

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO**

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE NITRATOS Y
SULFATOS EN MUESTRAS DE PM10 EN LA ZONA NORTE DE
LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA.”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

RODRÍGUEZ BALDERRAMA ANA MARÍA

HERMOSILLO, SONORA.

ENERO, 2023.

(Carta de aprobación del Comité de Tesis)

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO

PROGRAMA EDUCATIVO

T E S I S

**ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE NITRATOS Y SULFATOS EN
MUESTRAS DE PM10 EN LA ZONA NORTE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO,
SONORA.**

COMITÉ REVISOR

Director

Co-director

Roberto Ramírez Leal

Martín Eusebio Cruz Campa.

Secretario

Vocal

Jose Andrés Alvarado Castro.

Nombre completo

Hermosillo, Sonora.

Enero,2023.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Estatal de Sonora (UES) por el apoyo brindado durante la realización de mis estudios, por prestar las instalaciones de los diversos laboratorios para la realización de la investigación, así como al personal que en él labora.

Al director de tesis Dr. Roberto Ramírez Leal por su apoyo durante todo el trayecto y su disponibilidad para brindar su conocimiento, así como al resto del comité Dr. Martín Cruz Campa y Dr. José Andrés Alvarado Castro.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi mamá que siempre me ha impulsado, a crecer y superar mis metas, todos mis logros para ti.

CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
JUSTIFICACIÓN	13
HIPÓTESIS	14
MARCO TEÓRICO	15
Título Segundo Orden	17
<i>Título tercer orden</i>	21
OJETIVOS	23
Objetivos General	23
Objetivos Específicos	23
METODOLOGÍA	24
Título Segundo Orden	26
<i>Título tercer orden</i>	27
RESULTADOS	29
Título Segundo Orden	31
<i>Título tercer orden</i>	33
DISCUSIONES	37
Título Segundo Orden	37
<i>Título tercer orden</i>	38
CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES	40
LITERATURA CITADA	41
ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Mapa de la ciudad de Hermosillo, (punto localizado en la zona de muestreo donde muestreamos la concentración de PM10)	24
Figura 2 Aumento de la población de la ciudad de Hermosillo, Sonora.	26
Figura 3 Muestreador de Alto Volumen (Hi-Vol).	27
Figura 4 Espectrofotómetro de luz	29
Figura 5 Representación del resultado de la Prueba de normalidad de datos para la concentración de PM10 totales durante los cuatro trimestres del 2021	31
Figura 6 Representación del resultado de la Prueba de normalidad de datos para la concentración de nitratos en las PM10 durante los cuatro trimestres del 2021	31
Figura 7 Representación del resultado de la Prueba de normalidad de para la concentración de sulfatos en las PM10 durante los cuatro trimestres del 2021	32
Figura 8 .- Promedios trimestrales de concentraciones PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.	33
Figura 9 Relación entre las concentraciones de PM10 y la velocidad del viento registrados durante el año 2021.	35
Figura 10- Relación entre las concentraciones de PM10 totales y las temperaturas promedio registradas durante el año 2021.	36
Figura 11 Relación entre las concentraciones de PM10 totales y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021).	37
Figura 12 Promedios trimestrales de concentración de nitratos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en partículas PM10 durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora	37

Figura 13	Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en partículas PM10 y la velocidad del viento registrados durante el año 2021	39
Figura 14	Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en Partículas PM10 y las temperaturas promedio registradas durante el año 2021.	39
Figura 15	Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en Partículas PM10 y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021.	40
Figura 16	Promedios trimestrales de concentración de sulfatos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en partículas PM10 durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.	41
Figura 17	Figura 17- Relación entre las concentraciones de sulfatos Presentes en partículas PM10 y la velocidad del viento registrados Durante el año 2021.	42
Figura 19.-	Relación entre las concentraciones de sulfatos presentes en Partículas PM10 y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021.	44

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Máximos, mínimos y número de veces fuera del límite permisible.	32
Tabla 2 Resumen de Análisis de Varianza de las concentraciones promedio de PM10 registradas para los cuatro trimestres del año 2021.	33
Tabla 3 Resumen de la comparación Múltiple de Medias de Tukey de los promedios de PM10 obtenidos para los cuatro trimestres del año 2021	34
Tabla 4 Valores máximos y mínimos de PM10 registrados en los cuatro trimestres del año 2021.	34
Tabla 5 Resumen de Análisis de Varianza de las concentraciones promedio de nitratos presentes en partículas PM10 registradas para los cuatro trimestres del año 2021.	38
Tabla 6 Resumen de la comparación Múltiple de Medias de Tukey de las concentraciones promedio de nitratos presentes en partículas PM10 obtenidas para los cuatro trimestres del año 2021.	38
Tabla 7 Valores máximos y mínimos de PM10 registrados en los cuatro trimestres del año 2021.	

RESUMEN

El estudio estuvo enfocado en los compuestos secundarios Sulfatos (SO_4) y Nitratos (NO_3) derivados del Azufre y Nitrógeno respectivamente en la ciudad de Hermosillo, Sonora durante el periodo del 21-22, a través de muestras de PM_{10} en filtros de fibra de cuarzo obtenidos en los muestreadores de Alto volumen que el H. Municipio de Hermosillo tiene ubicado en las zona Norte en las instalaciones de la UES (cuyas características de este lugar es que presenta vialidades importantes y estar ubicado en una zona alta de la ciudad, en base a la NOM-025-SSA1-2021.

Se analizaron los compuestos de Sulfatos y Nitratos debido a sus efectos nocivos a las vías respiratorias, a la vegetación y atmósfera; en donde la urbanización que presenta la ciudad de Hermosillo, como el aumento vehicular, así como el de transporte público, privado y su actividad industrial, han provocado un incremento en las emisiones de estos contaminantes.

De acuerdo a la información obtenida en los análisis se observó que la máxima concentración de PM_{10} ocurrió en los meses de Abril Junio 2022 presentando un valor de $86.5904 \mu\text{g}/\text{m}^3$; para Nitratos su valor máximo se encontró en el mes de Agosto 2021 y con un valor de 38.7442 , mientras que para los Sulfatos las concentraciones más altas se presentaron durante el mes de Septiembre 2021 con un valor de $47.7007 \mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que las concentraciones más bajas fueron el mes de Febrero 2021 para los Nitratos con un valor de $1.7611 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y con $2.7283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los Sulfatos durante Mayo 2021.

Palabras clave: *Sulfatos, Nitratos, Material Particulado.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es una amenaza aguda, acumulativa y crónica para la salud humana y el ambiente (OMS, 2018). El crecimiento urbanístico y poblacional, sumado a las diferentes actividades económicas e industriales, produce emisiones contaminantes del aire, como dióxido de nitrógeno (NO₂) , dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y de material suspendido, siendo este último uno de los de mayor interés debido a las concentraciones promedio diarias y anuales registradas en diferentes ciudades del mundo (Fajersztajn, et al. 2017).

El material suspendido se define como la combinación de partículas líquidas y/o sólidas presentes en suspensión en la atmósfera, varían en tamaño, forma, área superficial, composición química, solubilidad y origen (Pope III y Hockey 2006); y presenta componentes químicos de sulfato, nitrato, amonio, carbono elemental, químicos orgánicos, metales, etc. (Ha, H. Zhang, S.-H, 2013); por lo que es un contaminante de gran preocupación ambiental debido a su estrecha correlación con las condiciones de salud de las personas (Ostro et al.,2015) y el clima de la tierra (Ahmed, K.-H. Kim, Z.-H, 2013).

La concentración de material suspendido varía considerablemente con el tiempo, la ubicación y dependiendo de las condiciones meteorológicas y la tasa de emisión de la fuente (Beer, 2001; Elminir, 2005); y de las variables meteorológicas como el viento, la lluvia y la inestabilidad del aire, que en conjunto interactúan sobre la calidad del aire.

Las acciones que dan origen a la contaminación por partículas son diversas y abarcan desde las naturales, como polvo volcánico y tolveneras, hasta de origen antropogénico, que incluyen fábricas, plantas de generación de energía, cementeras, fundidoras, obras de construcción y demolición, hornos, chimeneas que utilizan madera como combustibles y motores diésel.

Las partículas también se forman a través de reacciones químicas atmosféricas y se les conoce como partículas secundarias, son el resultado de reacciones químicas a partir de la existencia de materiales gaseosos, llamados precursores.

Algunos de los principales gases precursores son los: óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre (SO₂), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoníaco (NH₃). (European Commission, 2004).

Las partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10µm se conocen como partículas de fracción inhalable o PM₁₀, son nocivas para la salud de las personas, esto por la facilidad que tienen de introducirse en el sistema respiratorio, y las cuales pueden estar formadas por aerosoles, nitratos, sulfatos, polvos, metales, productos de combustión, o bien microorganismos como protozoarios, bacterias, virus, hongos y polen que pueden causar diferentes tipos de enfermedades. Cuando las partículas son inhaladas no siempre son expulsadas por los sistemas de defensa del organismo, y pueden ocasionar problemas en el sistema respiratorio (Gómez, 2021).

Una evaluación realizada por una dependencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS) concluyó que la contaminación del aire exterior y el Material Suspendido están considerados como causas de cáncer, especialmente de pulmón (IARC, 2013). Otros estudios reportan que la exposición a las partículas puede ser un factor de riesgo para contraer diabetes mellitus tipo 2 (Balti et al., 2014).

Los sulfatos, nitratos y compuestos de carbono son los constituyentes principales de la contaminación por partículas finas; los cuales se forman a partir de la transformación atmosférica de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno (EPA, 2013).

La contaminación del aire por los compuestos de nitratos y sulfatos es una seria amenaza a la salud humana y al ambiente; debido a sus efectos en las vías respiratorias y en el desarrollo y funciones de la vegetación al impedirles el paso de la luz para la realización de la fotosíntesis (Ramírez L. 1986) como a las propiedades de la atmósfera al afectar su composición.

En la república mexicana los análisis sobre las partículas suspendidas se han realizado en zonas urbanas con gran densidad de población. Por ejemplo: Guadalajara, Ciudad de México y Monterrey. (Magaña, Carrera y Ramos, 2013), No obstante, en las zonas provinciales del País, existe menor información (Guzmán et al., 2017).

En la ciudad de Hermosillo, Sonora en 1989 se inició la medición de calidad del aire con una red manual constituida por tres estaciones con el fin de muestrear las partículas suspendidas totales (PST). El municipio se constituye como el principal emisor de contaminantes atmosféricos en el Estado de Sonora, con el 19% de amoniaco (NH_3); 25% de compuestos orgánicos volátiles ; 26% de óxidos de nitrógeno; 27% de monóxido de carbono ; 18% y 12% de partículas suspendidas, respectivamente (Pro Aire, 2017-2026).

