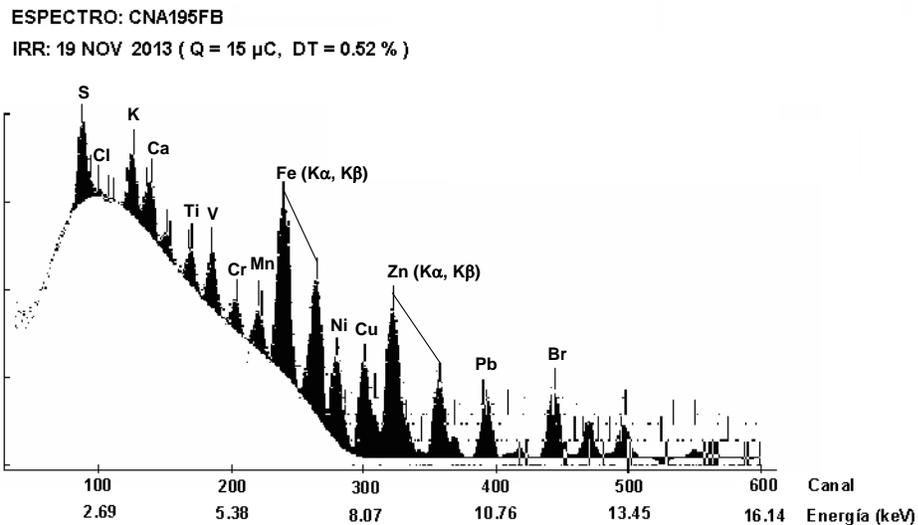


Fig. 20 **Espectro ajustado con AXIL.** Fuente: Constructo del Autor

Una vez logrado el mejor ajuste el software, se generó un reporte por cada muestra (Fig. 21) con las áreas de los picos de los elementos, las cuales fueron usadas para calcular la concentración elemental usando los factores de respuesta de la curva de calibración, que se muestran en las tablas 5 y 6.

Fitting Region: channels 68 - 620;		ChiSqr = 1.5		
Line	Ener. (KeV)	Peak area	st.dev.	Chi_sq
S -Ka	2.307	41033. ±	280.	6.29
Cl-Ka	2.622	838. ±	164.	1.98
Ar-Ka	2.957	-225. ±	141.	2.95
K -Ka	3.313	16721. ±	186.	1.96
Ca-Ka	3.691	7355. ±	141.	.35
Sc-Ka	4.089	-20. ±	75.	1.16
Ti-Ka	4.509	1142. ±	53.	1.02
V -Ka	4.950	1116. ±	47.	2.28
Cr-Ka	5.412	125. ±	28.	.61
Mn-Ka	5.895	224. ±	24.	.83
Fe-Ka	6.399	5986. ±	80.	.78
Co-Ka	6.925	39. ±	18.	1.02
Ni-Ka	7.472	103. ±	12.	1.21
Cu-Ka	8.041	99. ±	11.	1.12
Zn-Ka	8.631	392. ±	20.	.75
Ge-Ka	9.875	6. ±	5.	1.16
As-Ka	11.532	0. ±	4.	.90
Se-Ka	11.208	2. ±	4.	1.47
Br-Ka	11.908	47. ±	8.	1.33
Rb-Ka	13.375	7. ±	5.	1.21
Sr-Ka	14.142	-3. ±	3.	.58
Pb-La	10.542	31. ±	6.	.90

Fig. 21 Reporte de áreas de AXIL. Fuente: Constructo del Autor

En la Tabla 5 se presentan las concentraciones elementales para los elementos de interés

Tabla 5 Concentraciones Elementales 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
05/01/14	989.04	6.83	224.28	97.05	10.76	8.18	0.52	6.31	96.10	2.77	5.50	86.30	8.71
11/01/14	804.49	2.99	137.06	61.11	7.10	8.57	1.43	6.47	146.71	1.27	6.46	85.07	9.66
17/01/14	954.62	26.04	131.41	176.89	17.55	11.66	1.21	7.12	223.90	0.64	11.18	84.42	4.82
23/01/14	1841.85	41.87	297.76	324.54	30.71	44.20	4.82	25.81	581.16	10.48	24.63	343.04	15.03
29/01/14	3492.86	87.69	188.95	112.74	14.28	21.28	2.12	20.65	256.73	5.53	12.28	401.14	15.51
04/02/14	1394.55	20.39	268.42	231.76	19.59	4.93	2.54	11.52	277.46	0.00	21.40	107.89	17.69
10/02/14	1046.88	19.40	172.07	181.15	15.38	13.89	1.86	8.54	233.27	2.66	19.65	69.38	16.11
16/02/14	276.42	41.79	165.21	143.21	12.02	3.85	1.70	5.61	142.52	0.64	12.10	76.64	13.94
22/02/14	2926.24	0.00	330.53	159.29	21.20	88.68	4.07	12.00	246.75	15.09	20.78	70.43	21.54
28/02/14	1022.25	8.02	172.32	117.17	11.94	7.92	0.96	8.17	198.65	1.67	19.16	58.84	5.35
06/03/14	1211.68	13.54	133.83	145.01	13.71	11.28	0.35	12.16	306.16	2.49	14.82	155.21	1.07
12/03/14	570.16	13.30	147.25	105.80	10.83	5.66	1.61	8.20	167.68	0.00	9.75	59.10	0.00
18/03/14	395.50	12.97	116.60	55.12	4.85	7.84	2.35	5.15	73.09	0.35	4.01	16.53	19.33

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
24/03/14	1537.05	0.00	172.47	113.87	12.48	39.54	0.42	5.49	144.86	6.42	4.23	54.26	12.88
30/03/14	1818.68	0.56	229.53	112.32	6.28	9.93	1.41	10.59	201.48	0.00	13.63	110.18	21.50
05/04/14	2005.76	4.94	229.58	62.01	9.21	8.29	2.46	4.57	89.13	1.79	8.15	26.98	15.52
11/04/14	883.57	15.31	156.13	152.84	99.87	12.22	1.95	9.33	216.64	0.87	39.33	81.57	10.19
17/04/14	1515.35	22.23	183.89	67.60	62.37	3.76	4.72	10.28	136.18	2.20	23.93	82.27	18.78
23/04/14	1717.40	0.00	116.70	76.17	7.81	35.10	2.45	5.60	121.18	6.37	7.32	62.86	6.45
29/04/14	1282.30	7.25	343.08	92.99	18.31	7.68	6.11	9.21	175.82	1.68	9.82	86.52	15.04
05/05/14	888.89	0.00	120.15	82.81	7.02	8.26	1.16	5.71	174.74	1.63	12.28	88.10	24.21
11/05/14	1282.96	17.37	152.17	45.32	3.47	5.17	3.11	2.57	46.53	0.32	4.08	42.86	26.27
17/05/14	1713.02	4.64	174.12	172.62	14.83	91.97	0.00	8.42	207.33	12.50	17.23	103.77	20.43
23/05/14	2930.36	1.76	122.63	82.45	8.96	44.00	2.03	10.60	152.17	7.23	9.67	111.13	37.00
29/05/14	753.41	9.68	106.52	98.45	14.83	2.48	1.46	11.88	169.72	0.45	14.70	79.60	14.50
04/06/14	534.58	31.75	73.63	67.21	4.69	1.66	5.96	15.59	173.98	3.04	6.19	73.10	2.70
10/06/14	898.96	17.75	73.93	69.26	6.42	2.05	3.27	9.47	144.33	1.59	8.48	60.27	17.23
16/06/14	1606.87	9.10	134.91	93.83	11.52	40.57	0.00	7.26	182.19	6.65	4.11	126.13	14.05
22/06/14	2009.24	6.79	68.78	46.84	7.00	20.89	2.56	4.52	79.75	1.89	3.29	34.84	17.66
28/06/14	572.46	25.84	87.03	71.30	5.38	4.70	1.68	5.38	114.48	0.00	6.81	184.82	23.62
04/07/14	425.55	45.47	81.60	90.87	8.88	0.37	1.17	8.83	141.77	0.64	5.33	122.09	8.08
10/07/14	1326.44	151.46	84.54	88.53	8.91	3.29	3.91	12.30	205.15	1.80	21.28	225.80	29.04
16/07/14	1239.63	23.90	80.61	66.50	8.16	0.81	1.91	8.31	116.54	0.87	11.21	92.55	18.80
22/07/14	1095.85	10.39	95.23	102.05	11.54	16.25	1.44	9.21	222.41	1.86	8.57	173.92	18.32
28/07/14	2756.97	7.89	119.19	105.57	13.39	36.56	5.17	8.54	192.08	6.94	3.23	72.39	15.03
03/08/14	1342.71	0.00	167.71	142.08	33.35	18.28	1.92	5.87	283.53	4.09	1.14	84.46	11.77
09/08/14	1382.85	3.75	97.60	85.47	11.01	10.36	4.00	11.57	190.01	2.25	10.95	69.41	23.58
15/08/14	1078.30	4.83	139.65	125.08	11.73	6.96	0.86	10.65	196.59	0.23	9.72	109.99	22.48
21/08/14	1768.29	22.83	142.60	148.87	28.25	54.72	1.14	12.34	304.59	7.66	5.03	199.59	0.54
27/08/14	1449.65	17.50	162.34	143.25	9.95	24.62	0.35	6.39	170.07	4.71	4.46	208.25	22.10
02/09/14	1308.01	31.74	68.98	103.74	7.06	4.25	2.70	7.31	114.86	1.97	19.91	160.23	26.91
08/09/14	407.82	9.95	149.16	111.12	6.93	1.69	1.62	7.73	117.02	0.12	3.28	73.58	13.35
14/09/14	1013.94	30.59	197.05	71.66	3.60	1.93	2.29	4.18	60.19	0.23	3.64	76.59	10.17
20/09/14	1822.77	5.42	184.08	73.45	15.25	22.10	0.05	6.61	117.98	3.78	43.05	124.09	19.95
26/09/14	933.07	19.45	82.59	121.44	4.28	5.61	5.60	9.80	116.25	0.58	4.72	69.68	24.66
02/10/14	524.65	13.00	58.13	121.88	7.31	2.81	5.42	9.92	127.79	0.23	14.20	122.44	8.59
08/10/14	865.19	21.22	87.04	118.90	15.86	2.23	1.67	10.09	184.87	1.38	23.99	141.44	22.99
14/10/14	765.45	60.37	88.18	124.75	8.41	0.00	2.13	11.14	169.34	0.00	9.06	233.99	18.84
20/10/14	564.54	5.71	29.55	80.15	3.52	3.71	3.48	4.05	83.14	0.00	0.57	28.55	4.82
26/10/14	2456.03	2.02	117.60	74.87	4.94	39.81	4.84	5.22	61.48	6.59	4.66	157.28	6.44
01/11/14	644.74	23.69	72.65	135.69	6.01	2.88	1.57	8.44	95.11	1.30	4.35	129.14	6.94
07/11/14	3475.52	58.44	180.05	177.76	10.95	79.90	2.51	13.66	223.42	11.47	17.78	434.74	34.77

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
13/11/14	3024.32	89.90	165.85	156.75	7.66	26.73	3.01	14.06	210.59	4.52	25.41	281.01	71.31
19/11/14	2115.54	16.36	95.87	131.79	12.87	57.70	1.18	7.51	192.62	5.95	24.45	187.08	20.89
25/11/14	833.46	56.64	122.40	171.50	9.49	25.50	4.03	13.96	260.03	4.62	16.57	152.90	39.76
01/12/14	1687.64	36.78	265.16	148.60	12.99	13.74	3.75	8.78	170.74	3.45	9.28	81.38	23.71
07/12/14	1264.34	51.23	170.75	82.40	5.51	10.95	3.53	8.00	93.11	1.76	5.87	206.82	17.70
13/12/14	2963.96	0.00	484.72	125.35	10.08	51.84	3.45	4.98	110.29	6.94	3.96	32.80	21.55
19/12/14	1308.66	12.84	330.53	139.58	12.27	2.08	3.67	8.68	202.50	1.95	21.80	76.68	15.09
25/12/14	225.52	21.40	558.62	32.79	2.02	0.00	1.31	0.66	52.77	0.00	5.16	11.54	23.10
31/12/14	5743.87	32.82	752.43	105.49	11.28	70.54	4.56	9.57	142.64	8.75	11.86	45.48	35.86
06/01/15	868.52	478.38	122.04	112.63	6.06	13.67	2.16	16.33	224.73	5.22	11.38	260.16	31.23
12/01/15	1309.65	66.69	222.16	160.50	9.34	8.04	5.29	13.60	186.47	4.63	15.50	173.29	39.72
18/01/15	1563.93	19.19	220.41	96.16	1.69	25.10	4.89	6.49	86.51	5.05	4.83	72.73	9.70
24/01/15	1332.34	27.32	190.45	119.77	9.60	20.91	0.97	7.41	152.41	4.76	12.88	70.10	0.00
30/01/15	1165.79	166.02	163.46	185.91	9.92	17.92	2.27	14.00	200.84	7.09	12.01	258.59	21.92
11/02/15	831.11	36.69	167.22	117.50	9.10	2.61	2.41	13.05	201.88	0.00	20.19	83.29	27.50
17/02/15	258.48	69.30	115.36	122.58	1.97	1.57	11.89	12.75	207.79	0.70	19.92	134.09	20.44
01/03/15	1192.05	15.48	215.70	118.27	9.11	7.48	3.89	6.54	117.70	1.39	8.99	85.46	20.98
07/03/15	1521.70	258.91	198.20	171.62	7.62	25.12	0.99	13.64	206.78	7.27	23.80	668.22	67.41
13/03/15	366.41	19.65	103.17	91.28	6.86	0.55	2.82	6.66	146.48	0.41	10.34	46.85	19.88
19/03/15	1488.30	20.80	105.16	80.97	4.41	1.10	1.56	9.32	141.13	0.00	13.95	67.44	22.58
25/03/15	552.24	34.47	79.73	86.66	3.75	1.24	1.81	6.61	178.05	0.00	19.39	117.85	16.11
31/03/15	893.18	27.82	111.30	149.78	9.66	4.51	1.93	14.32	296.72	0.00	11.65	142.08	17.75
06/04/15	1386.87	10.73	149.04	177.81	11.88	4.70	1.06	15.35	244.35	0.64	16.82	140.28	5.91
12/04/15	2754.63	0.42	191.34	73.53	5.79	20.14	2.45	11.37	190.47	4.80	16.35	169.41	43.44
18/04/15	1222.30	0.54	268.72	68.46	4.82	1.28	1.06	11.20	219.17	0.75	14.08	115.16	20.32
24/04/15	892.76	0.00	226.85	105.61	12.28	1.22	0.00	6.65	165.16	0.00	10.51	58.96	11.30
30/04/15	1342.34	75.95	164.42	89.90	4.83	7.29	3.34	11.89	162.67	2.20	10.99	138.03	27.94
06/05/15	1057.31	23.76	229.60	83.95	5.44	2.52	4.35	11.37	203.40	0.64	27.91	112.95	22.00
12/05/15	1900.86	16.26	135.80	70.57	5.86	5.47	1.14	7.72	116.22	2.21	6.48	60.41	26.39
18/05/15	1335.30	22.80	195.19	93.52	6.91	3.57	0.17	14.14	208.31	3.81	8.74	89.21	5.36
24/05/15	1303.02	5.48	153.25	79.88	6.63	1.81	5.03	9.31	159.00	0.00	27.93	84.44	38.22
30/05/15	1492.52	48.59	151.55	72.55	9.29	3.21	0.81	10.10	192.89	0.00	8.02	93.56	43.38
05/06/15	1904.80	53.95	252.85	124.92	10.10	14.60	0.00	10.59	199.84	3.18	14.08	206.06	25.25
11/06/15	2115.16	0.00	320.46	117.22	7.30	48.01	2.08	14.03	256.52	13.02	15.79	136.96	34.36
17/06/15	2334.46	34.75	99.68	184.81	14.78	24.03	1.28	10.35	276.51	7.22	19.34	278.74	28.40
23/06/15	953.83	50.41	216.95	309.28	66.44	2.76	1.41	26.01	787.01	0.92	11.19	130.89	17.70
05/07/15	1151.39	0.00	93.94	97.50	7.16	0.00	1.81	6.80	178.69	0.00	9.02	174.22	29.30
11/07/15	720.87	25.61	212.23	286.46	51.60	22.96	3.16	16.20	662.57	4.63	7.39	75.00	0.00
17/07/15	1296.37	0.00	116.59	178.34	13.61	0.00	2.99	11.60	299.48	0.00	14.62	208.68	0.00

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
23/07/15	1336.79	31.27	94.08	139.41	11.78	17.28	6.31	11.37	234.94	4.12	18.12	112.41	0.00
29/07/15	1686.32	0.00	168.92	237.96	20.17	33.32	8.20	20.80	396.36	7.01	6.62	162.11	0.00
04/08/15	2020.79	0.00	138.35	174.59	127.68	20.03	0.91	12.03	325.63	5.94	8.98	200.34	14.65
10/08/15	1109.32	9.57	99.64	137.43	9.89	12.95	0.00	8.40	227.21	1.41	6.62	177.45	0.00
16/08/15	1179.32	19.46	235.48	92.74	4.80	21.20	4.75	8.93	166.78	5.27	11.98	173.01	29.30
22/08/15	1902.31	0.00	107.82	109.02	8.32	4.71	2.97	7.50	192.78	1.41	13.34	122.26	14.65
28/08/15	815.89	9.94	83.91	135.82	8.14	4.88	2.25	7.69	169.18	0.00	10.76	233.37	14.65
03/09/15	2223.93	26.48	21.00	144.63	10.48	4.92	7.62	14.91	18.82	0.00	17.96	331.46	14.65
09/09/15	1211.85	0.00	268.26	158.95	13.66	3.46	2.82	14.63	355.76	2.81	29.97	219.34	29.30
15/09/15	1949.62	37.83	882.97	104.16	7.39	6.16	2.28	8.71	264.31	2.81	13.65	104.85	53.73
21/09/15	1608.35	0.00	134.86	518.40	9.92	20.35	0.91	17.14	248.47	5.27	6.97	202.17	37.60
03/10/15	594.12	10.89	171.15	188.25	10.07	3.58	4.65	12.31	391.16	1.41	21.91	86.19	30.08
09/10/15	1934.82	0.00	144.95	174.99	10.78	4.35	0.00	20.13	385.50	3.18	14.36	188.96	0.00
15/10/15	547.86	74.46	82.22	159.86	7.72	0.00	2.40	12.65	280.22	2.81	27.83	340.20	58.08
21/10/15	646.08	39.79	99.93	203.87	14.44	16.73	2.37	17.96	496.28	4.28	17.09	256.80	29.30
27/10/15	1452.57	50.38	111.94	178.81	12.20	7.75	1.81	22.20	596.87	3.46	24.85	171.88	14.65
02/11/15	2585.11	0.00	94.70	72.80	5.71	56.15	1.19	7.16	159.77	10.63	10.09	136.04	7.54
08/11/15	706.63	55.81	81.43	60.23	4.02	1.69	1.36	5.87	52.64	0.00	6.32	131.23	17.19
14/11/15	286.40	29.08	88.58	112.05	6.46	1.33	1.98	6.75	172.87	0.00	4.39	70.62	16.68
26/11/15	2115.05	14.07	15.22	174.17	13.78	36.45	3.02	14.58	562.34	10.61	30.55	201.27	28.49
02/12/15	2333.73	664.25	286.40	288.94	23.69	21.83	5.64	18.73	460.67	3.14	41.03	2323.76	180.67
08/12/15	2744.59	126.58	213.79	162.93	11.34	110.83	3.66	13.11	262.92	24.96	34.41	288.13	38.15
14/12/15	440.34	66.18	288.91	236.08	10.74	2.53	3.52	8.80	219.00	0.00	22.74	102.13	15.61
20/12/15	3667.30	187.30	466.29	181.75	25.32	107.84	4.46	6.67	430.98	30.64	46.42	550.37	63.51
26/12/15	1229.49	6.65	388.09	91.59	9.56	13.09	2.69	3.02	134.04	3.41	10.46	18.50	10.18

3.4 Comparativo longitudinal de las concentraciones elementales

La Tabla 6 presenta las concentraciones elementales de las muestras de PM_{2.5} de un estudio realizado en el mismo sitio de estudio, Tlalnepantla, Estado de México, pero 10 años antes al periodo de las muestras analizadas en el presente estudio, del 3 de Noviembre 2004 al 26 de marzo 2006. Esto con el objetivo de evaluar los cambios en la concentración elemental de las PM_{2.5} a lo largo de 10 años.