Los datos de la calidad del aire son indispensables tanto para evaluar las asociaciones de los efectos en la salud como del impacto potencial en la población con el apoyo en la evidencia epidemiológica (Pro Aire, 2017-2026).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La exposición al material suspendido es el factor primordial de riesgo ambiental que causa más muertes en el mundo. Fue responsable de 4.2 millones de muertes por cardiopatías y neumopatías en el 2015, (Health Effects Institute, 2017).

El 92 % de la población mundial vive en zonas donde los niveles de calidad del aire exceden los límites máximos permitidos fijados por la Organización Mundial de la Salud.

“De 10 personas solo una persona respira un aire que está en los límites establecidos por la OMS los nueve restantes respiran aire que es perjudicial para su salud” (Pautas de calidad del aire (World Health Organization, 2006).

Desde el punto de vista de la contaminación global, el material suspendido atmosférico afecta directamente al clima del planeta a través de la dispersión y absorción de la radiación solar e indirectamente, actuando como núcleo de condensación en los procesos de formación de nubes (Ramanathan, 2007).

El aire que se respira en las principales ciudades mexicanas se encuentra contaminado por varios compuestos atmosféricos, que son generados tanto por procesos naturales como por actividades humanas (Gauderman et al., 2004).

En la ciudad de Hermosillo, Sonora, la cual cuenta con 784 342 habitantes, se reportaron que los principales aportes de partículas se derivan del tráfico vehicular, las calles sin pavimentar y los terrenos baldíos (Cruz et al., 2013).

Por lo que, debido a las altas concentraciones de polvo en la ciudad a causa del crecimiento urbano, del incremento del tráfico vehicular, tanto privado como público y la pérdida de vegetación en estos últimos años, es de gran importancia el evaluar las concentraciones de las PM10 y de los nitratos y los sulfatos, presentes en ellos, a través

de un monitoreo atmosférico para medir y analizar las concentraciones de los mismos y conocer su situación actual.

El presente trabajo consiste en el análisis de las concentraciones de nitratos y sulfatos en muestras de PM10 en la zona norte de Hermosillo, Sonora, con lo que se aporte nuevo conocimiento científico e información relevante para los tomadores de decisión en materia ambiental y de protección de la salud de la población.

JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire por los compuestos de nitratos y sulfatos es una seria amenaza a la salud humana y al ambiente; debido a sus efectos en las vías respiratorias, materiales, vegetación y propiedades de la atmósfera; en donde la urbanización que presenta la ciudad de Hermosillo, el aumento en el número de vehículos, de transporte público y privado, la producción de energía y por la actividad industrial, han dado como resultado un incremento en las emisiones de estos contaminantes. Por lo que es necesario la evaluación de los nitratos y sulfatos a través de un monitoreo atmosférico, para medir, analizar y procesar continuamente las concentraciones de los mismos en un lugar y tiempo determinados.

Que, mediante lo anterior, se pueda determinar si la calidad del aire de la ciudad es satisfactoria, o en caso contrario, sería el establecer programas de control y prevención de la contaminación del aire en las zonas de estudio.

En comparación con otras ciudades de la República Mexicana, como por ejemplo el área metropolitana de Monterrey, Guadalajara y el valle de México en donde su calidad del aire se está monitoreando de forma continua, y existen aplicaciones donde en el momento podemos observar las concentraciones de PM₁₀, en Hermosillo se carece de un trabajo constante de monitoreo atmosférico; por lo que es necesario el obtener resultados que nos permitan comparar con los valores establecidos en las normas oficiales y así poder conocer las características de nuestra calidad del aire de la ciudad.

De igual manera debido a la ausencia de normas referentes a nitratos y sulfatos en el aire, este trabajo espera servir como base para la implementación de nuevas normas que establezcan los límites máximos permisibles de los compuestos en mención y así ayudar a futuras investigaciones.

HIPÓTESIS

La variación en las concentraciones de partículas PM10, nitratos y sulfatos en la zona norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora, están en relación a las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad de viento y humedad relativa) y temporada del año.

MARCO TEÓRICO

La contaminación del aire urbano es una seria amenaza a la salud humana y al ambiente, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

La rápida urbanización ha resultado en un incremento de las emisiones de contaminantes al aire debido al transporte, producción de energía y actividad industrial concentrada. La creación de programas para gestionar la calidad del aire, requiere de la evaluación de los contaminantes a través de un monitoreo atmosférico.

Uno de los contaminantes del aire importantes son las partículas que normalmente se encuentran suspendidas en atmósferas urbanas, que pueden ser de origen antropogénico o natural; estas pueden presentarse en el aire como partículas líquidas o sólidas o pueden formarse por reacciones fotoquímicas a partir de contaminantes existentes en el aire.

Cada ciudad, por su localización geográfica, crecimiento poblacional y actividad económica presenta situaciones de contaminación del aire que las diferencia de las demás; tal es el caso de la contaminación provocada por las partículas en la ciudad de Hermosillo, las cuales debido a su concentración y sus características físicas y químicas ejercen un papel importante en los efectos que provocan en el medio ambiente como en la salud de la población.

El primer paso en la solución de cualquier problema de calidad del aire es la caracterización de los aspectos espaciales, temporales y tendencias para el contaminante de interés. El material suspendido aerotransportado es un contaminante complejo que consta de muchos sólidos individuales partículas o gotas líquidas que cada una tiene un tamaño único y composición química (Herner, 2005).

En la ciudad de San José, Costa Rica, durante los años 2004 al 2006 se hizo un estudio sobre muestras de PM₁₀ para sulfatos y nitratos los sulfatos presentaron variaciones a causa de los parámetros meteorológicos como la temperatura y radiación solar durante

la temporada se sequía, mientras que los nitratos no presentaron variación alguna durante el mismo periodo.

Los sulfatos fueron el contaminante dominante, aumentando un 50% durante el 2005 en relación a los otros dos años probablemente a causa de los cambios normales en los patrones de viento de la ciudad, lo cual afecta a la capacidad de remover los 16 contaminantes. Durante el tiempo de análisis se encontraron evidencias de que los nitratos y los sulfatos están principalmente asociados a causas antropogénicas (Herrera M. et al. 2010).

En América Latina las actividades desarrolladas por las ciudades en rápido crecimiento contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del aire; en las principales urbes las fuentes móviles son responsables de las altas concentraciones de material suspendido; en los países que conforman esta región gran parte de la flota está constituida por vehículos de gasolina (nafta) y camiones de diésel con tecnologías anticuadas y combustibles de baja calidad. En los últimos 10 años el aumento del transporte, el total de la flota vehicular en México fue del 211% (PNUMA, 2010).

Algunos estudios sobre la composición química de material suspendido se han realizado en diferentes ciudades de Colombia, por ejemplo, en la ciudad de Bogotá caracterizaron el PM₁₀ en tres zonas (industrial, residencial y de alto tráfico vehicular) y encontraron que el ion más abundante era el SO₄²⁻, seguido del NO₂ - y el Cl⁻ (Vargas y Rojas, 2010).

En México la contaminación atmosférica causó 38,000 muertes por enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias, así como cáncer de pulmón durante 2001-2005. El 38% de esas muertes ocurrieron en la zona metropolitana del Valle de México y el 23% en las ciudades de Monterrey, Toluca, Puebla y Guadalajara. Se estimó que 5 mil muertes corresponden a niños. Los resultados de la contaminación por material suspendido en la mortalidad infantil fueron mayores en Toluca y Puebla (Stevens et al., 2008).

Los sulfatos y nitratos son los constituyentes principales de la contaminación por partículas finas. Los sulfatos y nitratos se forman a partir de la transformación atmosférica de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno. (EPA, 2013).

Los compuestos de azufre constituyen 7-10 % de las emisiones globales de material suspendido. Tienen generalmente un origen secundario, se generan como resultado de la oxidación principalmente del SO₂.

Los sulfatos de origen no natural constituyen la fracción principal del material suspendido atmosférico antropogénico y las emisiones antrópicas son responsables del 60-80 % del azufre en la atmósfera a escala global.

Las principales fuentes naturales de gases precursores de sulfatos son las emisiones volcánicas y las emisiones generadas por parte de organismos vivos.

El principal precursor gaseoso de los sulfatos de origen antropogénico es el SO₂ emitido en procesos de combustión de combustibles fósiles con alto contenido en azufre, principalmente carbón y fuel-oil en centrales térmicas, los motores de los buques y complejos industriales.

Los sulfatos se originan a partir de la reacción de oxidación del dióxido de azufre a ácido sulfúrico. Su formación depende de la intensidad de la radiación solar.

Los compuestos de nitrógeno constituyen del 2-5 % de las emisiones globales de material suspendido.

Al igual que los sulfatos, los nitratos son mayoritariamente secundarios y provienen de la reacción de precursores gaseosos tanto naturales como antropogénicos, principalmente óxidos de nitrógeno (NO_x). Las emisiones antropogénicas de estos compuestos a escala global son tres veces mayores que las emisiones naturales. Estas partículas suele ser también inferior a 1 µm.

Los compuestos de nitrógeno de origen natural proceden de la nitrificación, descargas eléctricas, emisiones generadas por organismos vivos e incendios forestales.

La producción antropogénica de gases precursores de nitratos secundarios se da en procesos de producción eléctrica (combustión de gas, fuel-oil y carbón) y otros procesos de combustión a temperaturas elevadas (capaces de oxidar el N_2 atmosférico), tales como los que ocurren en los motores de los vehículos, la quema de biomasa.

Los principales gases precursores emitidos (por fuentes naturales y antropogénicas) son NO , NO_2 , N_2O y NH_3 cuya oxidación en la atmósfera da lugar mayoritariamente a la formación de ácido nítrico (HNO_3).

Material Suspendido PM10

En términos generales el material suspendido se mide a través de: (1) redes nacionales de monitoreo bien establecidas y de largo plazo basado en métodos de seguimiento bien establecidos; (2) monitores individuales establecidos por un período específico para caracterizar la calidad del aire o realizar un estudio epidemiológico utilizando una variedad de métodos establecidos o experimentales métodos; y (3) mediciones satelitales.

Dependiendo de la fracción de tamaño de Material Suspendido, la medida en que la información disponible sobre las concentraciones ambientales variará según las capacidades de monitoreo actualmente disponible (EPA, 2019)

Estudios de calidad de aire a nivel global

Se observó en Nicosia durante el período 2000-2008, la concentración de material suspendido PM10 y los resultados fueron una mayor concentración de este contaminante durante las horas de tráfico, los días de la semana, los meses fríos y las condiciones de poco viento. La estimación de la contribución media (error estándar) de las fuentes urbanas al PM10 ambiental diario fue de 24,0 (0,4) $\mu g / m^3$. Se pudo observar que las políticas de tráfico vehicular fueron éxitos para la disminución de PM10, y que las

tormentas de arena juegan un papel pequeño en que se exceda el límite de concentración PM10 (Achilleos, et al. ,2014)

A continuación, el siguiente estudio describe las concentraciones de material suspendido (PM10) en un sitio de monitoreo urbano (Nicosia — ciudad capital) y un fondo (Ayia Marina) en Chipre y evalúa las tendencias de contaminación, el impacto de los cambios en el uso de combustible y la frecuencia de los eventos de tormentas de polvo del desierto durante un período de 16 años, período de estudio de un año (1993- 2008). Además, examina las variaciones diurnas, entre semana y estacionales de las concentraciones urbanas de PM10.

Los iones solubles en agua pueden representar del 30 al 60% (fracción de masa) de PM2.5 en Beijing, lo que influye en su acidez y formación (Shi et al.2017). El nitrato, el sulfato y el amonio son los principales iones en los iones solubles en agua (Tao et al. 2017).

Las concentraciones de sulfato-nitrato-amonio en PM2.5 son propensas a verse afectadas por factores meteorológicos y medidas de control (Niu et al. 2010). Por ejemplo, las medidas de control de la contaminación durante el período de la Cumbre de Cooperación Económica Asia-Pacífico (2014) han tenido como resultado una disminución significativa de las concentraciones de nitrato, sulfato y amonio en PM2.5 en Beijing (Xu et al. 2019).

En la ciudad de Bogotá los valores de sulfatos y nitratos fue del 11% de la concentración promedio obtenida para PM10 (Ramírez et al. 2018). En otro estudio en la misma ciudad los valores para sulfatos y nitratos variaron entre un 5 y 8% en zonas residenciales (Vargas et al. 2012). En la ciudad de Karachi la concentración de iones alcanzó un valor cercano al 20% en PM2.5 y de 9% en PM10, (Shahid et al. 2016).

Estudios De Calidad Del Aire En México.

La zona metropolitana de Monterrey mostró presento concentraciones medias anuales de PM10 mayor a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excediendo el límite máximo (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para la concentración promedio de 24 horas. (Magaña, Carrera, y Ramos, S. 2013). Se han realizado diversos estudios sobre la concentración de material suspendido en distintas ciudades, principalmente ciudad con gran densidad poblacional a continuación se mencionan los principales estudios:

El estudio de tendencia del material suspendido PM10 y su impacto a la salud en tres zonas metropolitanas de México durante 2005-2009.

El objetivo del siguiente artículo fue revisar la literatura disponible sobre estudios hechos en México referentes a Material Suspendido, comprendiendo PST (partículas suspendidas totales), PM10, PM2.5 y metales pesados asociados. Los estudios incluidos fueron publicaciones del año 2000 en adelante.

Estudios de calidad del aire en Sonora

Respecto a las Cédulas de Operación Anual (COA) -instrumento de reporte recopilación de información de emisiones y transferencia de contaminantes al aire que el industrial entrega a la autoridad estatal- se tiene para el mismo año (2015), 456 cédulas, 129 más que las reportadas en 2014, lo que nos permite inferir que anualmente hay un crecimiento de la industria en el Estado; por lo que existirá una mayor cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera, por ello, la importancia de implementar el Pro Aire.

Sulfatos: Los sulfatos son una familia de productos químicos que contienen la forma iónica totalmente oxidada del azufre (SO_4^{2-}), en combinación con iones de metal y / o hidrógeno.

Primero, el azufre emitido en el combustible se oxida a dióxido de azufre (SO_2) durante el proceso de combustión y posteriormente se convierte en material particulado de sulfato a través de reacciones químicas en la atmósfera.

Por tanto, los sulfatos son una sub-fracción del material particulado ambiental (California Air Resources Board, 2021). Los sulfatos provienen de la oxidación de los gases de azufre en la atmósfera (Hidy et al. 1978).

Principalmente de la oxidación del SO_2 producido por procesos industriales o naturales. El resultado último de la oxidación de los compuestos de gases de azufre en la atmósfera es la de la formación de compuestos de sulfatos en forma de aerosol (Georgii, 1978).

Nitratos: Los nitratos se producen en la atmósfera por la oxidación del NO_2 que se forma en diversos procesos de combustión.

La oxidación del NO_2 a NO_3 se relaciona con la actividad fotoquímica (Sandberg et al 1976, Hidy et al 1975) y con la formación de Ozono.

Los nitratos son compuestos inorgánicos compuesto por un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de oxígeno (O); el símbolo químico del nitrato es NO_3 (82)

OBJETIVOS

Objetivo General

“Determinar el comportamiento de las concentraciones de nitratos y sulfatos presentes en las partículas de PM10 en el aire en la zona norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora”.

Objetivos Específicos

1. Determinar la concentración de PM10, nitratos y sulfatos en la zona norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora.
2. Describir el comportamiento de la concentración de nitratos y sulfatos presentes en muestras de PM10 por época del año.
3. Determinar la influencia que tienen las variables meteorológicas (temperatura, velocidad de viento y humedad relativa) en la concentración de nitratos y sulfatos en muestras de PM10.

METODOLOGÍA

I. Descripción de la zona de estudio

Localización geográfica

El Estado de Sonora colinda al Norte con la frontera de los Estados Unidos de América (con los Estados de Arizona y Nuevo México), al Sur con el Estado de Sinaloa, al Este limita con Chihuahua; y al Oeste con el Mar de Cortés o Golfo de California; en la parte Noroeste con el Estado de Baja California. Hermosillo, Sonora es la capital del estado de Sonora, se localiza en la parte occidental del estado de Sonora su superficie es de 14,880.2 km², que representa el 8.77 por ciento de la superficie del Estado; colinda con al norte de los municipios de Pitiquito, Carbó y San Miguel de Horcasitas; al este con los municipios de Ures, Mazatán, La colorada y Guaymas, al Sur; con el municipio de Guaymas y el golfo de California; al Oeste con golfo de California y el municipio de Pitiquito. La ciudad de Hermosillo (Figura 1) se localiza Longitud 112°36'46.80" W a 110°22'55.20" W, Latitude 28°13'31.44" N a 29°42'46.08" N (INEGI, 2005).



Figura 1: Mapa de la ciudad de Hermosillo, (punto localizado en la zona de muestreo donde muestreamos la concentración de PM10). **Fuente:** Google (s.f). [Ubicación de la Universidad Estatal de Sonora].

I. Clima

El clima de la ciudad corresponde al tipo BW(h') el cual es muy seco cálido y predomina en el 48.02% de la superficie. La temperatura media anual es de 24°C y la precipitación total anual promedio es de 412.8 milímetros.

El mes con menor temperatura es diciembre con una temperatura mínima promedio de 3.5°C y el mes más con mayor temperatura es junio con una temperatura máxima promedio de 45°C, el mes con mayor humedad relativa es diciembre con un máximo de 62% mientras que el mes con menos humedad es en abril con un porcentaje mínimo promedio de 24.6%. El trimestre de Julio, agosto y septiembre registra una humedad promedio de 53% con mayor precipitación pluvial, mientras que, marzo, junio y octubre son los meses con presencia mínima de lluvias con una humedad de 30%. El viento predominante se dirige en sentido Suroeste-noreste por la mañana y en sentido contrario por la tarde (Cruz, 2005).

II. Vegetación

La vegetación predominante para la ciudad de Hermosillo, es la de matorral y representa 75% de la superficie seguida de vegetación agrícola con 17%. Se presente una vegetación de ornato y sombra. (Cruz, 2005).

III. Población

Se cuenta con una población total de 936,263 (Figura 2) de acuerdo al censo realizado por INEGI en el año 2020. Como se adjunta en la siguiente gráfica podemos ver un incremento exponencial en la población los últimos años.

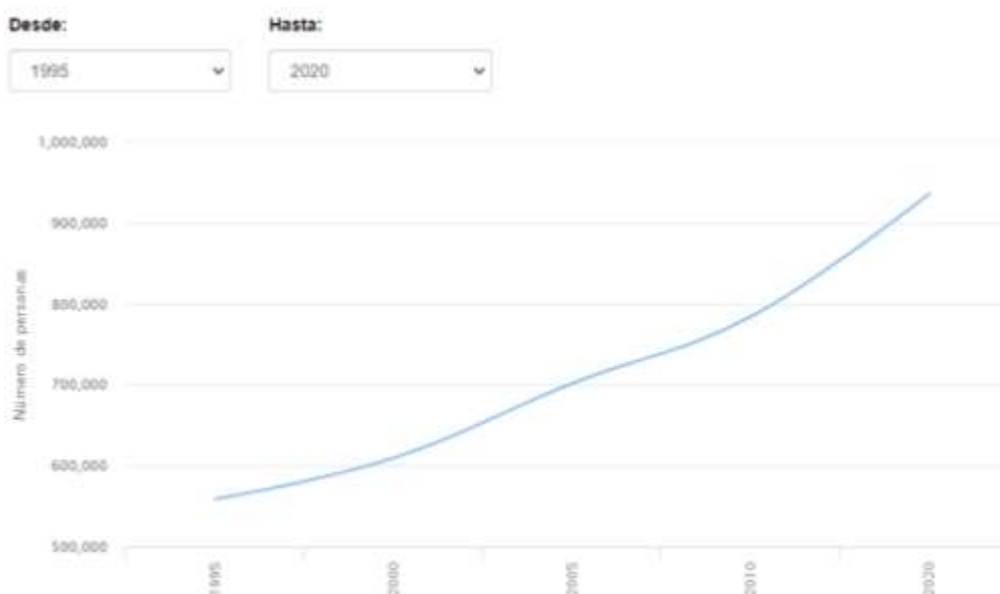


Figura 2: Aumento de la población de la ciudad de Hermosillo, Sonora. **Fuente:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021.

I. Métodos y técnicas

Medición de partículas suspendidas PM10.

Para llevar a cabo las mediciones de la concentración de material suspendido menor a 10 micras se emplearon métodos y técnicas estandarizadas con la normatividad NORMA oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021.

Se seleccionó la zona norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora; en donde, utilizaremos la estación de monitoreo atmosférico equipada con un muestreador de alto volumen para la captura de partículas PM10.