Tabla 6 Concentraciones Elementales 2004-2006 Fuente: Ruiz, C. (2009)

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
03/11/2004	1608.61		68.70	53.83	7.64	18.37	4.85	8.44	137.50	1.84	15.85	137.35	47.18
09/11/2004	2000.01	130.75	141.68	127.76	10.12	77.74	9.60	32.55	275.36	15.42	22.20	457.53	85.63
21/11/2004	2105.16		300.39	59.94	5.43	23.35	2.10	6.93	102.79	1.25	7.86	122.14	37.82
27/11/2004	836.62	33.63	213.28	125.09	8.34	11.07	2.32	9.60	161.33		16.39	176.55	48.91
03/12/2004	4435.68	84.32	200.85	136.35	6.15	119.52	18.58	24.53	221.47	22.22	28.22	271.61	95.80
15/12/2004	1062.86	44.38	113.73	63.70	7.62	25.43	2.21	10.19	134.04	3.86	15.35	221.12	71.71
21/12/2004	995.09	7.74	232.41	59.71	5.31	9.06	3.42	8.44	132.27		23.97	90.84	83.74
27/12/2004	1198.92	3.89	255.38	94.47	8.52	54.46	12.95	4.47	112.64	5.83	13.66	136.39	41.51
02/01/2005	1882.25		497.93	59.28	9.37	48.11		3.87	60.81	5.24	5.49	33.22	62.34
08/01/2005	1666.28	254.12	317.37	97.08	9.70	18.89	1.72	14.31	193.40	3.86	11.96	341.37	32.05
14/01/2005	4659.72		289.06	107.48	9.32	164.09	9.40	15.80	196.01	24.34	16.71	229.41	32.74
20/01/2005	2554.38	151.12	247.38	112.09	8.07	57.86	9.60	33.35	355.16	5.24	13.42	476.34	71.78
26/01/2005	1833.11	170.22	137.67	88.27	6.05	24.59	1.15	10.85	174.76	4.70	91.92	329.26	85.55
01/02/2005	2043.76	48.56	355.82	135.79	8.94	44.48	8.54	6.80	120.90	6.82	65.98	129.04	70.31
07/02/2005	614.19	56.88	259.32	99.84	9.92	4.66	2.06	20.95	313.98	0.59	16.18	239.03	51.53
13/02/2005	874.86		225.16	55.58	4.59	8.92	2.52	8.90	100.23	2.79	22.78	135.01	9.41
19/02/2005	3767.08	30.23	212.20	112.84	8.61	89.46	11.66	12.93	248.14	17.12	19.90	369.86	49.69
25/02/2005	1340.58	4.49	156.17	84.63	7.59	5.40	23.09	11.33	219.03		11.37	144.94	35.19
03/03/2005	402.87	8.38	115.92	69.63	5.34	8.52	1.84	4.59	102.43	0.12	9.10	94.95	27.65
09/03/2005	298.33	8.01	91.03	80.51	9.18	3.00	2.70	7.58	138.12		5.48	131.02	11.95
15/03/2005	487.67		67.12	67.70	7.48	3.99	1.38	6.94	77.33	2.14	5.39	48.28	25.13
21/03/2005	287.45	12.75	170.53	52.97	2.74	2.61	1.70	3.41	87.47		9.89	104.27	15.13
27/03/2005	1392.85	54.64	236.21	71.08	4.67	23.05	5.34	6.25	100.36	2.62	5.90	69.59	6.29
02/04/2005	2225.75	50.25	197.11	116.97	9.58	92.78	2.58	18.29	196.16	12.78	11.98	463.93	61.64
08/04/2005	3373.08	44.93	220.95	157.35	9.25	73.72	6.80	21.57	240.16	13.85	19.57	304.89	86.80
14/04/2005	4307.53		283.06	186.84	13.66	106.94	5.78	18.64	260.10	18.45	17.98	490.53	65.48
20/04/2005	2240.43		215.64	78.89	7.07	16.15	1.92	9.80	162.02		13.72	154.01	57.12
26/04/2005	636.55	10.74	184.53	69.22	5.04	2.67	4.07	7.10	120.09		9.94	94.52	20.74
02/05/2005	1113.31	10.36	381.74	89.36	9.70	5.52	4.90	10.74	138.11		16.43	62.01	26.39
08/05/2005	1726.68	3.23	523.09	72.90	5.89	5.42	3.56	8.82	133.37		7.50	315.63	28.28
20/05/2005	1990.72	33.99	281.68	166.50	10.82	8.61		27.19	338.21		9.88	386.14	135.37
26/05/2005	2123.96	31.07	212.36	106.50	8.42	19.34		17.78	194.50	1.90	10.87	273.68	54.04
01/06/2005	2317.97	26.31	245.85	107.52	6.42	13.37	6.77	17.38	176.97		43.30	193.97	48.38
07/06/2005	2658.12	17.65	246.99	103.47	7.76	27.46	9.26	12.03	183.17	3.86	10.95	265.42	49.01
13/06/2005	1713.05		179.06	79.21	13.31	4.75	1.29	8.46	138.42	0.71	10.87	138.93	26.39
19/06/2005	1786.07		174.61	52.66	4.67	44.42	8.97	9.90	91.15	8.75	7.18	259.40	8.19
25/06/2005	812.01	39.13	96.86	68.67	9.15	10.50	2.35	10.54	130.36	1.37	3.20	160.28	27.02

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
01/07/2005	2287.02	43.40	203.53	147.03	12.21	16.12	4.30	23.36	241.20	2.14	82.82	270.46	56.55
07/07/2005	991.43	44.33	62.76	90.33	8.64	8.37	1.41	15.56	185.43	0.59	16.51	371.20	70.38
13/07/2005	672.67	111.41	79.62	91.89	5.98	3.09	1.72	22.98	244.76	0.53	13.89	538.66	106.71
19/07/2005	1420.96	277.20	89.65	86.65	7.20	10.83	5.05	53.89	309.46		13.66	805.76	81.14
25/07/2005	1376.75	21.23	93.11	81.55	7.66	31.60	13.84	9.43	144.90	4.94	16.53	166.24	25.16
31/07/2005	1475.34		318.55	237.47	52.06	51.05	2.15	21.95	591.77	4.00	6.91	216.85	67.61
06/08/2005	612.56	2.13	85.73	47.77	7.13	1.89	0.52	14.57	135.45	0.74	10.15	176.93	36.09
12/08/2005	947.19	16.35	118.17	107.34	11.16	1.44	2.28	25.15	257.17		15.65	477.82	55.77
18/08/2005	721.69	26.21	113.43	91.63	8.47	1.91	1.54	21.66	203.63		10.59	436.64	36.68
24/08/2005	855.12	123.93	121.18	72.41	6.41	5.99	1.96	27.61	326.67	0.13	17.31	633.64	135.85
30/08/2005	2068.85	11.95	126.55	83.15	12.69	5.89	3.62	16.29	221.76		23.50	377.19	47.39
11/09/2005	2267.41		190.34	48.27	5.38	33.22		11.20	139.76	7.40	6.45	283.40	31.56
17/09/2005	497.68		157.26	39.25	3.27	1.54	0.77	3.30	65.20	0.40		75.73	
23/09/2005	3050.27		110.69	108.61	10.02	96.99	7.01	13.23	224.17	14.44	14.20	245.03	41.79
29/09/2005	2197.32		132.10	105.14	6.08	53.57	6.45	26.46	213.93	6.02	5.57	165.90	66.48
05/10/2005	261.99	53.20	55.39	59.31	5.64	3.30	1.63	18.83	143.73		4.85	164.42	95.60
11/10/2005	2155.69	7.66	76.33	76.90	6.64	8.49	4.11	17.20	158.07	0.53	16.88	141.42	29.73
17/10/2005	2213.75		90.43	92.83	9.37	29.97	1.72	24.19	249.17	2.27	10.78	399.11	53.18
29/10/2005	1272.96	13.58	126.39	119.04	5.04	13.43	2.98	39.82	240.29		11.13	332.93	79.06
05/11/2005	2659.55		189.85	153.29	15.68	56.78	2.85	26.30	291.10	10.81	18.74	163.97	62.55
11/11/2005	679.28	6.41	58.12	56.38	5.19	2.06	0.37	13.59	173.58		13.96	177.00	51.08
16/11/2005	971.23		84.65	68.69	5.81	3.81	2.66	19.10	174.30		7.43	140.08	46.66
22/11/2005	4259.84		143.09	123.76	9.78	185.95	21.93	11.42	218.67	39.57	9.86	281.53	48.02
28/11/2005	696.59	10.64	214.86	119.43	13.02	3.02	2.69	21.12	246.31		21.30	246.65	77.56
04/12/2005	2016.68	20.38	230.62	57.49	5.23	9.31	5.00	6.52	107.09		30.76	83.29	34.19
10/12/2005	4688.66		293.76	72.76	10.18	85.04	1.72	6.00	138.26	18.53	19.35	222.41	27.77
16/12/2005	998.04		148.55	79.93	16.62	5.98	1.13	4.42	102.84	1.33	8.95	44.17	34.05
28/12/2005	2419.22	21.75	509.72	153.39	21.91	27.55	1.96	19.12	254.85	4.93	16.31	254.95	66.91
05/01/2006	1951.09	92.28	213.23	132.28	12.93	48.13	6.87	9.74	215.59	6.14	6.91	169.42	
11/01/2006	2705.94	68.94	376.84	119.20	15.55	71.15	11.87	11.39	209.78	8.21	21.43	212.76	101.10
17/01/2006	921.04	116.67	323.05	144.30	13.00	32.32	7.88	18.33	227.84	7.00	24.10	261.75	37.87
23/01/2006	1538.29	31.45	328.73	88.11	9.93	11.55	1.07	12.81	201.54	3.40	21.50	160.74	5.05
29/01/2006	1417.52	4.46	250.07	44.32	4.50	13.59	1.62	5.04	87.49	3.47	19.26	74.93	8.84
10/02/2005	1766.63	13.12	390.47	74.64	9.22	10.40	0.49	6.55	163.36		27.53	168.17	15.16
16/02/2006	3691.00	46.49	318.84	116.84	13.19	34.35		21.52	281.49	5.94	19.30	388.48	73.37
28/02/2006	1271.13	245.92	178.80	116.01	17.94	16.38	2.33	19.20	219.95	4.39	159.49	284.24	141.25
06/03/2006	1046.17	105.18	207.34	113.62	10.18	23.18	10.51	16.68	206.76	3.40	13.53	301.31	32.82
12/03/2006	1389.59	60.23	558.32	117.25	12.73	16.53	10.30	9.11	139.12	3.07	12.63	71.98	34.09
18/03/2006	1776.30	1.45	330.48	101.19	12.05	30.09	5.51	3.42	103.70	3.46	14.41	76.21	15.76

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
24/03/2006	1989.98	210.13	189.60	115.47	7.71	28.19	4.97	28.36	276.89	1.80	12.73	412.71	130.79
24/04/15	892.76	0.00	226.85	105.61	12.28	1.22	0.00	6.65	165.16	0.00	10.51	58.96	11.30

3.4.1 Estadística Descriptiva

Las concentraciones elementales de ambos periodos de estudio 2004-2006 (04-06) y 2014-2015 (14-15) fueron procesadas en EXCEL para obtener los parámetros de mínimos, máximos, promedio y la respectiva desviación estándar. Así mismo se incluye el límite de detección del método para poder identificar los valores mínimos que están por debajo de éste.

Tabla 7 **Estadística Descriptiva.** Fuente: Constructo del Autor

	Límite de Detección (ng/m ³)	N Frecuencia		Min		Max		Promedio		Desviación Estándar	
		04-06	14-15	04-06	14-15	04-06	14-15	04-06	14-15	04-06	14-15
S	17.3	77	116	261.99	225.52	4688.66	5743.87	1760.70	1426.98	1060.00	844.49
Cl	8.47	56	99	1.45*	0.42*	277.20	664.25	56.78	44.72	66.90	87.06
K	4.24	77	116	55.39	15.22	558.32	882.97	210.90	176.08	113.13	124.67
Ca	2.4	77	116	39.25	32.79	237.47	518.40	96.45	129.26	35.69	65.45
Ti	2.14	77	116	2.74	1.69*	52.06	127.68	9.41	13.33	6.04	16.62
V	2.04	77	111	1.44*	0.37*	185.95	110.83	30.81	18.03	36.81	22.69
Cr	1.81	72	110	0.37*	0.05*	23.09	11.89	5.05	2.76	4.78	1.86
Mn	1.88	77	116	3.30	0.66*	53.89	26.01	15.16	10.26	9.19	4.54
Fe	1.91	77	116	60.81	18.82	591.77	787.01	189.68	211.08	83.05	125.36
Ni	2.81	55	95	0.12*	0.12*	39.57	30.64	6.50	4.32	7.42	4.73
Cu	4.8	76	116	3.20*	0.57*	159.49	46.42	19.02	13.89	21.98	9.06
Zn	4.56	77	116	33.22	11.54	805.76	2323.76	240.63	160.06	147.40	226.98
Pb	29.3	75	108	5.05*	0.54*	141.25	180.67	52.74	23.12	31.48	20.18

* Valor por debajo del límite de detección

El elemento más abundante en las PM_{2.5} es azufre seguido de hierro, potasio zinc y calcio. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de estudios previos (Aldape & Flores M, 2004; Johnson et al., 2006; Vega et al., 2011).

También es notable que las concentraciones elementales son más altas en el primer periodo (2004-2006) que en 2014-2015, a excepción del Ca y Ti. Un patrón similar fue observado al comparar los promedios de las concentraciones máxicas obtenidas para cada muestreo al dividir la masa del filtro entre el volumen muestreado durante cada periodo bajo estudio. De noviembre 2004 a marzo 2006, el promedio de las concentraciones máxicas fue 25.2 µg/m³, mientras que 20.9 µg/m³ durante enero 2014 a diciembre 2015. Lo cual indica una reducción en las concentraciones ambientales de PM_{2.5} de 17% a lo largo de 10 años.

3.5 Variación Estacional de los elementos químicos presentes. Series de tiempo 2014-2015

Una vez obtenidas las concentraciones elementales de las muestras analizadas, estas fueron graficadas a lo largo del periodo de análisis obteniendo una serie de tiempo por cada elemento y observar su comportamiento para identificar los patrones estacionales:

La serie de tiempo del azufre (Fig. 22) muestra que las concentraciones más altas se presentaron en la temporada seca-fría, seguido de la temporada de lluvias y finalmente la seca-caliente

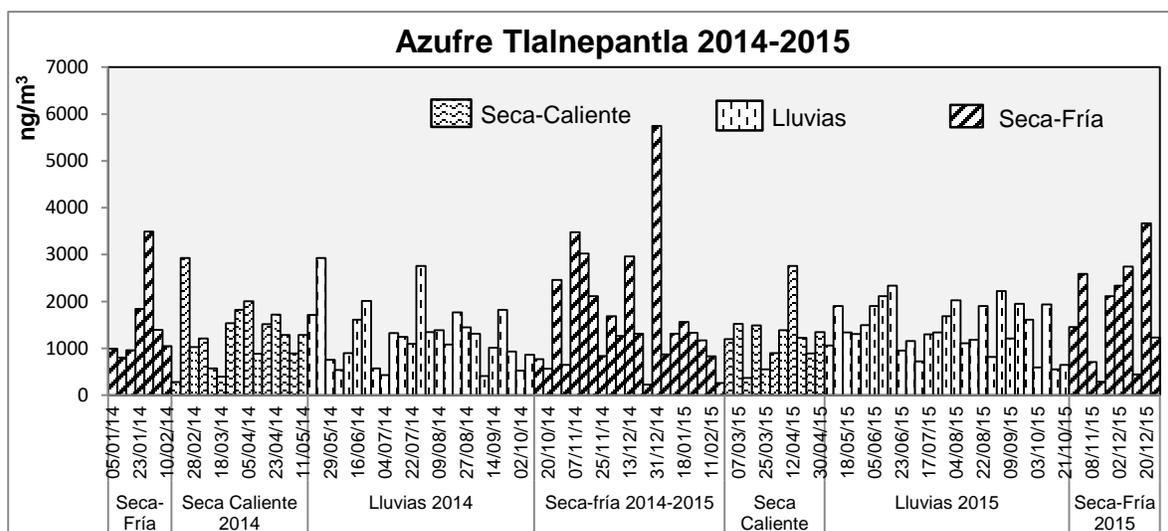


Fig. 22 Serie de tiempo de Azufre TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

Las concentraciones elementales de cloro son mucho menores que las del azufre, a excepción de algunos valores extremos que se presentan en su mayoría en la temporada seca-fría (Fig. 23).