En el muestreo del material suspendido se usa el método de alto volumen que consiste en hacer pasar un flujo de aire a gran velocidad, a través de un medio filtrante de fibra de cuarzo, en el que se retienen las partículas. En este método es absolutamente indispensable mantener el control y tener conocimiento de la tasa de flujo y de volumen total de aire que se muestreo durante las 24 horas que es, por lo regular, el periodo recomendado para la toma de muestras. Se requiere conocer el peso del filtro antes y después del muestreo, por lo que este se acondiciona durante 24 horas en una cámara, donde se controlan la temperatura y la humedad relativa. Posterior a la determinación de la masa de material, la muestra es susceptible de someterse a análisis fisicoquímicos para determinar el contenido de sulfatos y nitratos.



Figura 3: Muestreador de Alto Volumen (Hi-Vol). **Fuente:** Elaboración propia.

Un muestreador de alto volumen (Figura 3) es un equipo que succiona una cantidad medible de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro durante un periodo de tiempo conocido, generalmente 24 horas. El filtro tiene cierto peso antes y después para determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. Posterior a la determinación de la masa de material, la muestra es susceptible de someterse a análisis físico-químicos para determinar el contenido de sulfatos y nitratos (Santos R. 2006). La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia.

II. Análisis

A. Para el estudio de las partículas PM₁₀:

1. Se colocó un filtro de fibra de cuarzo para el análisis de las partículas PM₁₀ con dimensiones de 21.5 x 28 cm en una cámara de estabilización durante 24 horas.
2. Mediante una balanza analítica se obtuvo el peso inicial

3. Se etiqueta en una de las esquinas del filtro el número correspondiente y se anota en el libro de registro.
4. Después de lo anterior, se colocó en el interior de un sobre, tamaño oficio junto con la carta Dickson previamente foliada y se llevó al sitio de muestreo.
5. Se colocó el filtro en el equipo de muestreo además de la carta Dickson y se ajustó el equipo para que inicie y termine su trabajo a la media noche.
6. Acabado el muestreo se recogió el filtro y se llevó a la cámara de estabilización por 24 horas.
7. Ya estabilizado el filtro en una balanza analítica se obtuvo su peso final y se hicieron los cálculos para determinar el peso en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual se anotó en el libro de registro.
8. Las muestras se llevaron al laboratorio de Calidad del Aire de la UES para su análisis químico.

B. Análisis químico: Se cortó una fracción del filtro de 2.6 x 18 cm (20% del total). Para la determinación de sulfatos y nitratos; el cual se cortó en trozos pequeños que se colocaron en un vaso precipitado de 250ml, al cual se le agregaron 100 ml de agua destilada, y a continuación se puso en una placa de calentamiento a una temperatura de 50 grados centígrados, colocándose en la parte superior un vidrio reloj, y se calentó por un periodo de 1 hora y media; añadiendo periódicamente agua destilada para mantener el nivel normal de la solución y para evitar la desecación. Cumplido el tiempo anterior se filtró a través de un papel whatman # 40 hasta completar 100 ml del filtrado; y se prosiguió el estudio de los compuestos anteriores de la siguiente manera;

C. Sulfatos:

1. Del filtrado anterior se tomaron 10 ml.
2. Se utilizó también un vial de 10ml con agua destilada para mediante el espectrofotómetro de luz visible, escanear como el blanco de las concentraciones.
3. Se remueve el blanco y a un nuevo vial conteniendo 10 ml de nuestro filtrado se le agrega 0.1g de reactivo de sulfato, se tapa y se agita hasta que se disuelva.
4. Posterior se esperan 5 minutos se vuelve a agitar y se pone en el espectrofotómetro para escanear y obtener el resultado.

D. Nitratos

1. Del filtrado inicial se tomaron 10 ml.
2. Se utilizó también un vaso con 10 ml con agua destilada para mediante el espectrofotómetro de luz visible escanear la muestra blanco.
3. Se remueve el blanco y al filtrado inicial se le agregó una tableta de prueba de espectro de nitrato, se agitó por dos minutos hasta disolverse.
4. Se dejó reposar por 5 minutos para después colocarse en el espectrofotómetro para escanear y obtener el resultado.



Figura 4: Espectrofotómetro de luz visible. **Fuente:** Elaboración propia.

RESULTADOS

Cada muestreo de partículas suspendidas de diámetro menor a 10 micras (PM10) se realizó en periodos de 24 horas, desde las 00:01 hrs. a las 24:00 hrs., con una frecuencia aproximada por muestreo de cada 6 días. El periodo completo de monitoreo se realizó de enero a diciembre del 2021, obteniéndose un total de 58 muestras. En general, los resultados obtenidos de los muestreos de partículas PM10 se presentan en tres partes, las que son: PM10 totales, concentración de nitratos en PM10, y concentración de sulfatos en PM10. Los valores de PM10 totales se contrastaron de manera anual y trimestral contra los valores límite permisibles establecidos en la NOM-025-SSA1-2021.

Por otra parte, se determinó la correlación de los valores de PM10 totales y sus concentraciones de nitratos y sulfatos contra las variables meteorológicas: viento, temperatura y humedad relativa ocurridas durante el período de muestreo

7.1. Normalidad de Datos.

Según la prueba no paramétrica de Anderson-Darling para normalidad de datos, los valores promedio de PM10 totales registrados para cada uno de los cuatro trimestres del 2021 (Trimestre enero-marzo, Trimestre mayo-junio, Trimestre julio-septiembre y Trimestre octubre diciembre) cumplen con los supuestos de normalidad, ya que el valor estadístico W obtenido resultó menor que el valor W crítico del nivel alfa establecido, lo que se representa en la Figura 1.

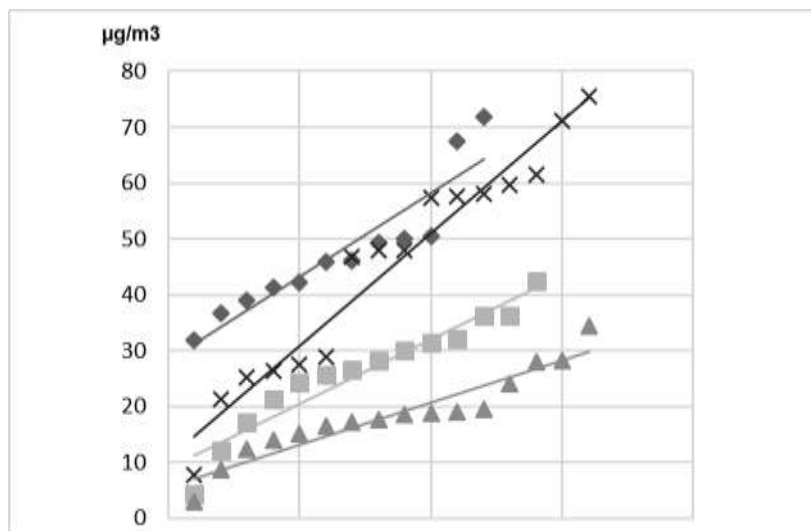


Figura 5. Representación del resultado de la Prueba de normalidad de datos para la concentración de PM10 totales durante los cuatro trimestres del 2021 (◆ Trimestre 1; ■ Trimestre 2; ▲ Trimestre 3; × Trimestre 4).

Respecto a la concentración de nitratos en las muestras de PM10 registrados para cada uno de los cuatro trimestres del 2021 y según la prueba de normalidad ya referida, también se encontró que los datos cumplen en los cuatro trimestres evaluados con los supuestos de normalidad, lo cual se representa en la Figura 2.

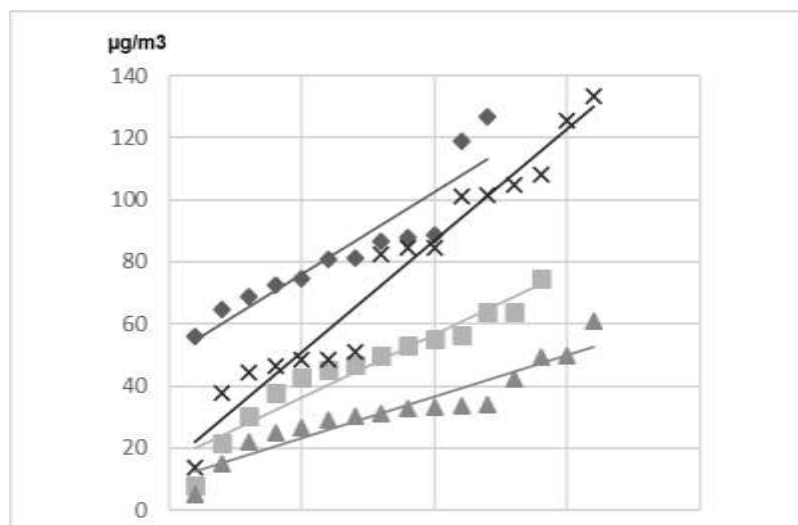


Figura 6.- Representación del resultado de la Prueba de normalidad de datos para la concentración de nitratos en las PM10 durante los cuatro trimestres del 2021 (◆ Trimestre 1; ■ Trimestre 2; ▲ Trimestre 3; × Trimestre 4).

Asimismo, para las concentraciones de sulfatos en las PM₁₀, los datos cumplen con los supuestos de normalidad de la prueba aplicada para los cuatro trimestres evaluados en el año 2021, representándose en la Figura 3.

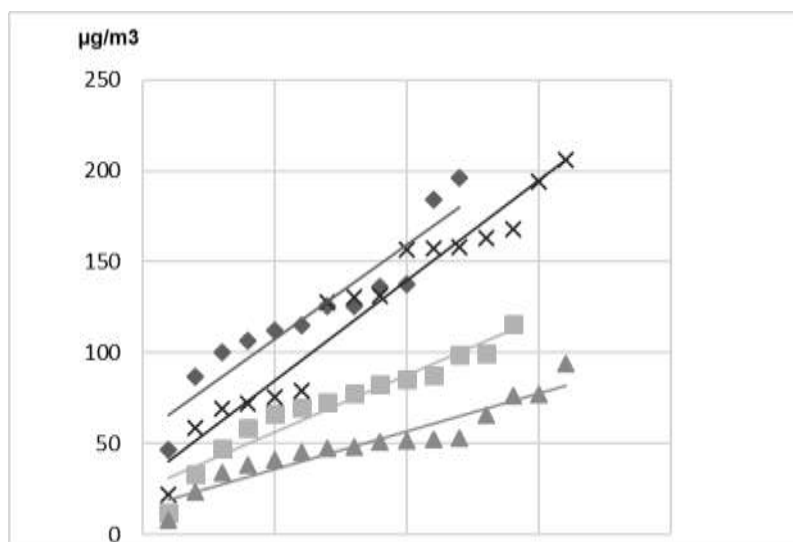


Figura 7.- Representación del resultado de la Prueba de normalidad de datos para la concentración de sulfatos en las PM₁₀ durante los cuatro trimestres del 2021 (♦ Trimestre 1; ■ Trimestre 2; ▲ Trimestre 3; × Trimestre 4).

7.2. Partículas PM₁₀ Totales.

7.2.1. Promedio Anual de Partículas PM₁₀.

El promedio anual de PM₁₀ totales para enero a diciembre del año 2021, se obtuvo mediante el promedio aritmético a partir de los promedios de 24 horas, lo que es válido según la NOM-025-SSA1-2021. El promedio anual de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ obtenido para el Noreste de la ciudad de Hermosillo, Sonora es inferior al límite permisible de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la “Tabla 1 Cumplimiento Gradual Para los Valores Límite de PM₁₀ y PM_{2.5} en el Aire Ambiente” (Tabla 1), misma que se incluye en la norma referida. Por lo anterior, se cumple con esta normativa para la ocurrencia de promedio anual de partículas PM₁₀ en el año 2021.

Tabla 1.- Cumplimiento Gradual Para los Valores Límite de PM₁₀ y PM_{2.5} en el Aire Ambiente.

Contaminante		Concentración	Año 1 ^a	Año 3 ^a	Año 5 ^a		
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h	70	60	50			
	Anual		36	28	20		
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 h		41	33	25		
	Anual		10	10	10		

^a Los años se contarán a partir de la entrada en vigor de la Norma.

7.2.2. Promedios Trimestrales de Partículas PM10.

Conforme a lo establecido en la NOM-025-SSA1-2021 se calcularon los valores promedio trimestrales de PM10 para el año 2021. Para el primer trimestre se registraron $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=12$), para el segundo $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=14$), para el tercero $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=16$) y para el cuarto trimestre se registraron $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=16$) (Figura 4). Por lo expuesto, si se contrastan los valores promedio trimestrales contra los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos por la Norma para el promedio diario, se cumple con lo establecido para las concentraciones permisibles PM10 para el Noreste de la ciudad de Hermosillo en el año 2021.

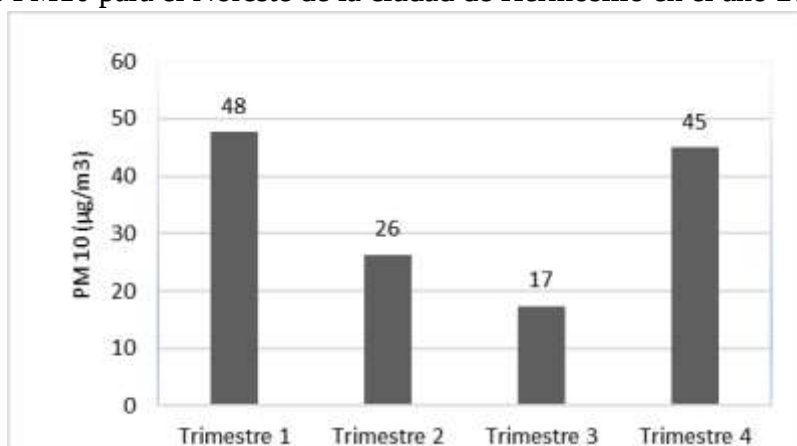


Figura 8.- Promedios trimestrales de concentraciones PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Se efectuó un Análisis de Varianza (ANVA) de las concentraciones promedio de PM10 registradas para los cuatro trimestres del año, determinándose que las diferencias observadas fueron altamente significativas ($P < 0.0001$), como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2.- Resumen de Análisis de Varianza de las concentraciones promedio de PM10 registradas para los cuatro trimestres del año 2021.

Fuente	g.l.	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Razón de Varianzas	<i>F</i>
Tratamientos	3	8,890.453	2,963.484	16.715	2.78
Error	54	9,574.039	177.297		
Total	57	18,464.491			

Con base en la Prueba de Comparación Múltiple de Medias de Tukey (DVS*) se determinó que los valores promedio de PM10 obtenidos para los Trimestres 1 y 4 del año fueron estadísticamente iguales entre sí y superiores a los valores obtenidos para los

Trimestre 2 y 3, los que resultaron también iguales entre sí, como se representa en el resumen de igualdad y diferencia de medias de la Tabla 3.

Tabla 3.- Resumen de la comparación Múltiple de Medias de Tukey de los promedios de PM10 obtenidos para los cuatro trimestres del año 2021.

Trimestre 1 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 4 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 2 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 3 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
A	A	B	B

Nota: Medias señaladas con la misma letra son estadísticamente iguales entre sí.

7.2.3. Promedios Diarios de Partículas PM10.

Aunque en lo registrado como promedio anual y promedios trimestrales para el año 2021 no se rebasó el límite permisible de 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la norma ya citada, en tres de los 58 días de muestreo sí se rebasó dicho límite, un día en el Trimestre 1 con 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y dos días en el Trimestre cuatro con 76 y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Tabla 4 se incluyen los valores máximos y mínimos para los días de mayor concentración de PM10 en los cuatro trimestres del año de muestreo.

Tabla 4.- Valores máximos y mínimos de PM10 registrados en los cuatro trimestres del año 2021.

Trimestre	1	2	3	4	
				(día 1)	(día 2)
Máximo	72	42	28	76	75
Mínimo	32	4	3	21	N/A

7.3. PM10 y Variables Meteorológicas.

Para evaluar la posible relación entre las variables meteorológicas viento, temperatura y humedad relativa con las concentraciones de partículas PM10 registradas durante el 2021 se realizaron análisis de correlación entre dichas concentraciones y cada una de las variables referidas.

7.3.1. PM10 y Velocidad del Viento.

En el presente estudio se observó que en los meses donde hubo una mayor velocidad de se presentó una menor concentración de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en los meses donde disminuyó la velocidad del viento la concentración de fue mayor. La tendencia observada fue explicada por el modelo de regresión lineal ($Y = -0.7081 X + 63.617$), con un índice de correlación negativa de $r = -0.494$ (Figura 5).

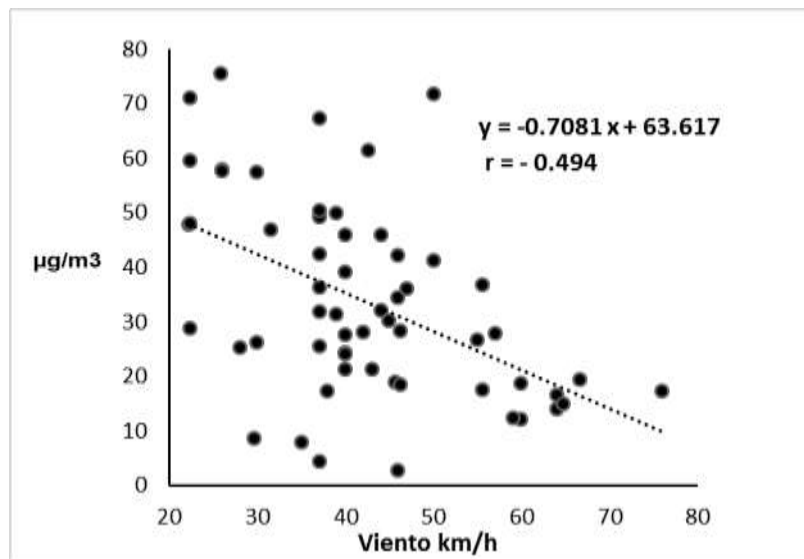


Figura 9.- Relación entre las concentraciones de PM10 y la velocidad del viento registrados durante el año 2021.

7.3.2. PM10 y Temperatura.

Respecto a las temperaturas promedio registradas durante el estudio, se pudo observar una relación inversa entre dichas temperaturas y las concentraciones de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); esto es, a mayor temperatura menor concentración de PM10, y viceversa. Siendo el mes de febrero de 2021, el mes con una mayor concentración de PM10 $54.7075 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los meses de agosto y septiembre con una concentración menor de $17.54685 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tendencia observada fue también mejor expresada por el modelo de regresión lineal ($Y = -1.5311 X + 74.188$), con un índice de correlación negativa de $r = -0.624$ (Figura 6). Esta es la correlación mas alta obtenida entre las concentraciones PM10 totales y las variables meteorológicas consideradas.

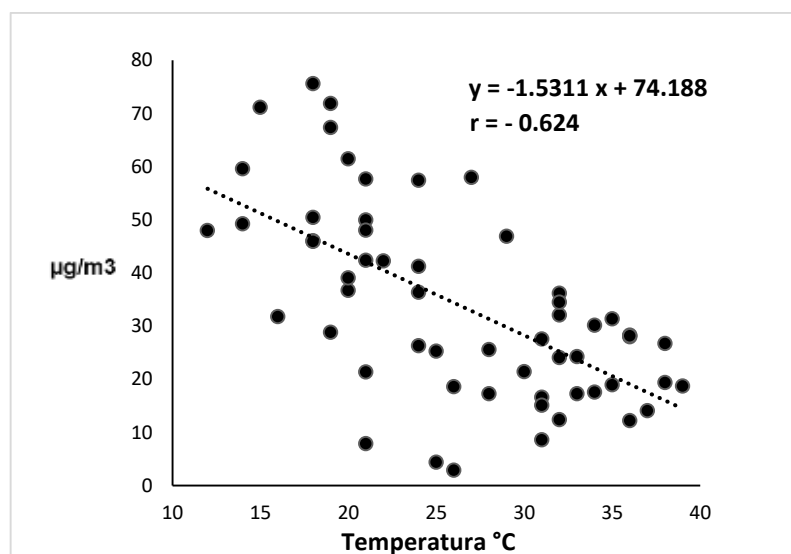


Figura 10.- Relación entre las concentraciones de PM10 totales y las temperaturas promedio registradas durante el año 2021.

7.3.3. PM10 y Porcentaje de Humedad Relativa.

En los análisis de correlación efectuados con las variables meteorológicas, el porcentaje de humedad relativa ocurrida durante el año de muestreo fue la variable que presentó más baja correlación con las concentraciones de PM10 totales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La tendencia observada fue expresada por el modelo de regresión lineal ($Y = -0.3169 X + 47.359$), con un índice de correlación negativa de $r = -0.345$ (Figura 7).