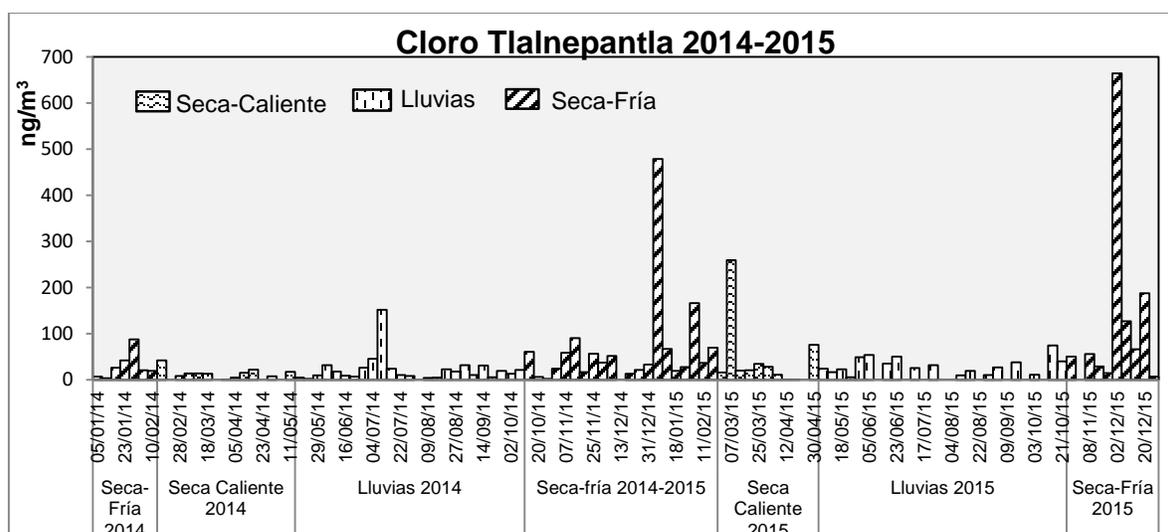


Fig. 23 Serie de tiempo de Azufre TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

La temporada seca-fría presentó las mayores concentraciones de potasio (Fig. 24), seguido de la seca-caliente y finalmente la temporada de lluvias.

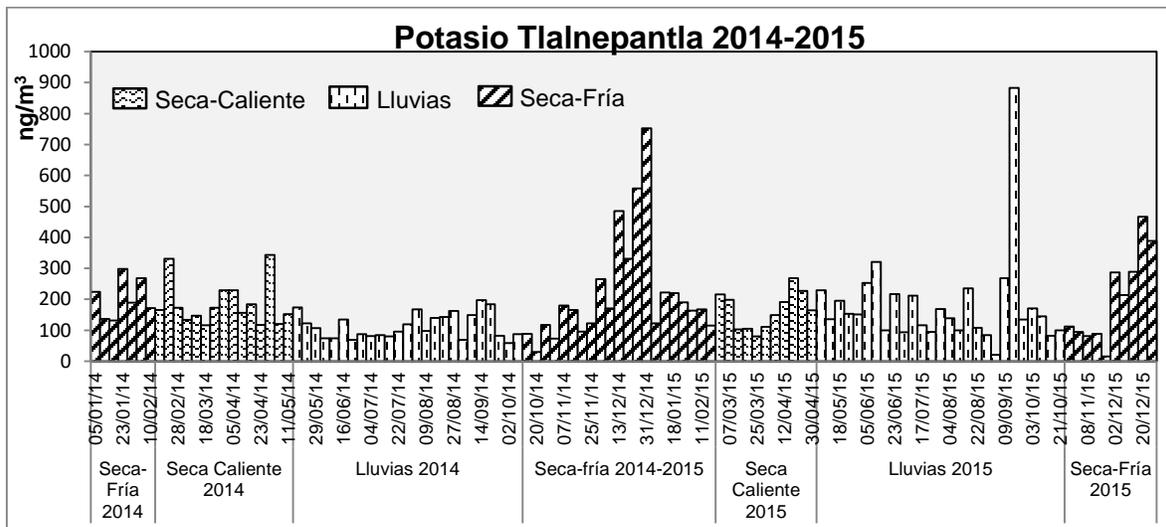


Fig. 24 Serie de tiempo de Potasio TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Auto

La Fig. 25 muestra la serie de tiempo del Calcio, las concentraciones de Ca se mantienen bastante constantes a lo largo del año, aunque la temporada seca-fría sigue teniendo las mayores concentraciones, seguida de la temporada de lluvias.

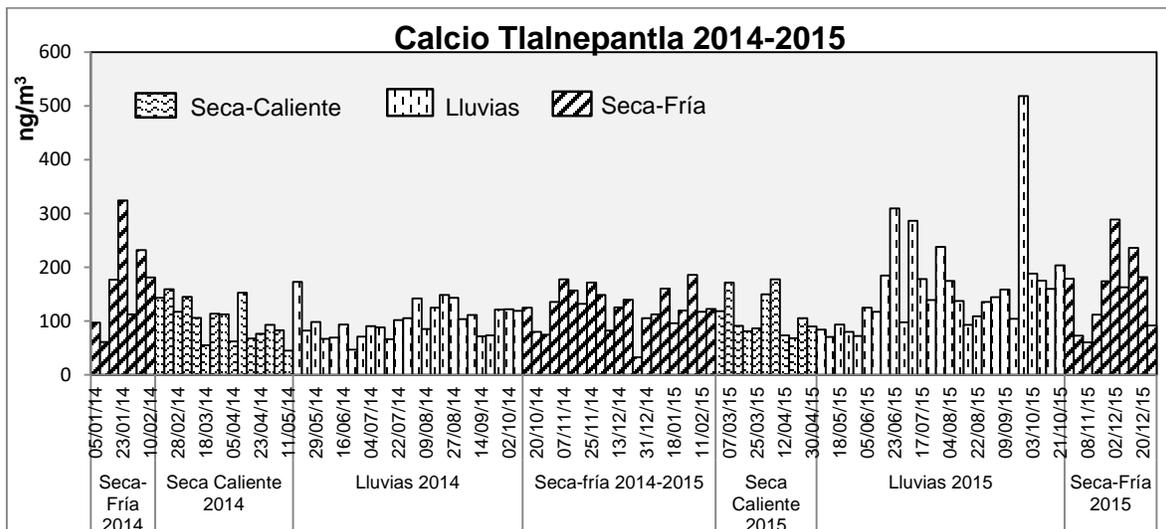


Fig. 25 Serie de tiempo de Calcio TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

Las concentraciones promedio de Ti son menores a 20 ng/m³ y a diferencia de las series de tiempo anteriores, la temporada con las mayores concentraciones es la de lluvias, seguida de la seca-caliente y al final la seca-fría. (Fig. 26)

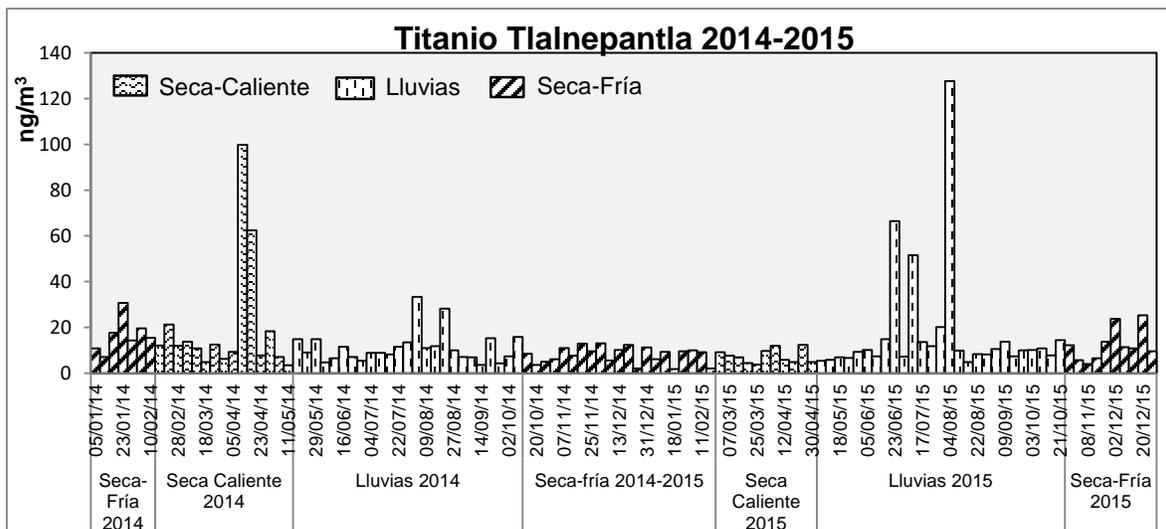


Fig. 26 Serie de tiempo de Titanio TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

El V presenta un comportamiento particular ya que muchos de los valores de la serie son incrementos abruptos con una línea base pequeña, siendo la temporada seca-fría la que condensa las mayores concentraciones seguido de la temporada de lluvias y al final la seca-caliente (Fig. 27).

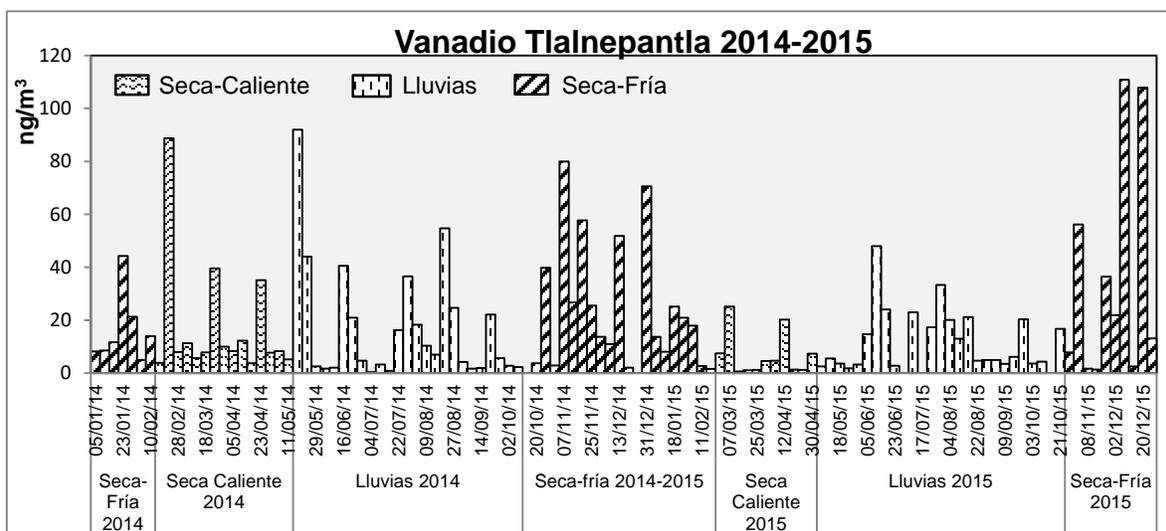


Fig. 27 Serie de tiempo de Vanadio TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor



La Fig. 28 ilustra la serie de tiempo del Cromo, las concentraciones son pequeñas y constantes a lo largo del año, siendo también la temporada seca-fría la que concentra las mayores concentraciones, seguido de la de lluvias y por último la seca-caliente.

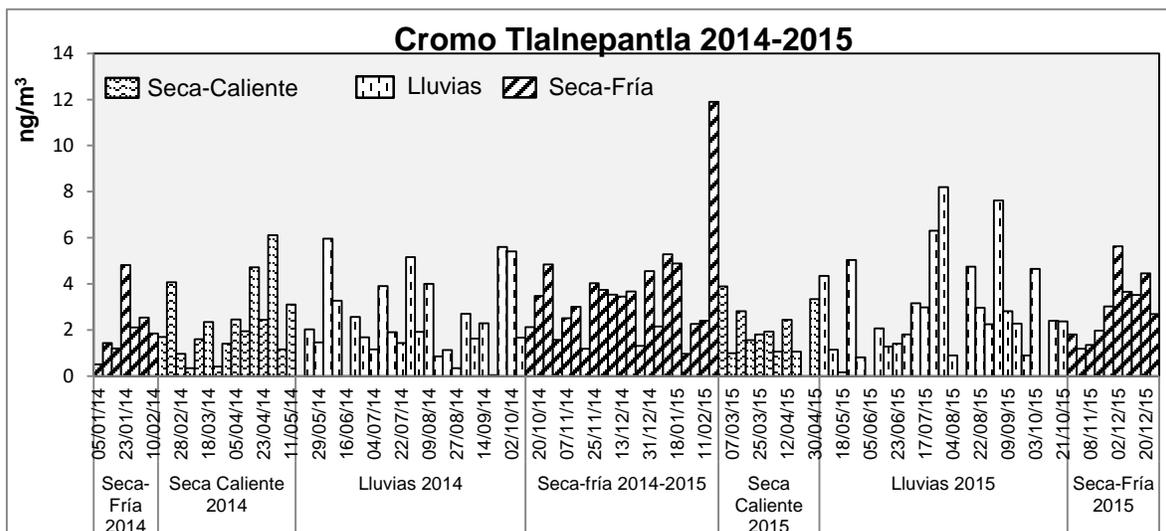


Fig. 28 Serie de tiempo de Cromo TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

El Mn presenta un comportamiento bastante constante a lo largo del año (Fig. 29), siendo la temporada de lluvias la que concentra las mayores concentraciones, seguida de la seca-fría y la seca-caliente

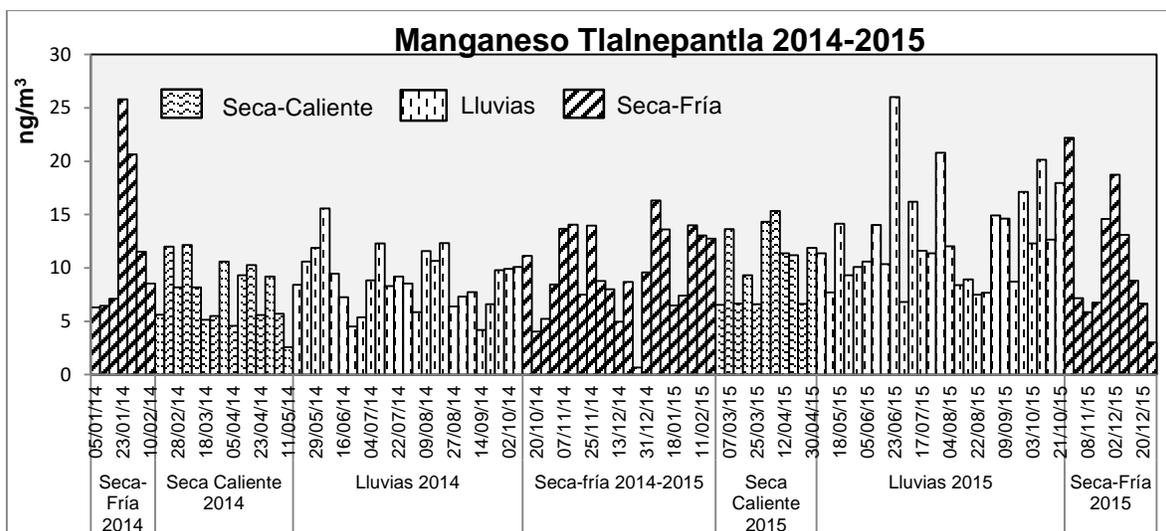


Fig. 29 Serie de tiempo de Manganeso TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

La Fig. 30 presenta el comportamiento del Fe el cual es bastante estable a lo largo del año. Las mayores concentraciones se presentaron en la temporada de lluvias, seguido de la temporada seca-fría. Es el segundo elemento en abundancia después del azufre.

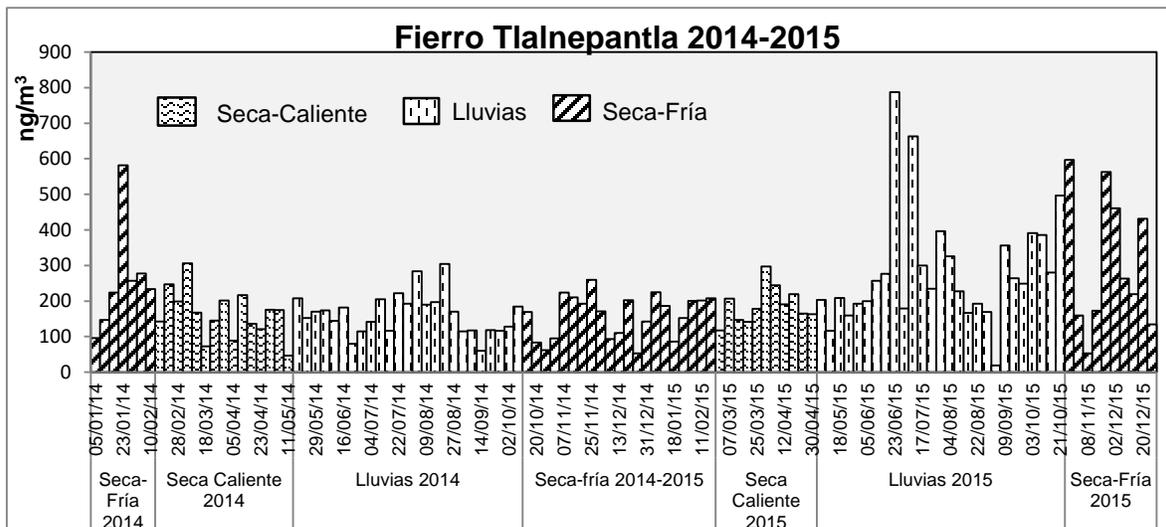


Fig. 30 Serie de tiempo de Fierro TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

El Ni presenta un comportamiento particular debido a que sus apariciones no son constantes y no se detectó en todas las muestras (Fig. 31), pese a ello los incrementos del Ni coinciden con los del V y sus comportamientos son similares. La temporada seca-fría concentra las mayores concentraciones, seguida de la de lluvias y seca-caliente.

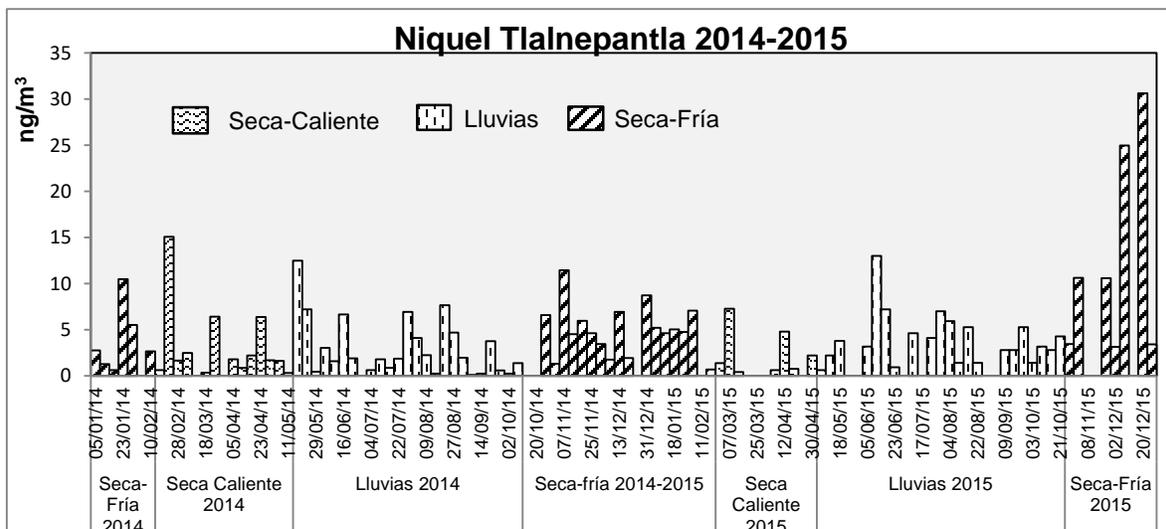


Fig. 31 Serie de tiempo de Níquel TLA 2014-2015 Fuente: Constructo del Autor

El comportamiento del cobre está ilustrado en la Fig. 32 donde puede apreciarse que las mayores concentraciones éste se presentaron en la temporada seca-fría, seguida de la seca-caliente, mientras que durante las lluvias las concentraciones disminuyen.