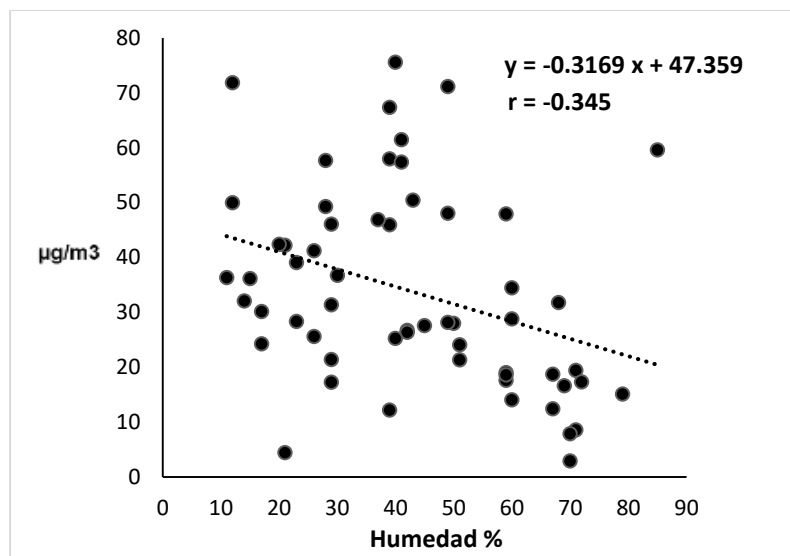


Figura 11- Relación entre las concentraciones de PM10 totales y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021.

7.4. Concentración de Nitratos en Muestras PM10.

Las concentraciones promedio trimestrales de nitratos presentes en las PM10 tuvieron notable variación durante el 2021; en el primer trimestre se registraron $83.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 12$), para el segundo $46.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 14$), para el tercero $32.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 16$) y para el cuarto trimestre se registraron $76.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 16$), siendo entonces las concentraciones más altas las ocurridas en el primero y cuarto trimestres del año (Figura 8).

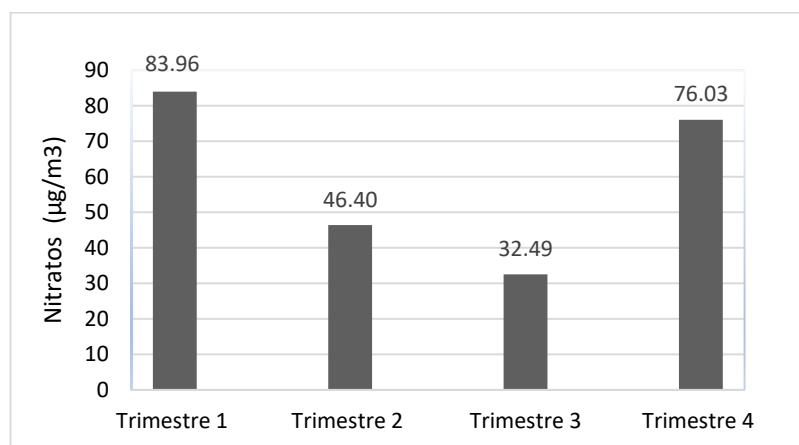


Figura 12.- Promedios trimestrales de concentración de nitratos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en partículas PM10 durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Se efectuó un Análisis de Varianza (ANVA) de las concentraciones promedio de nitratos presentes en las PM10 registradas para los cuatro trimestres del año, determinándose que

las diferencias observadas fueron altamente significativas ($P < 0.0001$), como se resume en la Tabla 5.

Tabla 5.- Resumen de Análisis de Varianza de las concentraciones promedio de nitratos presentes en partículas PM10 registradas para los cuatro trimestres del año 2021.

Fuente	g.l.	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Razón de Varianzas	F
Tratamientos	3	25,566.594	8,522.20	15.368	2.78
Error	54	29,944.874	554.53		
Total	57	55,511.468			

Con base en la Prueba de Tukey (DVS*) se determinó que los valores promedio de PM10 obtenidos de concentraciones de nitratos para los Trimestres 1 y 4 del año fueron estadísticamente iguales entre sí y superiores a los valores obtenidos para los Trimestre 2 y 3, los que resultaron también iguales entre sí, como se representa en el resumen de igualdad y diferencia de medias de la Tabla 6.

Tabla 6.- Resumen de la comparación Múltiple de Medias de Tukey de las concentraciones promedio de nitratos presentes en partículas PM10 obtenidas para los cuatro trimestres del año 2021.

Trimestre 1 83.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 4 76.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 2 46.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 3 32.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
A	A	B	B

Nota: Medias señaladas con la misma letra son estadísticamente iguales entre sí.

Los trimestres 1 y 4 obtuvieron medias significativamente similares, mientras que los trimestres 2 y 3 fueron significativamente similares entre ellos, como lo podemos observar en el informe de las letras de UNION.

7.4.1. Concentración de Nitratos y Variables Meteorológicas.

7.4.1.1. Concentración de Nitratos y Velocidad del Viento.

Aunque con una tendencia negativa moderada, se observó que en los meses donde hubo una mayor velocidad de viento se presentó una menor concentración de nitratos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en los meses donde la velocidad del viento fue menor, la concentración de nitratos fue mayor. La tendencia observada fue explicada por el modelo de regresión lineal ($Y = -1.1547 X + 107.22$), con un índice de correlación negativa de $r = -0.465$ (Figura 9).

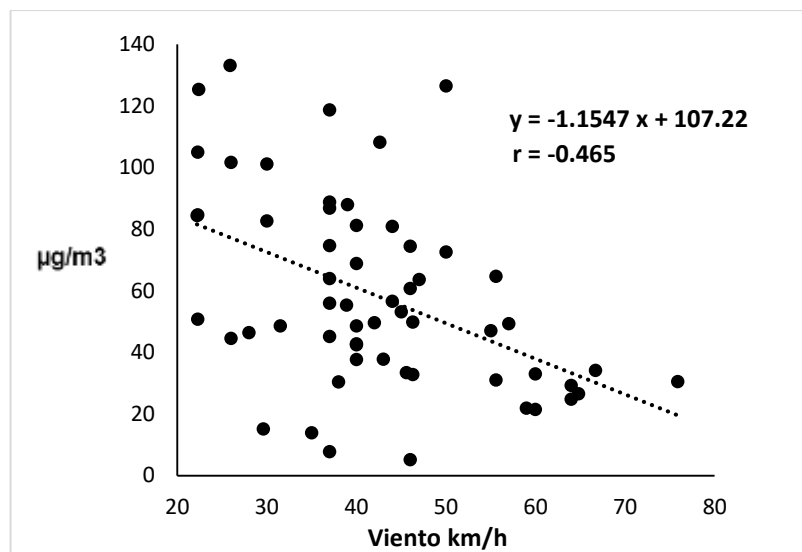


Figura 13.- Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en partículas PM10 y la velocidad del viento registrados durante el año 2021.

7.4.1.2. Concentración de Nitratos y Temperatura.

La temperatura fue la variable meteorológica con la que se obtuvo la más alta correlación con las concentraciones de nitratos, donde a menor temperatura fue mayor concentración de estos, y viceversa, a mayor temperatura menor concentración de nitratos. La tendencia observada fue entonces negativa, y fue mejor explicada por el modelo de regresión cuadrática ($Y = 0.1196 X^2 - 9.0394 X + 207.53$), con un índice de correlación de $r = 0.676$ (Figura 10).

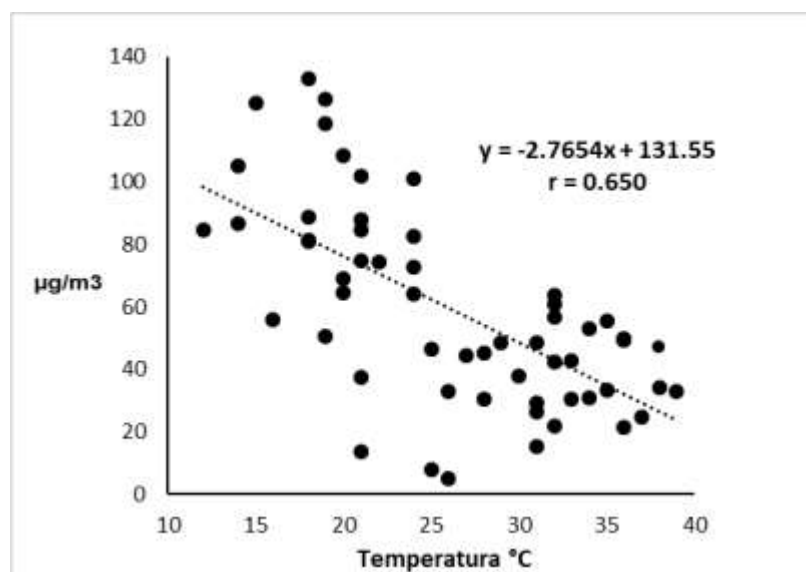


Figura 14.- Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en partículas PM10 y las temperaturas promedio registradas durante el año 2021.

7.4.1.3. Concentración de Nitratos y Humedad Relativa.

La humedad relativa ocurrida durante el año del estudio fue la variable que tuvo el menor índice de correlación con la concentración de nitratos presentes en las partículas PM10. Con una pendiente negativa poco pronunciada y un índice de correlación de $r = -0.339$, la tendencia observada se explica por el modelo de regresión lineal ($Y = -0.5403 X + 81.715$) (Figura 11).

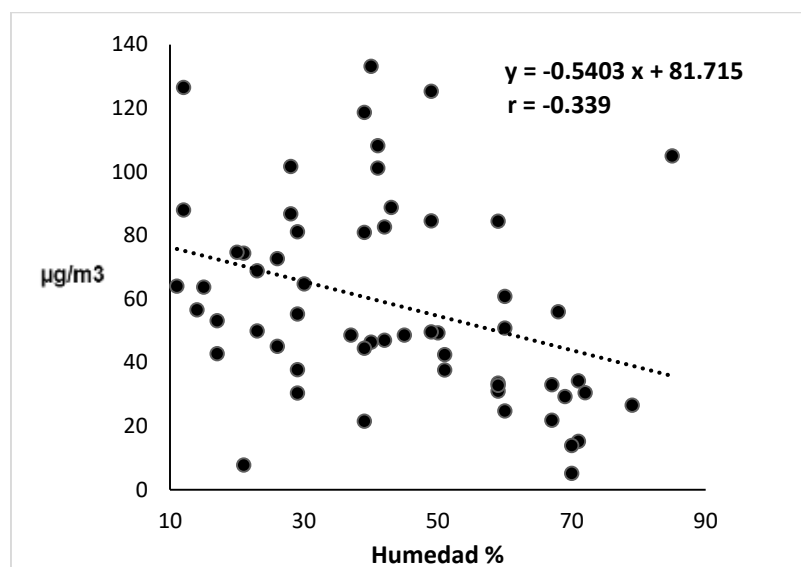


Figura 15.- Relación entre las concentraciones de nitratos presentes en partículas PM10 y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021.