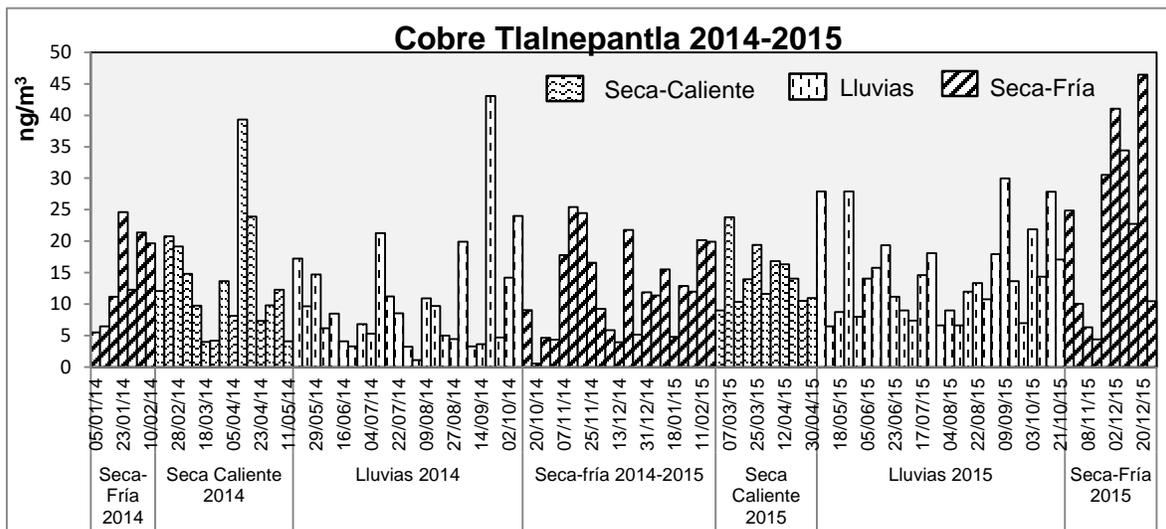


Fig. 32 *Serie de tiempo de Cobre TLA 2014-2015* Fuente: Constructo del Autor

La Fig. 33 ilustra el comportamiento del Zn, el cual es uno de los elementos que presentó una alta abundancia. En la temporada seca-fría se presentaron las mayores concentraciones, seguida de la de lluvias y al final la seca-caliente.

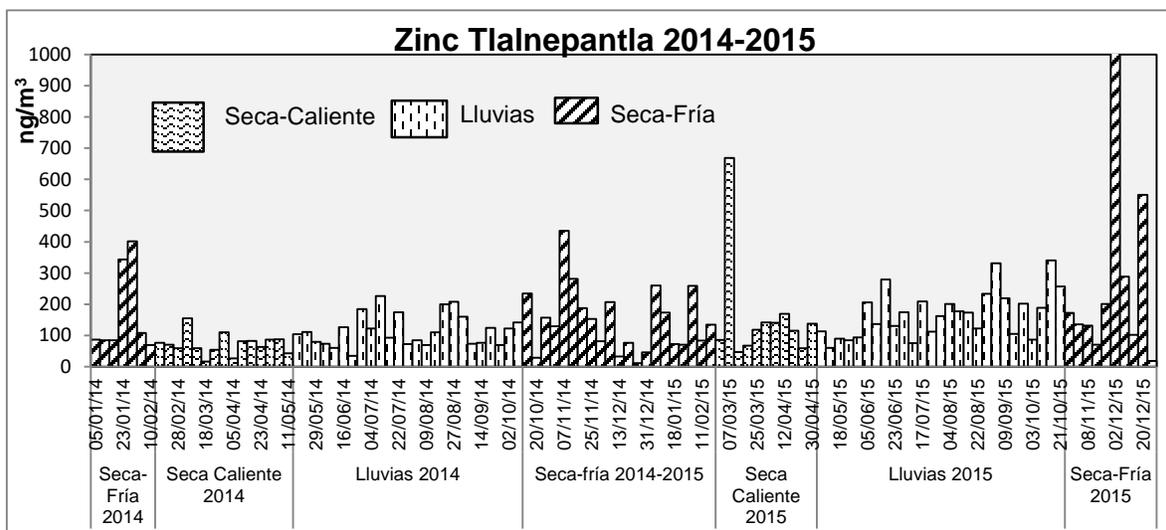


Fig. 33 *Serie de tiempo de Zinc TLA 2014-2015* Fuente: Constructo del Autor

Por último, la serie de tiempo del comportamiento estacional del Plomo está representado en la Fig. 34. El Pb se presentó de manera constante a lo largo de los dos años analizados, las mayores concentraciones se presentaron en la temporada seca-fría, seguida de la temporada de lluvias y al final la seca-caliente.

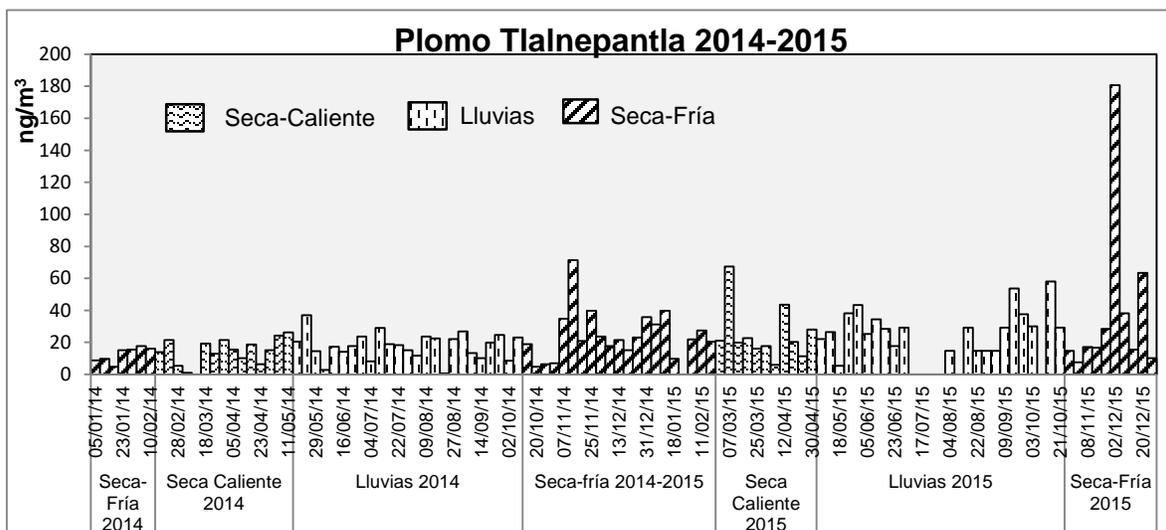


Fig. 34 **Serie de tiempo de Plomo TLA 2014-2015** Fuente: Constructo del Autor

3.5.1 Comparativo longitudinal de las tendencias estacionales

Una vez clasificadas las muestras en las temporadas climáticas Seca-Fría (Nov-Feb), Seca-Caliente (Mar-May) y Lluvias (Jun-Oct), se obtuvieron las concentraciones promedio por temporada para ambos periodos de análisis y se concentran en la Tabla 8.

Tabla 8 **Concentraciones estacionales promedio** Fuente: Constructo del autor

	Seca-Fría (Nov-Feb)		Seca-Caliente (Mar-May)		Lluvias (Jun-Oct)	
	2004-2006	2014-2015	2004-2006	2014-2015	2004-2006	2014-2015
S	1957.25	1644.44	1678.65	1267.19	1439.30	1347.96
Cl	71.58	76.04	25.10	29.62	57.89	25.43
K	250.35	212.92	217.07	176.27	123.75	149.06
Ca	98.52	140.71	94.63	105.59	94.03	132.72
Ti	9.84	10.63	7.90	14.71	10.06	14.61
V	39.00	26.32	24.89	12.69	19.93	14.78
Cr	6.20	3.07	4.19	2.23	3.50	2.78
Mn	13.69	10.41	11.95	8.78	21.40	10.89
Fe	187.19	215.68	158.34	173.47	226.13	226.53
Ni	7.95	6.50	6.05	2.95	3.40	3.47
Cu	23.56	15.52	12.06	13.86	16.52	12.71
Zn	211.22	217.97	211.13	108.54	330.49	143.50
Pb	54.15	26.26	41.11	19.43	62.04	22.61

La Fig. 35 es la representación gráfica de la Tabla 5. Para cada elemento, dos columnas apiladas representan la concentración promedio por temporada climática, la columna de la izquierda corresponde al primer periodo (04-06) y la columna de la derecha al segundo (14-15).

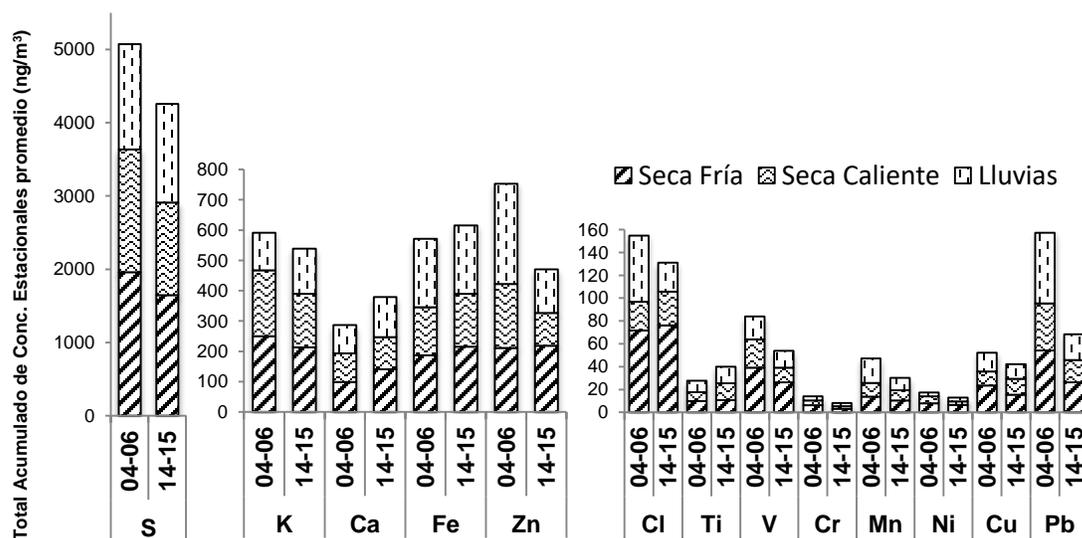


Fig. 35 **Concentraciones promedio por temporada para periodos 04-06 y 14-15.**

Fuente: Constructo del Autor

Las concentraciones elementales más altas se observaron durante la temporada Secca-Fría (noviembre-febrero) ya que las temperaturas más bajas durante este período causan inversiones térmicas y una capa de mezcla inferior que da como resultado una dispersión de contaminantes deficiente y una mayor acumulación. La temporada Secca-Caliente (marzo-mayo) también tiene altas concentraciones debido a la menor humedad relativa y la baja velocidad del viento causadas por los sistemas de alta presión que conducen a una dispersión deficiente de contaminantes (SEDEMA, 2015).

Durante la temporada de lluvias hay una disminución en la concentración de aerosoles causada por el arrastre húmedo, pero la reducción en la concentración de metales no es tan evidente, lo que sugiere que los metales no son precipitados y lavados por la lluvia en una gran proporción porque la mayoría de ellos están en la fracción más fina y permanecen en la atmósfera a pesar de la precipitación (Kavuri, 2014). Este es el caso de Fe, Ca y Ti, que son marcadores de la resuspensión del polvo del suelo (Johnson et al., 2006) y sus concentraciones elementales no disminuyen en este período, lo que puede atribuirse a episodios de valores de velocidad de vientos relativamente altos.

3.6 Factores de Enriquecimiento

Para cada uno de los elementos analizados se calculó el factor de enriquecimiento, usando para ello las concentraciones elementales estacionales promedio en las PM_{2.5}, mientras que las concentraciones promedio de la corteza terrestre se obtuvieron de una referencia bibliográfica (Lide, 2004).

Según la hipótesis de que la corteza terrestre es la única fuente de hierro, un valor de FE cercano a 1 para un elemento indica que la meteorización continental es una fuente importante de este elemento en particular. Sin embargo, debido a las variaciones locales en la composición, un límite de 10 en lugar de 1 generalmente se considera aceptable para la corteza terrestre. Los elementos con FE superior a 10 se consideran procedentes de actividades antropogénicas (Rahn, 1976). Además, los elementos con FE entre 10 y 500 se consideran moderadamente enriquecidos, lo que indica otra fuente además de la corteza terrestre. Finalmente, FE, más de 500 muestra condiciones altamente enriquecidas, lo que indica una contaminación severa debido a actividades humanas. La Tabla 9 concentra los valores de los FE para las muestras de 2014.

Tabla 9 Factores de enriquecimiento por temporada 2014

Fuente: Constructo del autor

	Concentración Corteza Terrestre (ppm) (Lide, 2004)	Seca-Caliente		Lluvias		Seca-Fría	
		Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento	Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento	Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento
S	350	1288.95	1273.87	1270.42	1250.46	1638.26	1662.68
Cl	145	10.48	25.01	21.07	50.68	63.42	155.36
K	20900	184.63	3.06	113.59	1.92	220.74	3.75
Ca	41500	102.10	0.85	100.90	0.82	123.93	1.06
Ti	5650	20.09	1.23	11.16	0.68	7.89	0.50
V	120	17.01	49.04	16.85	51.74	22.63	66.99
Cr	102	2.32	7.88	2.33	7.48	3.47	12.09
Mn	950	7.64	2.78	8.91	3.18	9.64	3.60
Fe	56300	162.76	1.00	163.43	1.00	158.49	1.00
Ni	84	2.77	11.39	2.91	12.63	4.04	17.07
Cu	60	13.56	78.17	10.57	56.21	12.26	72.60
Zn	70	71.49	353.27	116.01	561.97	148.17	751.91
Pb	14	14.14	349.31	17.74	439.09	23.39	593.58

A forma de apoyo visual, la Fig. 37 conjunta y ordena los valores de los EF para los elementos químicos presentados en la tabla anterior.

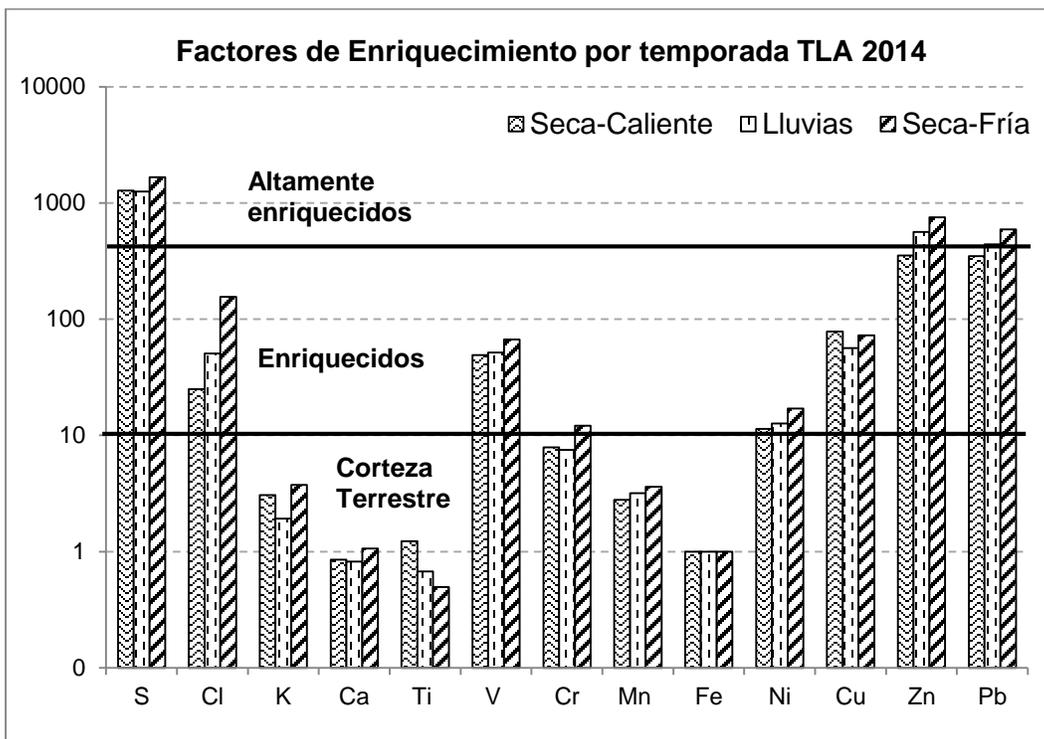


Fig. 36 FE por temporada TLA 2014. Fuente: Constructo del Autor

Se puede observar que además de Fe, otros cinco elementos, K, Ca, Ti, Cr y Mn, mostraron FE en proporciones asociadas con fuentes naturales. Esto coincide con el trabajo de la mayoría de los especialistas en el campo. En particular, Johnson et al., (2006), analizaron la composición de PM_{2.5} en MCMA y reportaron que Ca, Fe, Mn y Ti son componentes del suelo. Se encontró que cuatro elementos estaban moderadamente enriquecidos (Cl, V, Ni y Cu), mientras que los tres elementos restantes, S, Zn y Pb, caen en la categoría altamente enriquecida.

Así mismo al analizar la variación estacional de los FE se observa que la mayoría de los elementos alcanzan valores más altos en la temporada seca fría, durante la cual los patrones de circulación de vientos cambian en dirección y magnitud, favoreciendo un ambiente de estabilidad. Esto a excepción de Ti y Cu que tuvieron mayores FE en la temporada seca-caliente, esta variación depende de los patrones de emisión de los elementos los cuales pueden verse influenciados por las variables meteorológicas propias de cada estación climática. El mismo análisis se llevó a cabo para los datos de 2015 y la Tabla 10 y Fig. 37 representan sus valores:

Tabla 10 Factores de enriquecimiento por temporada 2015
Fuente: Constructo del autor

	Concentración Corteza Terrestre (ppm)	Seca-Caliente		Lluvias		Seca-Fría	
		Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento	Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento	Concentración promedio PM _{2.5} (ng/m ³)	Factor de Enriquecimiento
S	350	1237.53	1058.51	1419.75	801.44	1756.12	925.54
Cl	145	42.25	87.23	20.05	27.32	120.03	152.70
K	20900	164.88	2.36	181.91	1.72	203.54	1.80
Ca	41500	110.35	0.80	162.19	0.77	155.93	0.69
Ti	5650	7.36	0.39	17.79	0.62	12.28	0.40
V	120	6.79	16.93	11.22	18.47	35.95	55.26
Cr	102	1.90	5.58	2.69	5.21	2.93	5.31
Mn	950	10.32	3.25	12.72	2.64	10.69	2.08
Fe	56300	188.06	1.00	284.96	1.00	305.21	1.00
Ni	84	1.59	5.65	3.09	7.26	8.68	19.07
Cu	60	14.26	71.16	14.69	48.38	23.13	71.10
Zn	70	159.07	680.28	168.96	476.90	399.39	1052.47
Pb	14	24.88	531.93	22.09	311.70	39.27	517.38

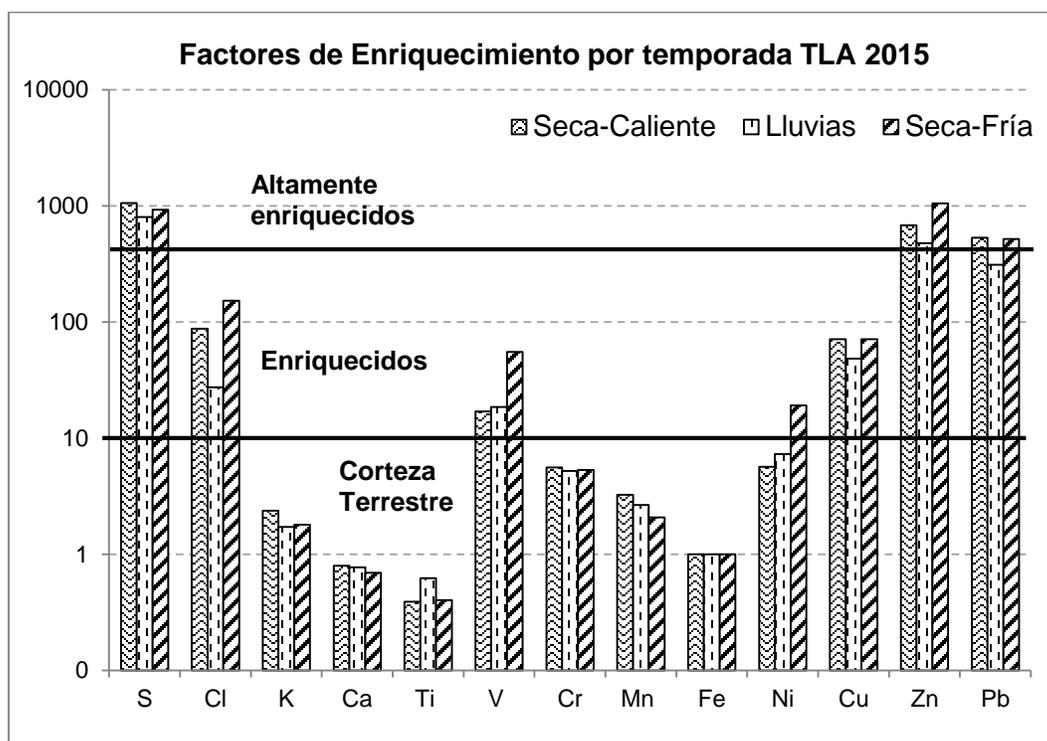


Fig. 37 FE por temporada TLA 2015. Fuente: Constructo del Autor

Mientras que se mantiene la tendencia de las fuentes de emisión Natural (K, Ca, Ti, Cr y Mn) y Antropogénica (S, Cl, V, Ni, Cu, Zn y Pb), la temporalidad de los FE presentó cambios con respecto a 2014, los mayores FE se repartieron de manera casi equitativa entre las temporadas seca-caliente y seca fría, lo cual depende de las variables meteorológicas de cada estación las cuales también varían de un año a otro.

3.6.1 Comparativo longitudinal de los factores de enriquecimiento

Para poder evaluar la evolución de los FE a lo largo de 10 años, se calcularon los FE promedio para cada uno de los periodos analizados 2004-2006 y 2014-2015, sus resultados se presentan en la Tabla 11 y Fig. 38.

Tabla 11 Comparativo longitudinal de los FE

Fuente: Constructo del autor

	FE 2004-2006	FE 2014-2015
S	1493.15	1087.45
Cl	116.24	82.26
K	3.00	2.25
Ca	0.69	0.83
Ti	0.49	0.63
V	76.21	40.07
Cr	14.70	7.21
Mn	4.74	2.88
Fe	1.00	1.00
Ni	22.95	13.70
Cu	94.07	61.74
Zn	1020.32	609.88
Pb	1118.15	440.50

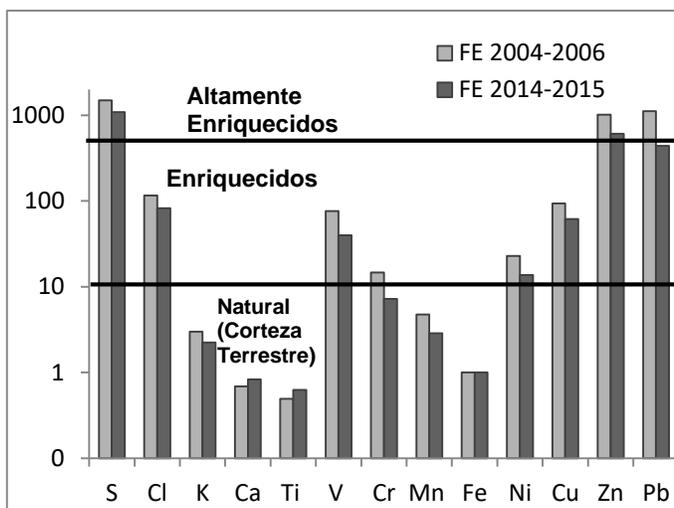


Fig. 38 Comparativo longitudinal de los FE.

Fuente: Constructo del Autor

La mayoría de los elementos presentaron FE mayores durante periodo 2004-2006, con respecto a 2014-2015, a excepción del Ca y Ti. Un mayor valor de FE indica que la razón de la concentración del elemento de interés en el aerosol es mayor con respecto a la razón del elemento en la corteza terrestre. Durante 2004-2006 la contribución antropogénica de los elementos fue incluso mayor con respecto a 2014-2015.

3.7 Reconocimiento del sitio bajo estudio

Las muestras fueron recolectadas en la estación de monitoreo Tlalnepantla (TLA) del Sistema de Monitoreo atmosférico de la Ciudad de México ubicada en el noroeste del MCMA (19°31'44.677" N,

99°12'16.549" O) a una altitud de 2311 msnm. El muestreador se colocó encima de un tanque de suministro municipal de agua a una altura de 7.24 m sobre el nivel del suelo para evitar obstáculos cercanos, como edificios y árboles. Tlalnepantla es un municipio con una de las mayores concentraciones de industrias en el Estado de México (SEDEMA, 2014), además de un número considerable de carreteras importantes, ambas fuentes son relevantes en términos de emisión antropogénica de partículas.

3.7.1 Perfil de vientos del sitio

Con el objetivo de analizar la dirección predominante de los vientos que convergen en el sitio de estudio, se elaboró un diagrama de Rosa de Vientos a través del uso del software libre WR Plot © de la US-EPA. Los datos de dirección y velocidad del viento corresponden a los valores registrados en la estación de monitoreo de TLA del SIMAT durante los años 2014 y 2015 (SIMAT, 2020). La Fig. 39 ilustra el diagrama de vientos generado.

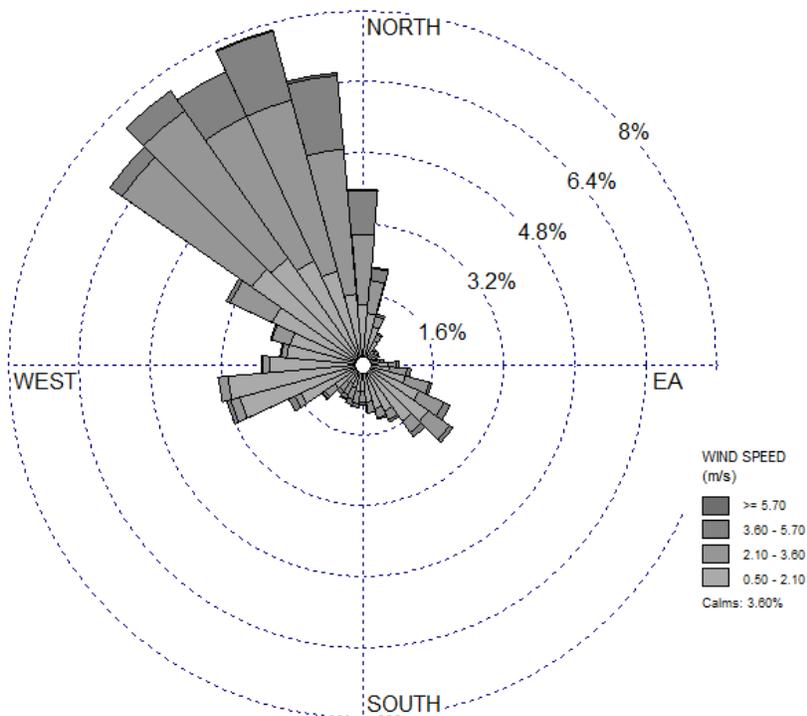


Fig. 39 **Diagrama de vientos de TLA 2014-2015**
Fuente: Constructo del Autor con datos del SIMAT, (2020)

A partir del diagrama de vientos, se puede observar que la mayoría de los vientos provienen del Noroeste y que las velocidades promedio están por debajo de 3.6 m/s. Este diagrama es de gran utilidad para poder discernir el impacto de las fuentes de emisión cercanas a la zona de estudio, ya que si estas se encuentran viento arriba hacia el noroeste de TLA es más probable que sus emisiones sean aerotransportadas hacia TLA.

3.7.2 Ubicación geográfica de las fuentes de emisión cercanas al sitio

Mediante Google Maps ® se realizó una búsqueda específica de fuente de emisión representativas y cercanas al sitio, tales como industrias, vialidades de alto tráfico vehicular, zonas de erosión eólica, entre otras. Una vez localizada la fuente de interés se midió la distancia al sitio de estudio. La Fig. 41 ejemplifica la búsqueda que se realizó y la Tabla 12 concentra las fuentes prioritarias identificadas:

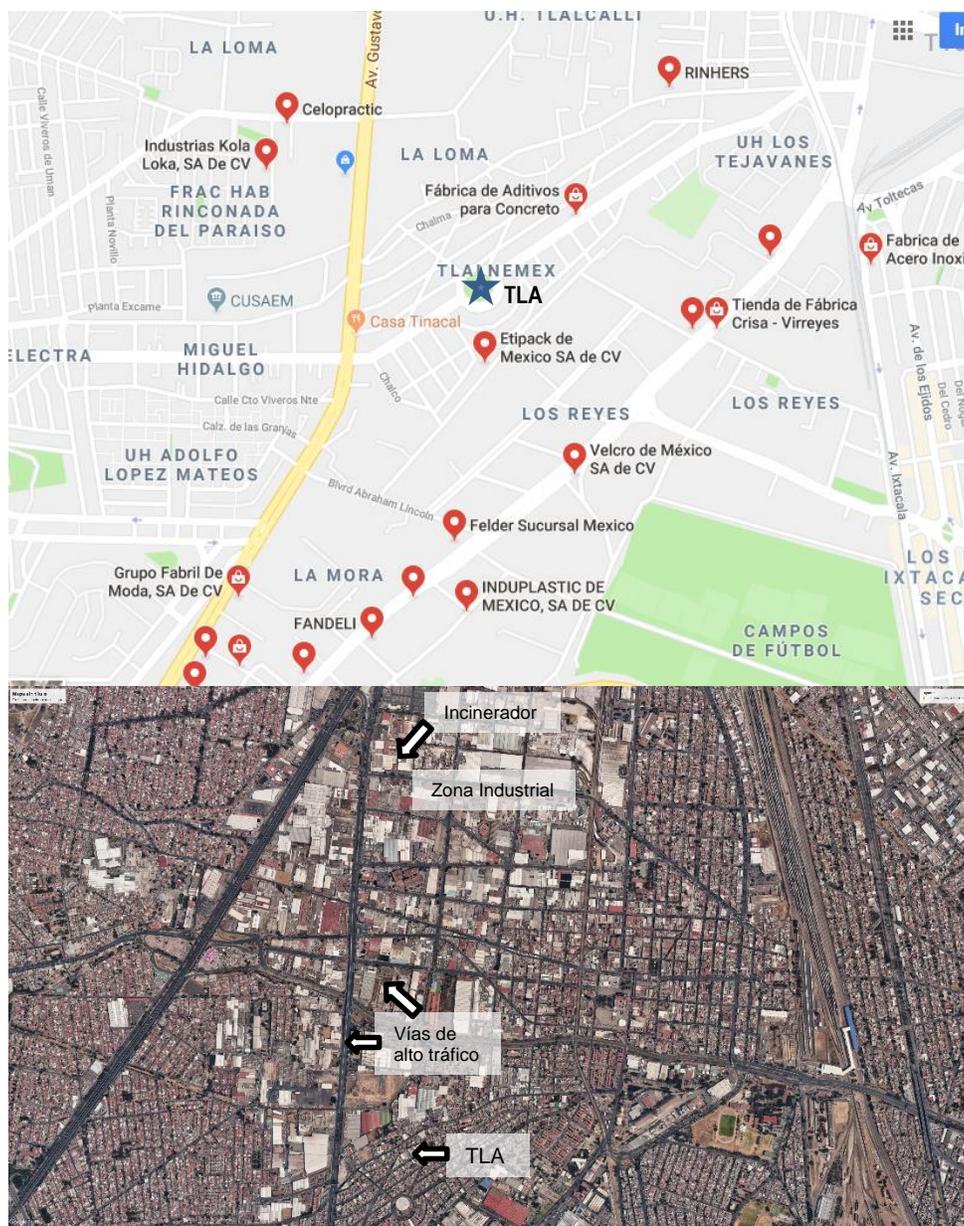


Fig. 40 **Búsqueda de fuentes de emisión cercaras a TLA**

Fuente: Google Maps®

Tabla 12 **Ubicación de fuentes de área circundantes a la estación de monitoreo TLA**

Fuente: Constructo del autor

Fuente	Tipo de Fuente	Distancia a TLA	Dirección
Senova (Fabricación de alimentos con azúcar sintético)	<i>Industrial</i>	160 m	NO
Fábrica de sellos Limongi	<i>Industrial</i>	270 m	SO
Vía Gustavo Baz	<i>Vehicular</i>	326 m	O
Fábrica de aditivos para concreto	<i>Industrial</i>	330 m	NE
Viczamex (fábrica textil)	<i>Industrial</i>	350 m	SE
Gabriel de México (Fábrica de amortiguadores y partes de suspensión)	<i>Industrial</i>	350 m	SE casi E
Solquim (Planta química)	<i>Industrial</i>	480 m	NE
Industrias Kola Loka	<i>Industrial</i>	500 m	NO
Plásticos Edo. Méx.	<i>Industrial</i>	570 m	SO casi sur
Verificentro	<i>Vehicular</i>	620 m	SE
Coca-Cola	<i>Industrial</i>	670 m	SO
Celopractic (Fábrica del Bolsas de Polietileno)	<i>Industrial</i>	700 m	NO
Campos de Fútbol	<i>Natural</i>	890 m	SE
Fábrica de Muebles de Acero Inoxidable	<i>Industrial</i>	1100 m	E
Planta de Incineración de Residuos	<i>Industrial</i>	2900 m	N

A partir del reconocimiento del sitio, se localizaron varias fuentes de emisión cercanas al sitio, mientras que el diagrama de vientos, permitió identificar cuáles de éstas tenían mayor probabilidad de impactar al sitio debido al traslado de sus emisiones por efecto del viento.

Fábricas de alimentos, industrias químicas, de fabricación de plásticos e incineración de residuos, así como emisiones de vialidades con alto tráfico vehicular son aquellas que tienen mayor probabilidad de impactar al sitio de estudio, lo cual resulta de gran apoyo para la identificación de fuentes de emisión.

3.8 Identificación de fuentes de Emisión

3.8.1 Matrices de correlación

La matriz de correlación de las concentraciones elementales se presenta como un primer enfoque para identificar las fuentes de emisión de los componentes elementales de las PM_{2.5}, ya que es un punto de partida para los métodos de análisis multivariados.

Debido a que los patrones de generación también se ven influenciados por las condiciones meteorológicas propias de cada estación climática, fue importante seleccionar la temporada más representativa para elaborar la matriz de correlación con las respectivas concentraciones elementales de las muestras recolectadas durante esa temporada. Se seleccionó la estación Seca-Fría debido a que en ella se presentaron las mayores concentraciones elementales por efecto de la acumulación de partículas por las inversiones térmicas.

La Tabla 13 y la Tabla 14 corresponden a las matrices de correlación para las concentraciones elementales durante la temporada seca-fría de octubre de 2005 a febrero de 2006 y la temporada de seca-fría de octubre de 2014 a febrero de 2015, respectivamente. Las variables a correlacionar fueron las concentraciones de los 13 elementos analizados. También se incluyó el monóxido de carbono (CO) ya que es un trazador vehicular. Las asociaciones de los coeficientes de correlación fueron consideradas como significativas con valores superiores a 0.5.

Tabla 13 **Matriz de correlación de la estación Seca-Fría (Oct 2005 – Feb 2006)**
Constructo del Autor

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	CO
S	1.00													
Cl	-0.05	1.00												
K	0.17	-0.26	1.00											
Ca	0.17	0.42	0.31	1.00										
Ti	0.12	0.26	0.41	0.74	1.00									
V	0.78	0.24	-0.06	0.33	0.09	1.00								
Cr	0.39	0.25	0.06	0.40	0.02	0.75	1.00							
Mn	-0.05	0.58	-0.19	0.57	0.22	-0.05	-0.03	1.00						
Fe	0.19	0.47	-0.03	0.75	0.41	0.21	0.16	0.89	1.00					
Ni	0.73	-0.10	-0.27	0.11	-0.15	0.97	0.66	-0.09	0.12	1.00				
Cu	-0.12	0.60	-0.08	0.06	0.30	-0.13	-0.17	0.15	0.09	-0.11	1.00			
Zn	0.32	0.59	-0.08	0.48	0.17	0.28	0.26	0.71	0.79	0.19	0.18	1.00		
Pb	0.05	0.73	-0.17	0.45	0.38	0.06	0.08	0.67	0.62	-0.06	0.52	0.63	1.00	
CO	0.25	-0.05	0.74	0.49	0.60	-0.12	-0.12	0.21	0.43	-0.32	0.17	0.28	0.24	1.00

Tabla 14 Matriz de correlación de la estación Seca-Fría (Oct 2014 – Feb 2015)
Construido del Autor

	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	CO
S	1.00													
Cl	-0.12	1.00												
K	0.56	-0.15	1.00											
Ca	0.15	0.16	-0.26	1.00										
Ti	0.45	-0.05	0.18	0.64	1.00									
V	0.84	-0.11	0.47	0.12	0.39	1.00								
Cr	-0.02	-0.09	-0.01	0.00	-0.35	-0.19	1.00							
Mn	0.04	0.58	-0.33	0.73	0.30	-0.09	0.17	1.00						
Fe	0.02	0.40	-0.24	0.78	0.53	0.02	0.10	0.86	1.00					
Ni	0.71	0.08	0.35	0.21	0.37	0.88	-0.32	0.09	0.10	1.00				
Cu	0.14	0.06	-0.11	0.55	0.47	0.09	0.12	0.60	0.80	0.00	1.00			
Zn	0.14	0.42	-0.45	0.55	0.19	0.31	-0.11	0.67	0.52	0.38	0.39	1.00		
Pb	0.37	0.26	0.17	0.46	0.31	0.23	-0.03	0.59	0.59	0.24	0.62	0.41	1.00	
CO	0.18	0.06	0.32	0.56	0.63	0.14	0.05	0.37	0.72	0.15	0.76	0.11	0.38	1.00

La Tabla 15 condensa las asociaciones más significativas entre las parejas de los elementos analizados y los conjunta en 5 grupos:

Tabla 15 Correlación entre parejas de elementos
Construido del Autor

Grupo	Parejas de elementos	Coeficiente de Correlación (r)	
		Seca-Fría 05-06	Seca-Fría 14-15
1	S-V	0.78	0.84
	S-Ni	0.73	0.71
	Ni-V	0.97	0.88
2	Cl-Cu	0.6	0.06
	Cl-Zn	0.59	0.42
	Cl-Pb	0.73	0.26
3	Ca-Ti	0.78	0.59
	Ca-Fe	0.86	0.73
4	K-CO	0.74	0.32
	Ti-CO	0.60	0.63
	Ca-CO	0.49	0.56
	Fe-CO	0.43	0.74
5	Cu-CO	0.17	0.76
	Zn-Mn	0.71	0.67
	Fe-Mn	0.89	0.86
	Zn-Fe	0.79	0.52
	Pb-Mn	0.67	0.59
	Pb-Fe	0.62	0.59
	Pb-Cu	0.52	0.62

3.8.2 Asociación de perfiles elementales con fuentes de emisión

Los grupos de elementos, también llamados perfiles elementales, fueron comparados con estudios previos así como los perfiles de referencia de la base de datos SPECIATE Versión 4.5-EPA.