7.5. Concentración de Sulfatos en Muestras PM10.

Similar a lo observado con los nitratos, las concentraciones promedio trimestrales de sulfatos presentes en las PM10 tuvieron notable variación durante el 2021; en el primer trimestre se registraron $122.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 12$), para el segundo $71.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 14$), para el tercero $50.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 16$) y para el cuarto trimestre se registraron $122.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n = 16$), siendo entonces las concentraciones más altas las ocurridas en el primero y cuarto trimestres del año (Figura 12).

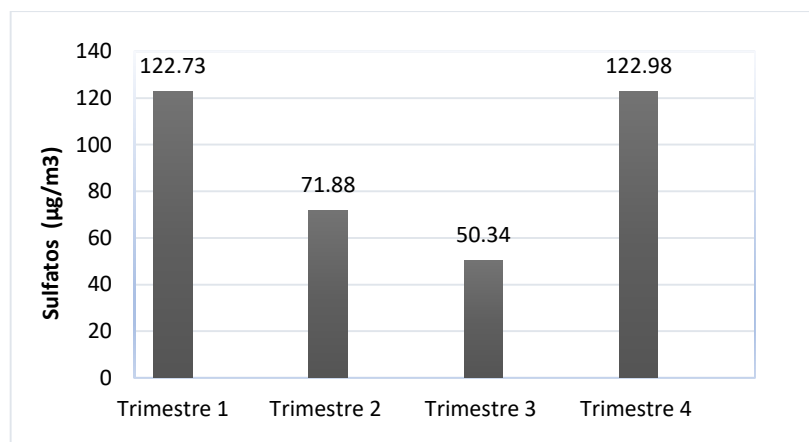


Figura 16.- Promedios trimestrales de concentración de sulfatos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en partículas PM10 durante el año 2021 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

La concentración de sulfatos para el ciclo anual 2021, rondaron como máximo un valor de $73.3940 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas durante el trimestre de Julio- septiembre 2021 (20 agosto 2021) y como mínimo $2.7283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas durante el mismo trimestre (5 Julio 2021). De manera general, el promedio anual 2021 de la concentración de sulfato es de $36.3970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas.

Al igual que con las concentraciones de nitratos, se efectuó un Análisis de Varianza (ANVA) de las concentraciones promedio de sulfatos presentes en las PM10 observadas para los cuatro trimestres del año, determinándose que las diferencias observadas fueron altamente significativas ($P < 0.0001$), como se resume en la Tabla 7.

Tabla 7.- Resumen de Análisis de Varianza de las concentraciones promedio de sulfatos presentes en partículas PM10 registradas para los cuatro trimestres del año 2021.

Fuente	g.l.	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Razón de Varianzas	F
Tratamientos	3	60,001.14	20,000.38	13.917	2.78
Error	54	77,605.46	1,437.14		
Total	57	137,606.61			

Con base en la Prueba de Tukey (DVS*) se determinó que los valores promedio de PM10 obtenidos de concentraciones de sulfatos para los Trimestres 1 y 4 del año fueron estadísticamente iguales entre sí y superiores a los valores obtenidos para los Trimestre 2 y 3, los que resultaron también iguales entre sí, como se representa en el resumen de igualdad y diferencia de medias de la Tabla 6.

Tabla 6.- Resumen de la comparación Múltiple de Medias de Tukey de las concentraciones promedio de sulfatos presentes en partículas PM10 obtenidas para los cuatro trimestres del año 2021.

Trimestre 4 122.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 1 122.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 2 71.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Trimestre 3 50.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
A	A	B	B

Nota: Medias señaladas con la misma letra son estadísticamente iguales entre sí.

7.5.1. Concentración de Sulfatos y Variables Meteorológicas.

7.5.1.1. Concentración de Sulfatos y Velocidad del Viento.

Con una tendencia negativa moderada, se observó que en los meses donde hubo una mayor velocidad de viento se presentó una menor concentración de sulfatos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en los meses donde la velocidad del viento fue menor, la concentración de sulfatos fue mayor. La tendencia observada fue mejor explicada por el modelo de regresión potencial ($Y = 1,809.7 X^{-0.858}$), con un índice de correlación negativa de $r = -0.496$ (Figura 13).

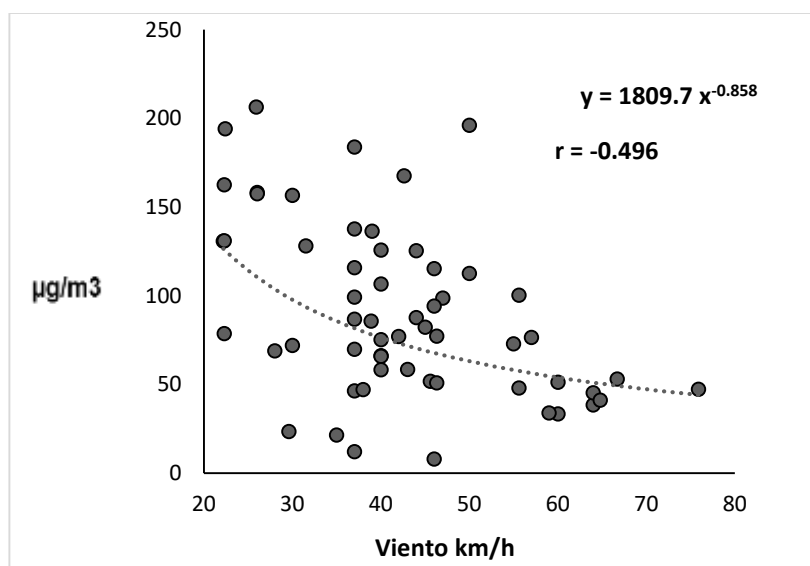


Figura 17- Relación entre las concentraciones de sulfatos presentes en partículas PM10 y la velocidad del viento registrados durante el año 2021.

7.5.1.2. Concentración de Sulfatos y Temperatura.

Similar a lo observado con las concentraciones de nitratos, la temperatura fue la variable meteorológica con la que se obtuvo la más alta correlación con las concentraciones de sulfatos presentes en las PM10. La tendencia marcada fue que a menor temperatura fue mayor concentración de sulfatos, y a mayor temperatura menor concentración de los sulfatos. La tendencia general observada dentro del rango de valores fue entonces negativa, y fue mejor explicada por el modelo de regresión cuadrática ($Y = 0.0886 X^2 - 8.47 X + 247.78$), con un índice de correlación de $r = 0.577$ (Figura 14).

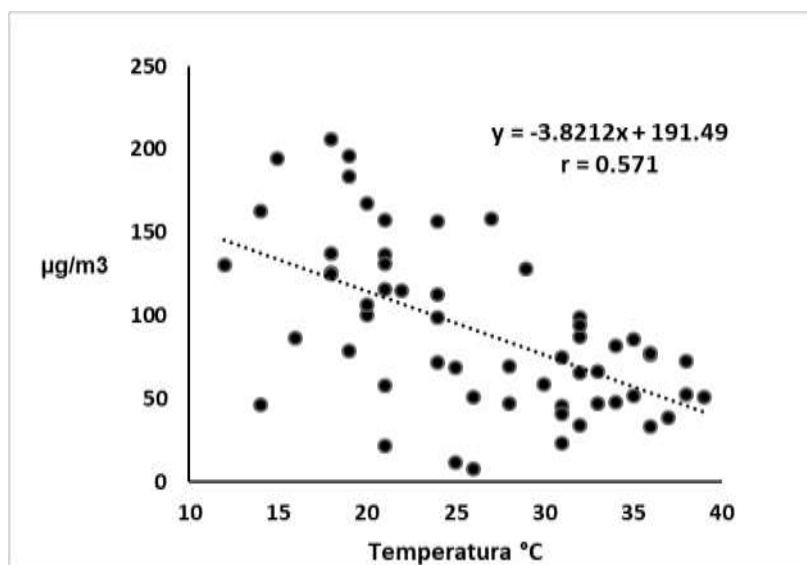


Figura 18.- Relación entre las concentraciones de sulfatos presentes en partículas PM10 y las temperaturas promedio registradas durante el año 2021.

7.5.1.3. Concentración de Sulfatos y Humedad Relativa.

La humedad relativa ocurrida durante el año del estudio fue la variable que tuvo más bajo índice de correlación con la concentración de sulfatos presentes en las partículas PM10. Con una pendiente negativa poco pronunciada y un índice de correlación de $r = -0.321$, la tendencia es explicada por el modelo de regresión lineal ($Y = -0.8046 X + 125.11$) (Figura 11).

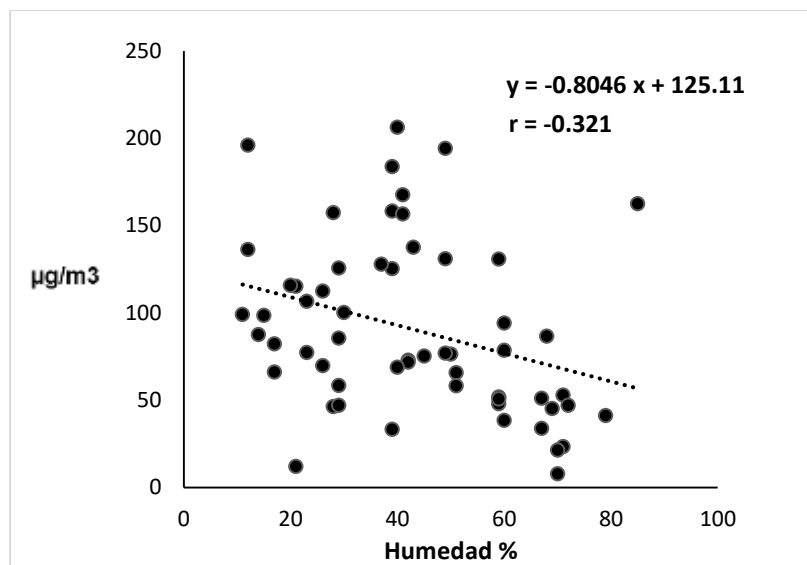


Figura 19.- Relación entre las concentraciones de sulfatos presentes en partículas PM10 y las lecturas de humedad relativa registradas durante el año 2021.