Grupo 1 (S, V y Ni) estos elementos son trazadores de la *Combustión de Combustóleo* (Aldape et al., 2005; Suárez y Ondov, 2002). La correlación de los porcentajes de masa del perfil 115082.5 Oil-Fired Power Plant de la base SPECIATE, con los respectivos porcentajes de masa promedio de las muestras analizadas fue de 0.999 (Fig. 41). Al comparar ambos periodos de análisis, los coeficientes de correlación fueron muy similares.

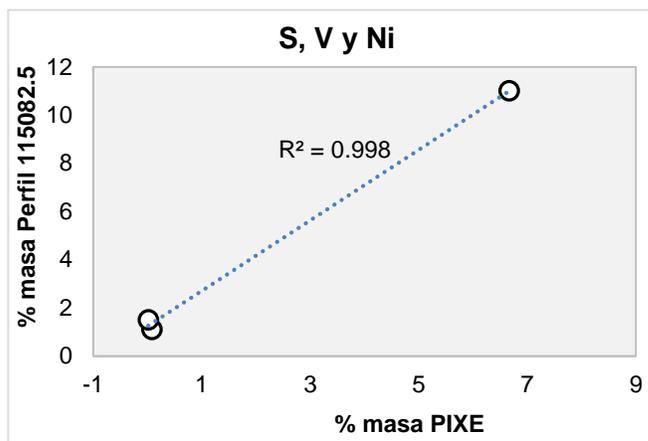


Fig. 41 **Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 115082.5** Fuente: Constructo del Autor

El Grupo 2 (Cl, Zn, Cu y Pb) está relacionado con la *Incineración de Residuos Municipales y Peligrosos*. El Cl proviene principalmente de la quema de plásticos como el cloruro de polivinilo y el papel, mientras que el Pb, Cu y Zn pueden producirse a partir de una variedad de residuos materiales (Moffet et al., 2008). La asociación de estos elementos fue más evidente en el primer periodo de análisis, ya que la planta de incineración ubicada a 2,9 km al norte de TLA, cambió de propietarios en 2007 e instaló mejores sistemas de control de emisiones a la atmósfera. Al correlacionar los porcentajes de masa de muestras de $PM_{2.5}$ con el perfil 3287 *Incinerator*, la correlación resultante fue de 0.989 (Fig. 42). Cabe mencionar que el Zn no fue correlacionado debido a sus elevadas concentraciones que son procedentes mayoritariamente de otras fuentes de emisión.

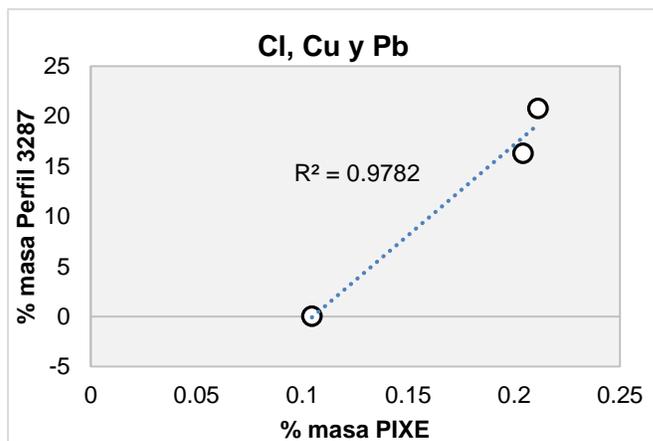


Fig. 42 **Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3287** Fuente: Constructo del Autor

El grupo 3 (Ca, Fe y Ti) está asociado al *Polvo de Construcción* (Jiang et al., 2018). De la Tabla 1, estos tres elementos fueron los que tenían mayores concentraciones en el segundo período de análisis (2014-2015). Además, el Inventario de Emisiones ZMVM de 2014 también reporta las actividades relacionadas con la construcción como una fuente importante de $PM_{2.5}$ en función de la cantidad de informes de evaluación de impacto ambiental de los proyectos de construcción presentados a la Secretaría (SEDEMA, 2014). Se obtuvo un valor de 0.97 al correlacionar los porcentajes de masa obtenidas por PIXE con el perfil SPECIATE 4158 *Construction Dust* (Fig. 43).

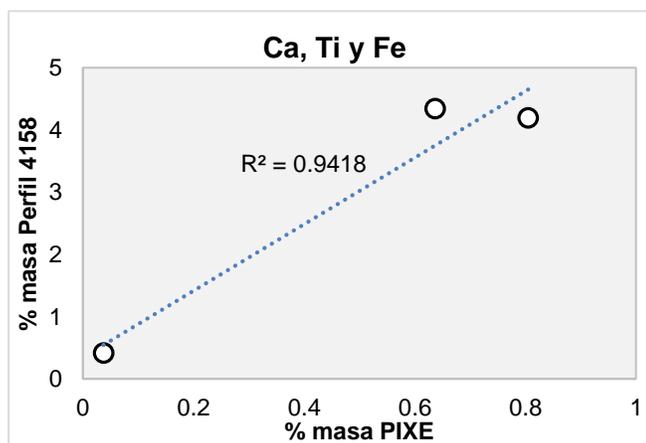


Fig. 43 **Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 4158** Fuente: Constructo del Autor

Grupo 4 (K, Ca, Ti, Fe, Zn y Cu), estos elementos son marcadores de Emisiones de Carreteras Pavimentadas en concordancia con los hallazgos de Vega et al., (2001). Asimismo, se obtuvo una correlación de 0.868 con el Perfil 3201 *Paved Road Dust* de la base de datos SPECIATE (Fig. 44). Además, estos elementos tienen una correlación significativa con el CO, un trazador de emisiones de vehículos. La correlación fue más fuerte en el análisis del segundo período ya que la cantidad de vehículos en el MCMA ha ido en aumento. Retomando los resultados del análisis de los FE, el K, Ca, Ti y Fe fueron asociados a erosión de la corteza terrestre, las partículas con un contenido significativo de estos elementos son resuspendidas por acción del paso de los vehículos.

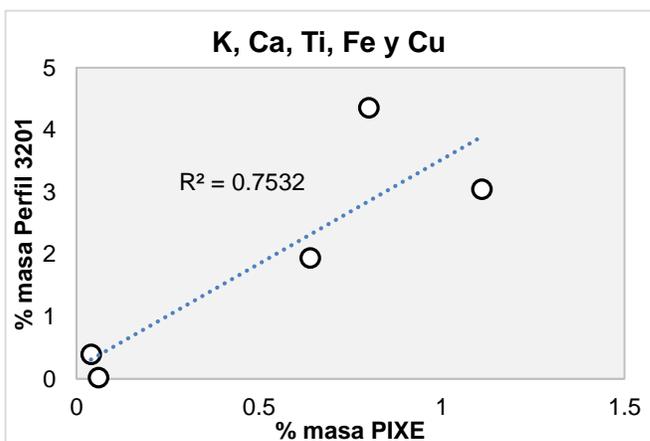


Fig. 44 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3201 Fuente: Constructo del Autor

Grupo 5 (Zn, Mn, Fe, Pb y Cu), estos elementos están asociados con las *emisiones industriales*. Al comparar los porcentajes de masa del perfil 3979 *Industrial Soil* de SPECIATE con los resultados respectivos obtenidos aquí con PIXE, se obtuvo una correlación de 0.94 (Fig. 45). Johnson et al. (2006) también reportaron que Zn, Mn y Fe son marcadores de emisiones industriales en MCMA. El reconocimiento del sitio también reveló varias industrias cercanas al sitio de TLA con diversos procesos industriales tales como manufactura de químicos, metalmecánicos, polímeros, alimentos, entre otros.

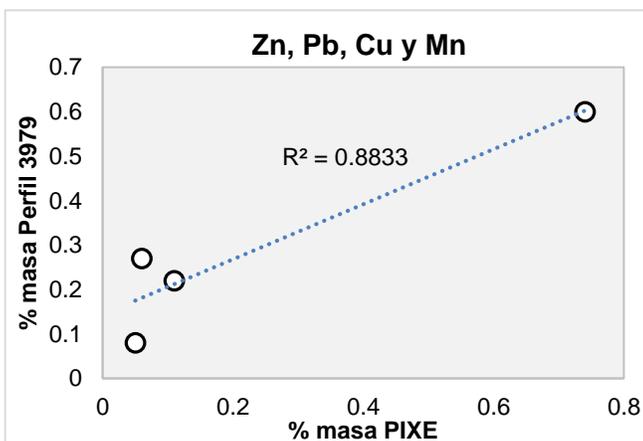


Fig. 45 Correlación entre los porcentajes de masa de los elementos del Grupo 1 y el perfil 3979 Fuente: Constructo del Autor

Vale la pena notar una correlación de 0.56 entre S y K durante 2014-2015. Esta asociación fue causada debido a que tres días de muestreo coincidieron con días festivos en México, donde los fuegos artificiales generalmente están presentes, esto durante la estación seca-fría considerada para la matriz de correlación. La Fig. 46 ilustra la serie de tiempo del potasio, ésta tiene cuatro valores atípicos particulares: 13, 25 y 31 de diciembre 2014 y 15 de septiembre 2015, estos días corresponden a festividades en la Ciudad de México, donde la quema de fuegos artificiales es una costumbre. Retama et al., (2019) analiza la composición de los aerosoles producidos por los fuegos artificiales durante las celebraciones de Navidad y Año Nuevo en la Ciudad de México. Entre otros resultados, se reporta un aumento significativo en la concentración de K ya que el nitrato de potasio es un componente principal de la pólvora, que es la base de los fuegos artificiales.

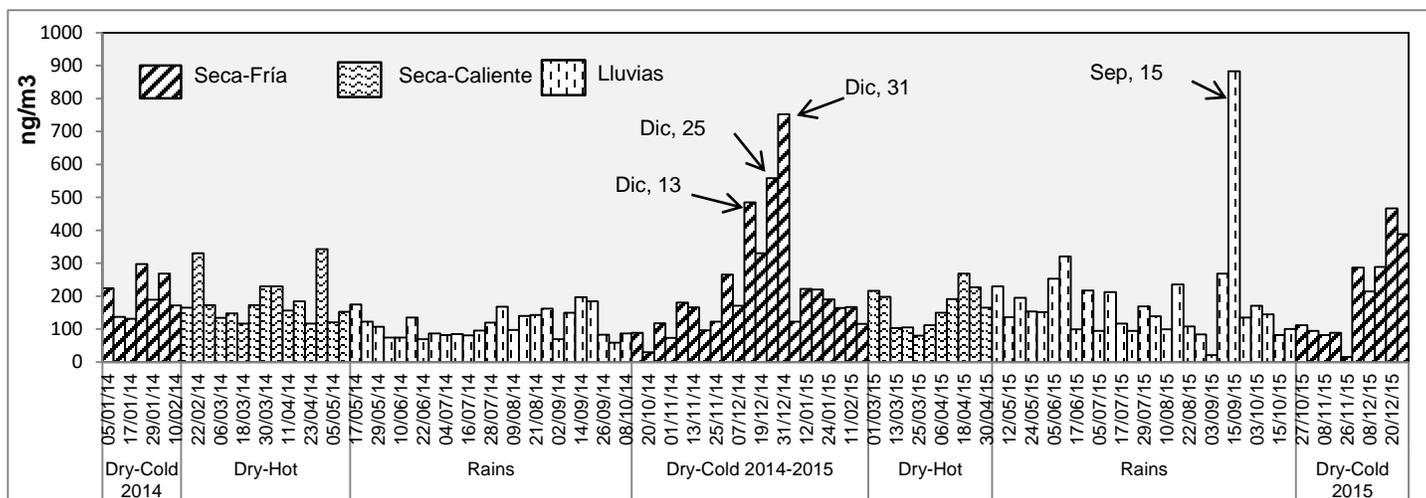


Fig. 46 *Serie de tiempo del Potasio 2014-2015 con indicadores de valores atípicos*

Fuente: Constructo del Autor

3.9 Análisis del impacto de las $PM_{2.5}$ en el microclima de la zona de estudio

Teniendo en cuenta los cambios de UV-A de un año a otro debido a la actividad solar (Matsumoto et al., 2014), solo se utilizó un año de muestreo, 2014, así como también porque tenía mayor disponibilidad de datos. Dentro del conjunto de fechas de muestreo de 2014, se consideraron dos características: 1) Días con valores bajos de WS porque la dispersión de partículas finas disminuye con un WS bajo y, por lo tanto, aumenta la probabilidad de atenuación solar. 2) Días de cielo despejado para asociar variaciones UV-A con efectos $PM_{2.5}$ en lugar de nubes.

3.9.1 Identificación de días adecuados para analizar cambios en UV-A por efecto de $PM_{2.5}$

Para poder asociar las variaciones de UV-A con los efectos de las $PM_{2.5}$, en vez de las nubes (Fig. 47), se realizó una revisión exhaustiva de imágenes satelitales diarias del archivo global de NOAA (NOAA, 2020) para identificar los días de cielo despejado sobre el noroeste de MCMA que coincidieron con las fechas de muestreo.



Fig. 47 *Ejemplo comparativo entre un día con nubosidad y un día despejado para el sitio de interés.*
Fuente. NOAA, 2020

Dado a la baja probabilidad de que un día de muestreo tuviera cielos despejados y valores bajos de velocidad de viento, de los 61 días de muestreo de 2014, sólo 10 días tuvieron las condiciones descritas anteriormente. La Fig. 48 y la Fig. 49 condensan las imágenes satelitales de los 10 días que fueron considerados para evaluar la relación entre las variaciones de la UV-A con la concentración de sulfatos.

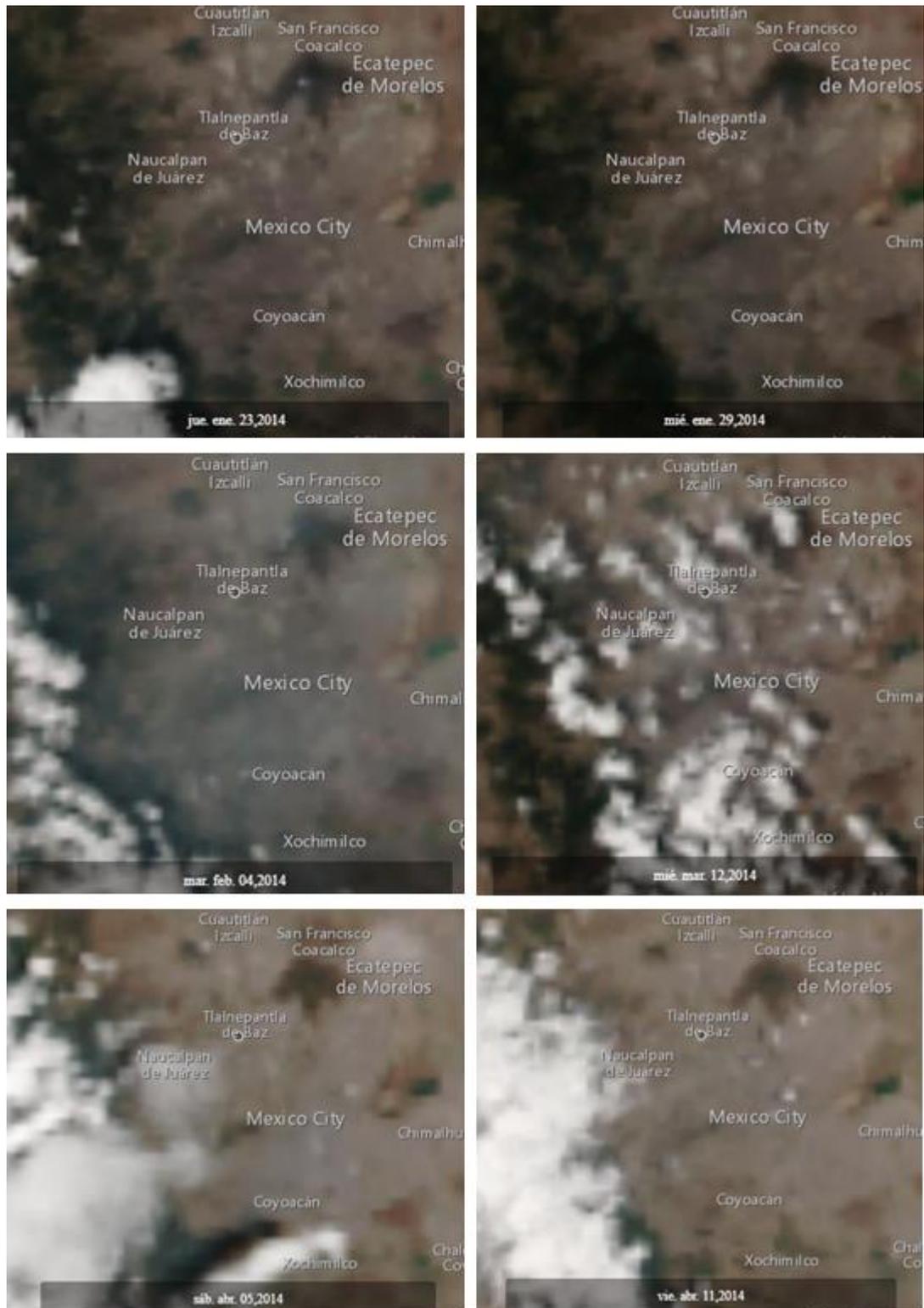


Fig. 48 *Imágenes satelitales de las fechas: a) 23/01/14, b) 29/01/14, c) 04/02/14, d) 12/03/14, e) 05/04/14, f) 11/04/14. Fuente. NOAA, 2020*

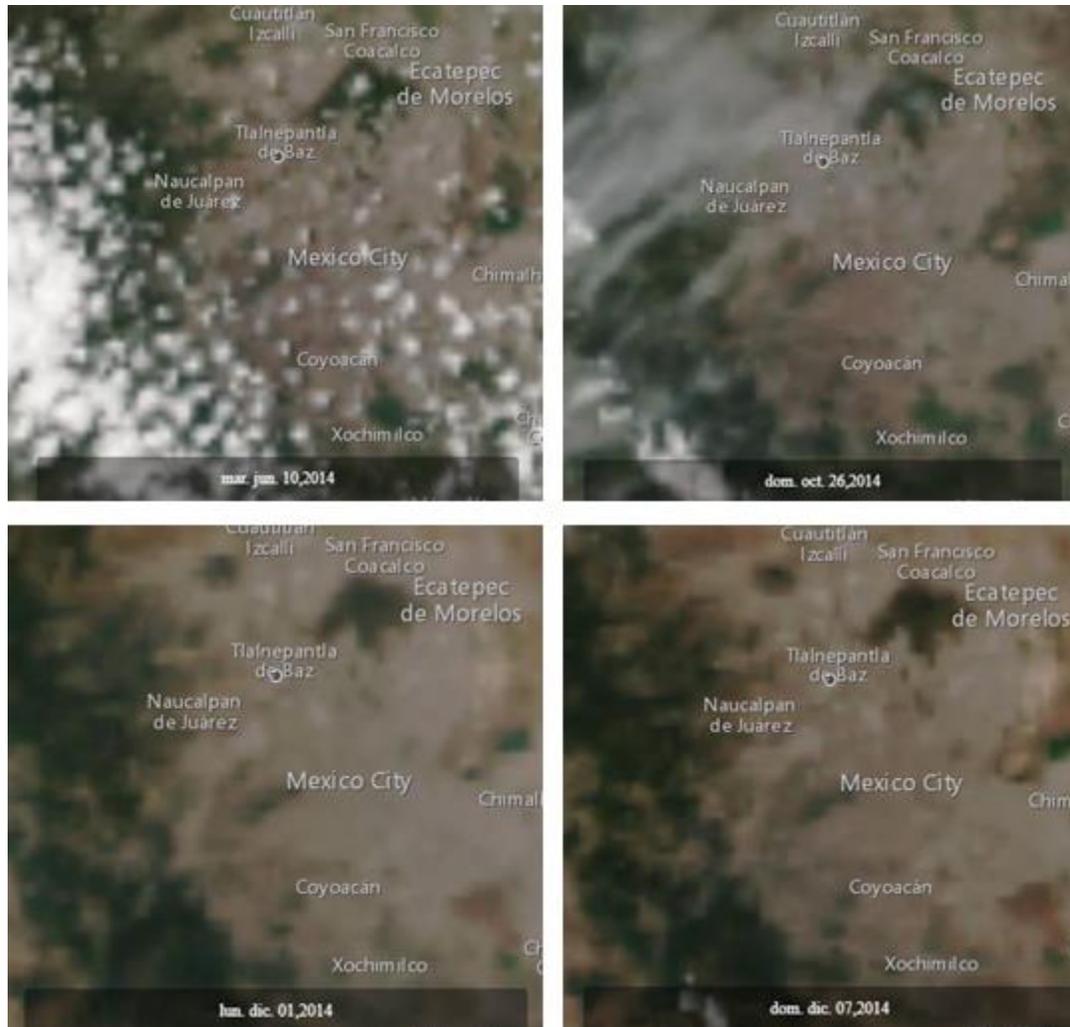


Fig. 49 Imágenes satelitales de las fechas: g) 10/06/14, h) 26/10/14, i) 01/12/14, j) 07/12/14. Fuente. NOAA, 2020

3.9.2 Relación entre el contenido de sulfato de partículas $PM_{2.5}$ y la atenuación solar

Para este conjunto de datos, los máximos diarios de UV-A se correlacionaron con el contenido de sulfato atmosférico derivado de la concentración de azufre en $PM_{2.5}$ medida por PIXE, ya que se sabe que el SO_4 dispersa la radiación de onda corta (Charlson y Wigley, 1994). La Tabla 16 condensa los parámetros necesarios para el analizar la correlación entre los valores máximos diarios de UV-A y la concentración de SO_4 en las $PM_{2.5}$. Se utilizaron los valores máximos de UV-A ya que es un parámetro más susceptible de presentar variaciones por la presencia de aerosoles.

Tabla 16 **Parámetros de análisis de la correlación UV-A y SO₄ particulado.** Constructo del Autor

Días Despejados	Masa PM _{2.5}	SO ₄ (µg/m ³)	Max UV-A (mW/cm ²)	Velocidad promedio del viento (m/s)
23/01/14	34.96	5.53	3.241	1.5 ^f
29/01/14	26.85	10.48	2.918	2.1
04/02/14	24.94	4.18	4.159	1.4
12/03/14	15.58	1.71	5.202	2.1
05/04/14	20.71	6.02	4.719	2.1
11/04/14	17.17	2.65	5.472	1.8
10/06/14	15.54	2.70	4.309	2.0
26/10/14	20.42	7.37	3.892	2.0
01/12/14	26.25	5.06	3.293	2.0
07/12/14	15.25	3.79	4.059	2.1 ^f

^f Valores de la estación FAC ubicada a 6.5 km SO de TLA

El límite máximo considerado para la velocidad promedio del viento fue de 2.1 m/s para incrementar la probabilidad de que se presentara acumulación de aerosoles y que estos interfirieran con la transmitancia de la luz UV, disminuyendo los valores máximos de radiación. Para los valores que velocidad del viento que no estuvieron disponibles en la estación TLA, se consideraron los valores de la estación más cercana, FAC, ubicada a 6.5 Km al noroeste de TLA.

Las concentraciones de SO₄ fueron calculadas a partir de la concentración de S medido por PIXE y aplicado el factor de 3.0 (Eldred et al., 1983; Stevens et al., 1978). Las concentraciones de sulfato de partículas se correlacionaron con los valores máximos diarios de UV-A (Fig. 50).

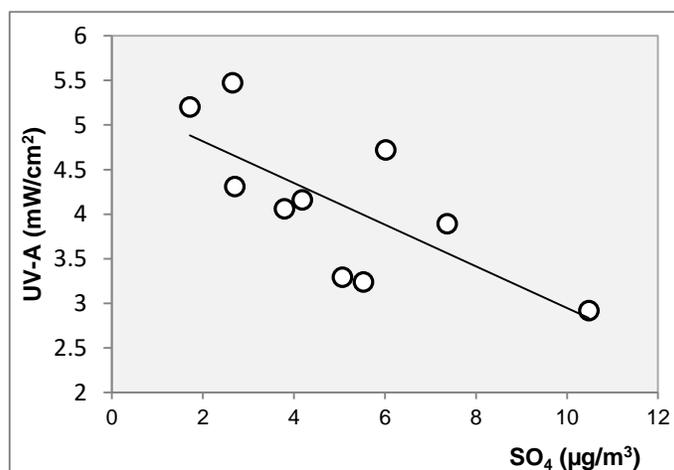


Fig. 50 **Correlación entre los valores máximos diarios de UV-A y la concentración de SO₄ particulado de muestras de 10 días de 2014 con cielos despejados y baja velocidad del viento.** Fuente: Constructo del autor

La correlación arrojó una relación inversa significativa (-0.72) que indica que las concentraciones más altas de sulfatos en $PM_{2.5}$ pueden asociarse con valores más bajos de UV-A debido a las propiedades de dispersión de los rayos UV en aerosoles de sulfato. El forzamiento radiativo de aerosoles de sulfato ha sido ampliamente demostrado (Charlson y Wigley, 1994; Haywood et al., 1997; Petters et al., 2003), pero no demostrado a detalle en la ZMMV.

3.9.3 Estimación de la atenuación solar

Para estimar la atenuación de UV-A que podría estar parcialmente relacionada con $PM_{2.5}$ en la estación TLA, que está cerca de varias fuentes de contaminación del aire, se comparó el perfil de radiación de TLA con el perfil de radiación del sitio de referencia MON, ubicado en un área semi-rural.

Para demostrar la validez del uso de MON como sitio de referencia, se compararon los perfiles horarios promedio de óxidos de nitrógeno (NO_x), que son marcadores de emisiones de combustión, para ambos sitios durante 17 días de cielo despejado y baja velocidad de viento en la estación seca-fría (noviembre de 2014–Febrero de 2015, Fig. 51). Esto debido a que no había un monitor de $PM_{2.5}$ instalado en MON en 2014.

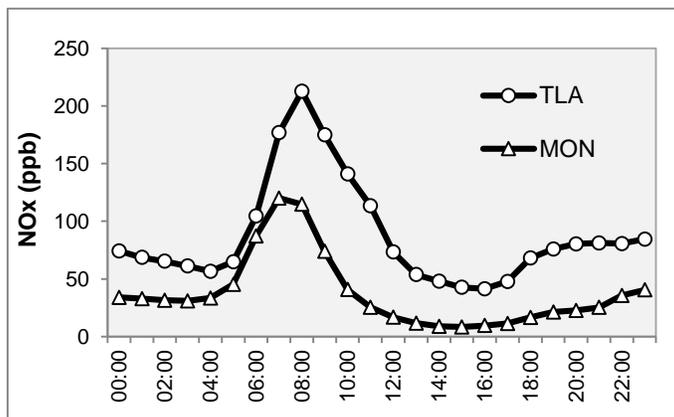


Fig. 51 **Perfiles horarios de NO_x de los sitios MON y TLA durante 17 días de la estación de seca-fría (noviembre de 2014 a febrero de 2015) con cielos despejado y baja velocidad del viento** Fuente. Constructo del Autor

Al comparar ambos perfiles, las concentraciones de NO_x del sitio de referencia, MON, son 60% más bajas que las concentraciones de NO_x en TLA, en promedio global. Lo cual pone de manifiesto que la atmósfera circundante al sitio de referencia MON tiene una menor cantidad de contaminantes del aire que pueden interactuar con la radiación UV, esto debido a que el sitio de referencia se encuentra en un área semi-rural más alejada a fuentes de emisión, en comparación con TLA.

Para analizar la atenuación UV-A, se utilizó un conjunto de datos de 17 días con valores bajos de velocidad de viento (<2.2 m/s) y cielos despejados en ambos sitios (Tabla 17). Los días seleccionados tenían que ser de la misma estación climática (noviembre de 2014 a febrero de 2015), ya que cada temporada tiene una cantidad diferente de radiación UV. La temporada seca se seleccionó porque las partículas se acumulan debido a las

inversiones térmicas, lo que favorece la atenuación solar. Además, las tasas más bajas de producción de ozono ocurren durante el invierno en comparación con la estación seca y caliente, un factor relevante a tener en cuenta ya que el ozono también interactúa con los rayos UV.

Tabla 17 **Días seleccionados para elaborar perfiles de radiación.**
Fuente Constructo del Autor

Fecha	Max UV-A MON	Max UV-A TLA	Velocidad del viento promedio
04/11/2014	5.293	3.914	2.06
05/11/2014	5.614	4.522	2.00
06/11/2014	5.351	3.961	1.96
22/11/2014	5.442	3.985	1.55
29/11/2014	4.696	3.035	1.23
01/12/2014	4.444	3.293	2.15
02/12/2014	4.823	3.708	2.08
03/12/2014	4.67	3.933	1.88
04/12/2014	4.455	3.054	1.34
18/12/2014	4.792	3.346	1.28
20/12/2014	4.356	3.241	1.53
26/12/2014	5.301	3.665	1.86
29/12/2014	4.715	3.24	1.06
26/01/2015	5.441	3.713	2.06
27/01/2015	5.563	3.92	2.12
04/02/2015	6.067	4.064	1.72
05/02/2015	5.796	4.199	2.10

A partir de los datos horarios de radiación de estos días se promediaron los 17 datos diarios para cada hora del día para obtener un dato promedio por hora para cada estación y con estos construir un perfil horario para cada estación como se muestra en la Fig. 52.

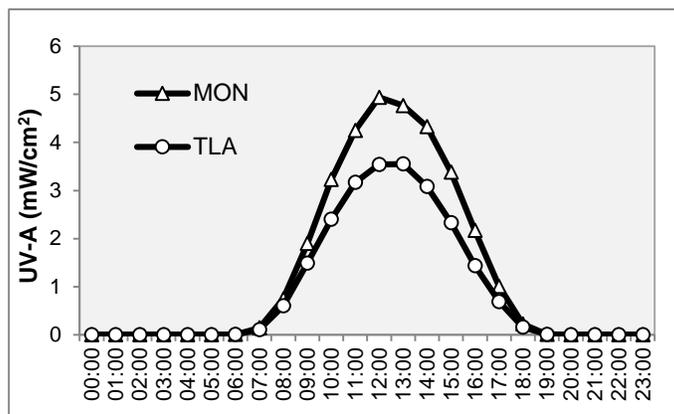


Fig. 52 Perfiles horarios UV-A de los sitios MON y TLA durante 17 días seleccionados en la temporada de sequía (Nov2014-Feb2015) con cielos despejado y bajo viento.

Fuente: Constructo del Autor

Como se esperaba, los valores de radiación UV-A de MON fueron más altos que TLA, lo que está asociado con una menor cantidad de contaminantes disponibles para interactuar con el UV-A (por ejemplo, dispersión, extinción, absorción). Al comparar el promedio de radiación UV-A por hora para ambos sitios de 07:00 a 18:00 h, los valores de radiación en TLA fueron **27%** más bajos que MON. Esta diferencia en la radiación UV-A entre sitios puede estar relacionada con diferencias en la calidad del aire en los sitios.

En el sitio de TLA, hay más fuentes de emisión en el área en comparación con MON. Sin embargo, no es posible atribuir esta atenuación exclusivamente a la presencia de aerosoles porque la cantidad de radiación UV se ve afectado por otros factores, como la formación de contaminantes secundarios a través de reacciones fotoquímicas o especies reactivas a los rayos UV en la atmósfera.

Jauregui y Luyando (1999) encontraron una atenuación de 21.6% en días despejados de 1995-1996 comparando valores de radiación del centro de las Ciudad de México contra un sitio de referencia en Texcoco. No es posible aseverar que al ser mayor la atenuación calculada en el presente estudio esto sugiera que en general la calidad del aire ha empeorado al cabo de 20 años. En 1995 el promedio anual de concentración másica de PM_{10} en TLA, ya que todavía no se monitoreaba $PM_{2.5}$, fue de $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en 2015, $52.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SIMAT, 2020). Pese a esta disminución en la concentración de partículas, la atenuación medida por Jauregui y Luyando (1999) fue menor debido a que el centro de la Ciudad de México no es ni fue una zona industrial tan densa como lo es Tlalnepantla, así mismo, no sólo las PM interactúan con la radiación UV sino también otras especies gaseosas como los Compuestos Orgánicos Volátiles y radicales libres, entre otras, cuyas concentraciones podrían ser mayores en la actualidad con respecto a 1995. Igualmente la actividad solar cambia de un año a otro.

3.9.4 Impacto de las $PM_{2.5}$ en la Temperatura local

Una vez comprobada y demostrada la hipótesis de que la presencia de $PM_{2.5}$ y particularmente, su contenido de sulfatos presenta una relación inversa (-0.72) con los valores máximos diarios de radiación UV-A, y que además fue posible estimar una atenuación (dimming) solar en el sitio de alrededor del 27% con respecto a un sitio de referencia, surge la inquietud de analizar si esta reducción en la radiación UV medida en la superficie tiene un efecto sobre los valores máximos de temperatura registrados en el sitio.

Se analizó la temperatura máxima diaria de 73 días de la temporada seca-fría (Noviembre 2013 a Febrero 2014) con velocidades de viento promedio menores a 2.5 m/s, para favorecer acumulación de partículas. Los valores máximos de temperatura se correlacionaron con los valores máximos diarios de concentración másica $PM_{2.5}$ (Fig. 54).

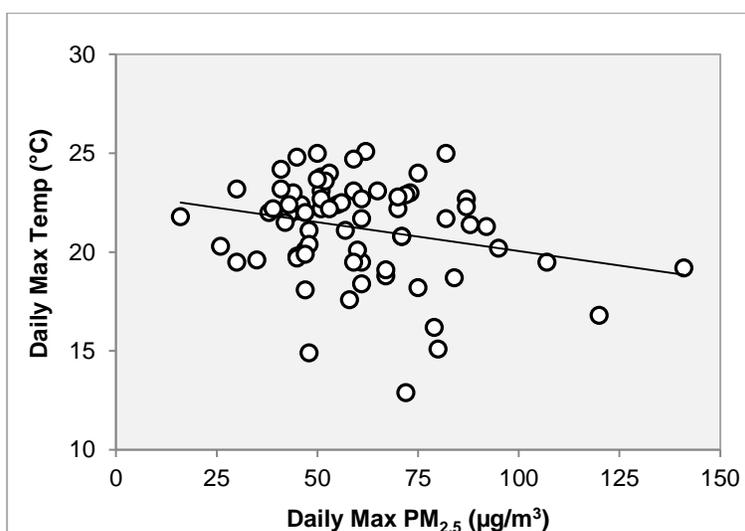


Fig. 53 **Correlación entre los máximos diarios de temperatura y los máximos de concentración másica de $PM_{2.5}$ durante 73 días de la temporada seca (Nov2013 to Feb2014)**

Fuente: Constructo del Autor

Se encontró un valor de correlación de -0.25 entre los valores máximos diarios de temperatura y las concentraciones de $PM_{2.5}$. Incluso si el valor de correlación inversa no es demasiado significativo, demuestra que en días con concentraciones más altas de $PM_{2.5}$, los valores máximos de temperatura local fueron menores con respecto a aquellos días con menor concentración de $PM_{2.5}$. Esta relación inversa es debido a la atenuación (dimming) solar causada por $PM_{2.5}$, entre otros contaminantes del aire, lo que disminuye la cantidad de radiación y, por lo tanto, afecta la temperatura. Huang, et al. (2006) demostraron por modelación una disminución promedio de -0.7 en las temperaturas diurnas sobre las partes industrializadas de China desde 1994-1995.

3.10 Utilidad y relevancia de los resultados obtenidos

Los resultados más representativos generados a partir del presente trabajo de investigación fueron lo suficientemente representativos como para generar un artículo científico con el título:

“Elemental composition, seasonal trends, emission sources and microclimate impacts of $PM_{2.5}$ in the northwest part of the Mexico City Metropolitan Area: A ten-year comparative field study”

El cual fue enviado a la revista indexada “*Atmospheric Pollution Research*”. Se anexa el manuscrito enviado a la revista así como el oficio de recepción por parte de la misma.



CAPÍTULO 4

Conclusiones

El análisis PIXE permitió determinar las concentraciones elementales de 13 elementos (S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb) detectados consistentemente. El elemento más abundante en las PM_{2.5} fue azufre seguido de hierro, potasio calcio y zinc. A partir del comparativo longitudinal con un estudio previo (Ruiz, 2009) se observó que las concentraciones elementales de la mayoría de los elementos analizados fueron mayores durante el primer período de análisis (noviembre de 2004 a marzo de 2006) a excepción del Ca, Ti y Fe. Las concentraciones de Ca, Ti y Fe fueron más altas en el segundo período porque una mayor cantidad de actividades relacionadas con la construcción ocurrieron en 2014-2015.

El análisis de las tendencias estacionales mostró que la estación seca-fría tuvo las concentraciones elementales más altas debido a la pobre dispersión de contaminantes causada por las inversiones térmicas. También se demostró que durante la temporada de lluvias aunque hay una disminución en la concentración de aerosoles causada por la precipitación de la lluvia, la reducción en la concentración de metales no es tan evidente, lo que sugiere que los metales no son precipitados y lavados por la lluvia en una gran proporción porque la mayoría de ellos están en la fracción más fina y permanecen en la atmósfera a pesar de la precipitación.

El cálculo de los factores de enriquecimiento permitió clasificar los elementos en dos fuentes principales: origen natural (K, Ca, Ti, Cr, Mn y Fe), relacionado con la corteza terrestre, y origen antropogénico (Cl, V, Ni, Cu, Zn, Pb y S). Los FE fueron mayores en el primer periodo de análisis (2004-2006) con respecto a 2014-2015.

Con el fin de mejorar la identificación de las fuentes, la matriz de correlación se utilizó para separar cinco grupos de elementos y asociarlos con estudios previos y perfiles de referencia de la base de datos SPECIATE Versión 4.5 US-EPA: Combustión de combustible fósil, incineración de residuos municipales y peligrosos, polvo de construcción, polvo de vías pavimentadas y resuspensión de suelo industrial, fueron las fuentes identificadas en el sitio.

Se demostró la hipótesis planteada en este estudio referente a que la presencia y concentración elemental de los aerosoles ocasionó un impacto en el microclima al interferir en la transmitancia de la radiación UV. Una correlación de -0.72 entre los valores de UV-A y las concentraciones de sulfato de partículas, indicó que altas concentraciones de sulfatos en PM_{2.5} están correlacionadas de manera inversa con valores bajos de UV-A debido a las propiedades de dispersión de radiación UV en aerosoles de sulfato.

Se observó una atenuación solar del 27% al comparar el perfil UV-A en el sitio TLA con el perfil UV-A en el sitio de referencia (MON), esto indica que la contaminación del aire tiene un impacto en la cantidad de radiación UV-A medida en la superficie en cada sitio ya que los contaminantes interactúan con la radiación mediante dispersión, extinción, absorción, formación de contaminantes secundarios, reacciones con radicales libres, entre otras formas.

Así mismo, aunque no con un valor tan significativo de correlación inversa (-0.25) sí fue posible observar que en los días con concentraciones más altas de PM_{2.5} los valores máximos de temperatura local fueron menores con respecto a aquellos días con menor concentración de PM_{2.5}. Esta relación inversa es debido a la atenuación (dimming) solar causada por PM_{2.5}, entre otros contaminantes del aire, que disminuyen la cantidad de radiación y, por lo tanto, afectan la temperatura.

Sin embargo, dado que los valores de concentración de masa de PM_{2.5}, así como las concentraciones de la mayoría de los elementos, mostraron una tendencia decreciente durante el lapso de diez años, se observó una mejora general de la calidad del aire. Este cambio puede atribuirse como resultado de varias estrategias de mitigación implementadas por el gobierno de la Ciudad de México, como restricciones de circulación vehicular, mejoras en el transporte público, estrictas regulaciones de calidad del aire, entre otras.

Los resultados generados a partir del presente estudio representan una aportación de conocimiento nuevo al analizar la evolución de la contaminación por PM_{2.5} en Tlalnepantla, una zona altamente afectada al noroeste del AMCM, a lo largo de 10 años. Asimismo, no se había analizado el impacto de las PM_{2.5} en el microclima, logrando demostrar la atenuación o dimming de la radiación UV-A a causa de la composición de las PM_{2.5}.

REFERENCIAS

1. Aldape, F., Flores M., J., R. V. Diaz, J. R. Morales, T. A. Cahill and I. Saravia. (1991) 'Seasonal study of the composition of atmospheric aerosols in Mexico City', *International Journal of PIXE*, 01(04), pp. 355–371. doi: 10.1142/s012908359100024x.
2. Aldape, F., Flores M., J., R. V. Diaz, J. Miranda, T. A. Cahill and J. R. Morales., (1991) 'Two year study of elemental composition of atmospheric aerosols in Mexico City', *International Journal of PIXE*, 01(04), pp. 373–388. doi: 10.1142/s0129083591000251.
3. Aldape, F., Flores, M. J., Díaz, R. V., & Crumpton, D. (1996). Upgrading of the PIXE system at ININ (Mexico) and report on elemental composition of atmospheric aerosols from 1990 in the ZMCM. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 109–110, 459–464. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00951-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00951-5)
4. Aldape, F., Flores, M. J., García, R. G., & Nelson, J. W. (1996). PIXE analysis of atmospheric aerosols from a simultaneous three site sampling during the autumn of 1993 in Mexico City. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 109–110, 502–505. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00959-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00959-0)
5. Aldape, F., & FLORES M, J. (2004). Source apportionment of fine airborne particulate matter collected in the Mexico city metropolitan area. *International Journal of Pixe*, 14(03n04), 147–160.
6. Aldape, F., Flores M, J., Flores A, J., Retama-Hernández, A., and Rivera-Hernández, O., (2005). Elemental Composition and Source Identification of PM_{2.5} Particles Collected in Downtown Mexico City. *International Journal of PIXE*. 15(03n04), 263–270.
7. Aldape, F. y Flores, J. (2010). Veinticinco años de estudio de la contaminación atmosférica mediante microanálisis de Rayos X inducidos por partícula (PIXE). En Jiménez, F. (Ed.), *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México* (231 -255). CDMX, México: ININ
8. Aldape, F., J. Flores M, J. Flores A, A. Retama-Hernández and O. Rivera-Hernández. (2012) 'Sulfate aerosol levels derived from sulfure content determined by PIXE in atmospheric particles collected in Mexico City Metropolitan Area', *International Journal of PIXE*, 22, pp. 217-223
9. BGI (2007) Air sampler instruction manual. [version electronica]. Disponible en <http://www.bgjusa.com>. Consultado en Junio 2018
10. Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M. y Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México
11. Brimblecombe, P. (2011). Air Pollution Episodes. *Encyclopedia of Environmental Health*, 39–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00058-1>
12. Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E., & Hofmann, D. J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. In *Science (New York, N.Y.)* (Vol. 255, Issue 5043, pp. 423–430). <https://doi.org/10.1126/science.255.5043.423>
13. Charlson, R. J., and Wigley, T. M., 1994. Sulfate aerosol and climatic change. *Scientific American*. 270(2), 48-57. <https://www.jstor.org/stable/24942590>

14. Cheng, Z., Luo, L., Wang, S., Wang, Y., Sharma, S., Shimadera, H., Wang, X., Bressi, M., de Miranda, R. M., Jiang, J., Zhou, W., Fajardo, O., Yan, N., & Hao, J. (2016). Status and characteristics of ambient PM_{2.5} pollution in global megacities. *Environment International*, 89–90, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.003>
15. Chow, J. C., Watson, J. G., Edgerton, S. A., and Vega, E. (2002). Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997, *Sci. Total Environ.*, 287(3), 177–201, 2002
16. Collins, W. D., Rasch, P. J., Eaton, B. E., Khattatov, B. V, & Zender, S. (2001). *Methodology for INDOEX. 106*, 7313–7336.
17. Dillner, A. M., Shafer, M. M., Schauer, J., Method, A. N., (2007). *A Novel Method Using Polyurethane Foam (PUF) Substrates to Determine Trace Element Concentrations in Size-Segregated Atmospheric Particulate Matter on Short Time Scales A Novel Method Using Polyurethane Foam (PUF) Substrates to Determine Trace Element Concentrations in Size-Segregated Atmospheric Particulate Matter on Short Time Scales.* 6826. <https://doi.org/10.1080/02786820601113282>
18. Droprinchinski, P., (2017). Aerosol size distribution and health effects: biomass burning versus urban aerosol, in P. Kumar (Ed.), *Airborne Particles: Origin, Emissions and Health Impacts*. Nova Scien. Inc, New York, pp 37-53.
19. Eatough, D. J., Richter, B. E., Eatough, N. L., & Hansen, L. D. (1981). Sulfur chemistry in smelter and power plant plumes in the western U.S. *Atmospheric Environment (1967)*, 15(10–11), 2241–2253. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(81\)90256-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(81)90256-0)
20. Eldred, R. A., Ashbaugh, L. L., Cahill, T. A., Flocchini, R. G., & Pitchford, M. L. (1983). Sulfate levels in the southwest during the 1980 copper smelter strike. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 33(2), 110-113.
21. Flores, J., Aldape, F., Flores-Aldape, J., Perez-Alvarez, M., Retama-Hernández, A., Rivera-Hernández, O., and Bogdanović-Radović, I., 2017. Comparison of sulfate content derived from sulfur in PM_{2.5} particles by PIXE and a MARGA monitor and inter-comparison of PIXE results in two laboratories. *Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators 2017: The Expanding Universe of Accelerator Applications*, July 31 July - August 4, 2017, Quebec, Canada, pp. 155–163.
22. Furger, M., Minguillón, M. C., Yadav, V., Slowik, J. G., Hüglin, C., & Fröhlich, R. (2017). *Elemental composition of ambient aerosols measured with high temporal resolution using an online XRF spectrometer.* 2061–2076.
23. Gedke, D. A. (1972). The Si(Li) X-Ray energy analysis system: Operating principle and performance. *X-ray Spectrometry*, 1 (4), pp. 129-141
24. González, M. C., Cerezo, A., González, M. del C., & Salazar, L. (1999). Comportamiento de las partículas suspendidas y polen en la atmósfera de la región norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43(5), 155–164. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47543503>
25. Haywood, J. M., Roberts, D. L., Slingo, A., Edwards, J. M., and Shine, K. P., (1997). General circulation model calculations of the direct radiative forcing by anthropogenic sulfate and fossil-fuel soot aerosol. *Journal of Climate*. 10(7), 1562–1577

26. Huang, Y., Dickinson, R. E., & Chameides, W. L. (2006). Impact of aerosol indirect effect on surface temperature over East Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(12), 4371–4376. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504428103>
27. IMAAC (Instituto Mexicano del Aerosol A.C.), 2020. <https://imaacmexico.org/aerosoln1/#>, (accesado en Agosto 2020)
28. INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2020. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf>, (accesado en Enero 2020)
29. Jauregui, E. (1973). The urban climate of Mexico City. *Erdkunde*, 298–307.
30. Jáuregui, E., & Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *International Journal of Climatology*, 19(6), 683–694. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199905\)19:6<683::AID-JOC389>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199905)19:6<683::AID-JOC389>3.0.CO;2-8)
31. Jiang, N., Dong, Z., Xu, Y., Yu, F., Yin, S., Zhang, R., & Tang, X., (2018). Characterization of PM10 and PM2.5 source profiles of fugitive dust in Zhengzhou, China. *Aerosol and Air Quality Research*. 18(2), 314–329
32. Johansson, S. A. E., & Johansson, T. B. (1976). Analytical application of particle induced X-ray emission. *Nuclear Instruments and Methods*, 137(3), 473–516. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(76\)90470-5](https://doi.org/10.1016/0029-554X(76)90470-5)
33. Johansson, I. (1995) Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry. John Wiley & Sons. Canada
34. Johnson, K. S., De Foy, B., Zuberi, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Xie, Y., Laskin, A., & Shutthanandan, V. (2006). Aerosol composition and source apportionment in the Mexico City Metropolitan Area with PIXE/PESA/STIM and multivariate analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12), 4591–4600. <https://doi.org/10.5194/acp-6-4591-2006>
35. Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). in the Climate System. *Group*, 419 (September), 215–223.
36. Kavuri, N. C. (2014). *Chemical Characterization of Ambient PM 10 Aerosol in a Steel City , Rourkela , India*. 2(February), 31–38.
37. Khoder, M. I. (2002). Atmospheric conversion of sulfur dioxide to particulate sulfate and nitrogen dioxide to particulate nitrate and gaseous nitric acid in an urban area. *Chemosphere*, 49(6), 675–684. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00391-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00391-0)
38. Kumar (2017), Airborne Particles: Origin, Emissions and Health Impacts. Nova Scien. Inc, New York
39. Kuzmichev, A. A., & Loboyko, V. F. (2016). Impact of the polluted air on the appearance of buildings and architectural monuments in the area of town planning. *Procedia engineering*, 150, 2095-2101
40. Lawson, D. R., & Winchester, J. W. (1979). A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment (1967)*, 13(7), 925–930. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(79\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(79)90003-9)
41. Lide, D. R. (Ed.). (2004). CRC handbook of chemistry and physics (Vol. 85). CRC press.

42. Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2).
43. Matter, I. A. P., & X-RAY, U. P. I. (1999). Determination of metals in ambient particulate matter using proton induced x-ray emission (PIXE) spectroscopy.
44. Matsumoto, Y., Valdés, M., Urbano, J. A., Kobayashi, T., López, G., & Peña, R. (2014). Global solar irradiation in north Mexico city and some comparisons with the south. *Energy Procedia*, 57, 1179–1188. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.105>
45. Moffet, R. C., Desyaterik, Y., Hopkins, R. J., Tivanski, A. V., Gilles, M. K., Wang, Y., ... and Mugica, V., (2008). Characterization of aerosols containing Zn, Pb, and Cl from an industrial region of Mexico City. *Environmental Science & Technology*. 42(19), 7091-7097
46. Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2014). Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980. *Geophysical Research Letters*, 41(15), 5605–5611. <https://doi.org/10.1002/2014GL060798>
47. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2020. <https://www.nesdis.noaa.gov/content/imagery-and-data>, (accesado en Enero, 2020)
48. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación, con la finalidad de proteger la salud de la población. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 20 de agosto de 2014.
49. Norris, G., Duvall, R., Brown, S., and Bai, S., (2014). EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide prepared for the US Environmental Protection Agency office of research and development. Inc., Petaluma, Washington, DC.
50. Patadia, F., Kahn, R. A., Limbacher, J. A., Burton, S. P., Ferrare, R. A., Hostetler, C. A., & Hair, J. W. (2013). Aerosol airmass type mapping over the Urban Mexico City region from space-based multi-angle imaging. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(18), 9525–9541. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9525-2013>
51. Partisol (2000) Especificaciones técnicas [versión electrónica]. Disponible en: <http://medioambiente.exteco.com/29/frames/partisol2000.pdf>
52. Petters, J. L., Saxena, V. K., Slusser, J. R., Wenny, B. N., and Madronich, S., (2003). Aerosol single scattering albedo retrieved from measurements of surface UV irradiance and a radiative transfer model. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 108(9), 1–7
53. Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520-7540.
54. RAE (Real Academia Española), 2020, <https://dle.rae.es/microclima>, (accesado en Enero, 2020)
55. Rahn, K. A. (1976). Silicon and aluminum in atmospheric aerosols: crust-air fractionation? *Atmospheric Environment (1967)*, 10(8), 597–601.
56. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). *Aerosols: A Major*.

294(December), 2119–2125.

57. Ramanathan, V. (2007). Global Dimming by Air Pollution and Global Warming by Greenhouse Gases: Global and Regional Perspectives. In C. D. O'Dowd & P. E. Wagner (Eds.), *Nucleation and Atmospheric Aerosols* (pp. 473–483). Springer Netherlands.
58. Retama, A., Neria-Hernández, A., Jaimes-Palomera, M., Rivera-Hernández, O., Sánchez-Rodríguez, M., López-Medina, A., and Velasco, E., (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico city. *Atmospheric Environment: X*, 2(September 2018). <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100013>
59. Ruiz, C. (2009) 'Estudio Comparativo de la Contaminación por partículas finas entre las ciudades Toluca y Tlalnepantla, Estado de México'. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México
60. Saiz, S. (2015). Efecto de las cubiertas ajardinadas sobre el microclima urbano de verano. (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
61. Salcedo, D., Onasch, T. B., Dzepina, K., Canagaratna, M. R., Zhang, Q., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Jayne, J. T., Mortimer, P., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Johnson, K. S., Zuberi, B., Marr, L. C., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Cardenas, B., Bernabé, R. M., ... Jimenez, J. L. (2006). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: Results from the CENICA Supersite. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(4), 925–946. <https://doi.org/10.5194/acp-6-925-2006>
62. SEDUE. (1987). Políticas y estrategias de abatimiento y control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Metepec, Puebla, México.
63. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2012). 25 años de Monitoreo Atmosférico 1986-2011. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México.
64. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2015). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2014*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.
65. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2016). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico
66. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2016). Inventario de Emisiones de la CDMX 2014. Contaminantes Criterio, Tóxicos y de Efecto Invernadero. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México
67. SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México), 2020. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>, (accesado en Noviembre 2019).
68. Stevens, R. K., Dzubay, T. G., Russwurm, G., & Rickel, D. (1978). Sampling and analysis of atmospheric sulfates and related species. In *Sulfur in the Atmosphere* (pp. 55-68).

69. Suarez, A. E., and Ondov, J. M., (2002). Ambient aerosol concentrations of elements resolved by size and by source: contributions of some cytokine-active metals from coal-and oil-fired power plants. *Energy & Fuels*, 16(3), 562–568.
70. Tai, A. P. K., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976–3984. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>
71. Tumini, Irina (2013). El microclima urbano en los espacios abiertos: estudio de casos en Madrid. Tesis (Doctoral), E.T.S. Arquitectura
72. Vega, E., Mugica, V., Reyes, E., Sanchez, G., Chow, J. C., & Watson, J. G., (2001). Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 35(23), 4033–4039.
73. Vega, E., Ruiz, H., Escalona, S., Cervantes, A., Lopez-Veneroni, D., Gonzalez-Avalos, E., & Sanchez-Reyna, G. (2011). Chemical composition of fine particles in Mexico City during 2003-2004. *Atmospheric Pollution Research*, 2(4), 477–483. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.054>
74. WHO (World Health Organization),. (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. World Health Organization.
75. Widziewicz, K., Loska, K., & Rogula-Kozłowska, W. (2015). Metals distribution on the surface of quartz fiber filters used for particulate matter collection. *Archives of Environmental Protection*, 41(4), 3–10. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0036>
76. Zerefos, C. S., Eleftheratos, K., Meleti, C., Kazadzis, S., Romanou, A., Ichoku, C., Tselioudis, G., and Bais, A., (2009). Solar dimming and brightening over Thessaloniki, Greece, and Beijing, China. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 61(4), 657–665



ANEXOS