CONCLUSIONES

1. Para el periodo estudiado se rebasa el límite máximo permisible diario en concentraciones de PM10 en el 5.17% de los muestreos, en los trimestres correspondientes a los meses de Enero-Marzo y Octubre-Diciembre.
2. La concentración de sulfatos fue mayor a la concentración de nitratos para los 4 trimestres evaluados.
3. En la concentración entre PM10 y temperatura se obtuvo una correlación alta con índice de correlación negativo de 0.676, para la concentración nitratos en muestras de PM10 se obtuvo una correlación alta con un índice de correlación de 0.650 y para la concentración de sulfatos en muestras de PM10 se obtuvo una correlación alta con un índice de correlación negativa de 0.571.

RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar estudios sobre las fuentes antropogénicas en la zona norte de la ciudad, donde se cuenta con poca información sobre las emisiones generadas, con la finalidad de adoptar medidas de regulación de las mismas.

Otro aspecto importante sería el de un estudio más extenso, con equipos de recolección de partículas en diferentes puntos de la ciudad, a fin de conocer el comportamiento espacial de este tipo de contaminantes en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

LITERATURA CITADA

1. Ahmed, E., Kim, KH, Shin, ZH y Song, SK (2015). Tendencia a largo plazo de las partículas suspendidas en el aire en Seúl, Corea, de 2004 a 2013. *Atmospheric Environment* , 101 , 125-133.
2. Balti Eric V., Echouffo-Tcheugui Justin B., Yako Yandiswa Y., Kengne Andre P. (2014). Airpollution and risk of type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *Diabetes Research and Clinical Practice* 106, 161 – 172.
3. C. Arden Pope III & Douglas W. Dockery (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56:6, 709-742, DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485
4. California Air Resources Board.(2021) <https://ww2.arb.ca.gov/resources/sulfate-and-health>
5. Cruz Campas Martín Eusebio, Gómez Álvarez Agustín, Quintero Núñez Margarito, Varela Salazar Jaime. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (4) 269-283
6. Cruz Campas, Martín Eusebio. 2005. Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pd, Cd, Ni, Cu, Cr) de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México durante el período junio de 2001 a mayo de 2002. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Sonora. México.
7. EEA,(2016) Air quality in Europe – report, European Environment Agency.
8. Environmental Protection Agency. (2013). Particulate Matter (PM). Estados Unidos de América
9. EPA,(2003) The Particle Pollution Report.
10. Fajersztajn L. et al.(207) Short-term effects of fine particulate matter pollution on daily health events in Latin America: a systematic review and meta-analysis. *Int J Public Health.* 62(7):729-738. doi: 10.1007/s00038-017-0960-y.

11. Gamarra Chipulina, C. D., & Chávez Quiñonez, M. M. (2021). Polución ambiental por aerosoles atmosféricos que alteran la composición atmosférica que afecta la salud humana y favorecen el cambio climático en la ciudad de Chiclayo.
12. Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., ... & Peters, J. (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *New England Journal of Medicine*, 351(11), 1057-1067.
13. Gobierno del estado de Sonora, Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, 2015 <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
14. Gómez, M., Dawidowski, L., Posada, E., & Correa, M. (2011). Chemical composition of PM_{2.5} in three zones of the Aburrá Valley, Medellín, Colombia. *Proceedings of the Air and Waste Management Association 's Annual Conference and Exhibition, AWMA*, June, 2534–2545.
15. Guzmán, Alberto Antonio Espinosa et. al,(2017).Modelado de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} mediante redes neuronales artificiales sobre clima tropical de San Francisco de Campeche, México.
16. Health Effects Institute Annual Report 2017, 2018 <https://www.healtheffects.org/publication/annual-report-2017>
17. Herrera Murillo, J.; Rojas Marín, J.F.; Rodríguez Román, S. and García Martínez, R. 2010. Sulfate, nitrate and chloride in PM₁₀ in the city of San José, Costa Rica: 2004-2006. *Atmósfera*, 23(1): 83-94.
18. Herrera-Murillo, Jorge y Rodríguez Román, Susana. 2009. Evaluación de los niveles de partículas de PM₁₀ y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de San José, Costa Rica: 2005-2006. *Tecnología en Marcha*, 22(3): 42-55.
19. INEGI, (2020). (<https://www.inegi.org.mx/default.html>)
20. International Agency for Research on Cancer (IARC). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Comunicado de Prensa. (2013). Francia. http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf
21. J. D. Herner, et al.(2005) “Size and composition distribution of airborne particulate matter in Northern California: I—particulate mass, carbon, and water-soluble ions,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 55, no. 1, pp. 30–51.

22. Johnson, T. M., Guttikunda, S., Wells, G. J., Artaxo, P., Bond, T. C., Russell, A. G., Watson, J. G., & West, J. (2011). Tools for Improving Air Quality. World, March, 1–177.
23. Legarreta, et al.(2015). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Culcyt/ Medio Ambiente*, 56 (1), 234-245.
24. LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA), Actualizada 2021.
25. Magaña, E., Carrera, J. y Ramos, S. (2013). Estudio de tendencia de la PM10 y su impacto a la salud en las tres zonas metropolitanas de México durante 2005-2009. *KUXULKAB' Revista de Divulgación de la División Académica de Ciencias Biológicas*, 19(37), 3-14
26. Niu F, Li Z, Li C, Lee KH, Wang M (2010) Aumento de la niebla invernal en China: impactos potenciales del debilitamiento de la circulación monzónica de Asia oriental y el aumento de la carga de aerosoles. *J Geophys Res* 115:D00K20. <https://doi.org/10.1029/2009JD013484>
27. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación, 2014.
28. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
29. Organización mundial de la salud, contaminación del aire ambiente (exterior), 2021 ([https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)).
30. Ostro B, Hu J, Goldberg D, Reynolds P, Hertz A, Bernstein L, Kleeman MJ. (2015). Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: results from the California Teachers Study cohort. *Environ Health Perspect* 123:549–556; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408565>

31. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Sonora (Pro Aire) 2017-2026, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310199/23_ProAire_Sonora.pdf.
32. Programa de las Naciones para el Medio Ambiente -PNUMA.(2010) “Perspectivas del Medio Ambiente: América Latina y el Caribe Geo ALC 3”. 380 pp.
33. Ramanathan, V. and Carmichael, G.: Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geosci.*, 1, doi:10.1038/ngeo156, 2008.
34. Ramírez Leal, Roberto. 1986. Estudio preliminar de evaluación de la calidad del aire en la cd. de Saltillo, Coah., México. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
35. Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Moreno, T., Silva, L. F., & de la Rosa, J. D. (2019). Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of The Total Environment*, 652, 434– 446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.214>
36. Ríos, L. (2020). Correlación entre las variables meteorológicas y concentración de los contaminantes atmosféricos, en el distrito de villa maría del triunfo, en mayo de 2018. (Tesis de pregrado). Lima, Perú.
37. Salazar, S., & Bravo, J. L. (1986). Sulfatos y nitratos en partículas atmosféricas y su relación con algunos parámetros ópticos. *Geofísica Internacional*, 25(3), 455-469.
38. Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis (2006), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd ed., John Wiley, New York. Stolzenburg, M. R., and S. V. Hering (2000), Method for the automated measurement of fine particle nitrate in the atmosphere, *Environ. Sci.Technol.*, 34, 907–914, doi:10.1021/es990956d.
39. Shahid, I., Kistler, M., Mukhtar, A., Ghauri, B. M., Ramirez-Santa Cruz, C., Bauer, H., & Puxbaum, H. (2016). Chemical characterization and mass closure of PM10 and PM2.5 at an urban site in Karachi - Pakistan. *Atmospheric Environment*, 128, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.005>

40. Shi G, Xu J, Peng X, Xiao Z, Chen K, Tian Y, Guan X, Feng Y, Yu H, Nenes A, Russell AG (2017) pH de los aerosoles en una atmósfera contaminada: contribuciones de la fuente al aerosol altamente ácido. *Tecnología de ciencia ambiental* 51(8):4289–4296
41. Souza Achilleos.(2014). PM10 concentration levels at an urban and background site in Cyprus: The impact of urban sources and dust storms, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64:12, 1352-1360, DOI: 10.1080/10962247.2014.923061B.
42. Stevens, G.A.; Dias, R.H. & Ezzati, M. 2008. The effects of 3 environmental risks on mortality disparities across Mexican communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105(44): 16860-16865
43. T. Beer.(2001) *Air Quality as a Meteorological Hazard Natural Hazards*, 23 pp. 157-169
44. Tavares, M., Costa, C., Basílio, M., Nóbrega, B. Vieira, J. y Silva, E. (2018). Análise temporal das condições meteorológicas e concentração de Material Particulado (MP10) na Região Metropolitana de São Paulo - SP. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(4); 1226-2240.
45. US EPA,(2019) Integrated Science Assessment for Particulate Matter. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=539935.
46. Vargas, F. A., & Rojas, N. Y. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 105–115.
47. Vargas, F. A., Rojas, N. Y., Pachon, J. E., & Russell, A. G. (2012). PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmospheric Pollution Research*, 3(1), 72–80. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>
48. Wang, Y., Ying, Q., Hu, J. y Zhang, H. (2014). Variaciones espaciales y temporales de seis contaminantes atmosféricos de criterio en 31 capitales de

- provincia de China durante 2013-2014. *Medio ambiente internacional* , 73 , 413-422.
49. World Health Organization.(2006) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update.
50. Xu W, Liu X, Liu L, Dore AJ, Tang A, Lu L, Wu Q, Zhang Y, Hao T, Pan Y, Chen J, Zhang F (2019) Impacto de los controles de emisiones en la calidad del aire en Beijing durante APEC 2014 : implicaciones de iones solubles en agua y aerosoles carbonosos en PM 2.5 y sus precursores. *Ambiente Atmos* 210: 241–25

ANEXOS

Cumplimiento gradual para los valores límite de PM10 en el aire ambiente

Contaminante	Concentración	Año 1 ^a	Año 3 ^a	Año 5 ^a
PM10 (µg/m ³)	24 h	70	60	50
	Anual	36	28	20

Figura 20. Anexo 1. **Cumplimiento** gradual para valores límite de PM10 en el aire ambiente (NOM-025-SSA1-2021).

GLOSARIO

Conceptos básicos. Es importante analizar varios conceptos básicos muy importantes relacionados con el tema de contaminación del aire, que se verán a lo largo de la investigación los cuales nos ayudarán a tener un mejor entendimiento del tema del material suspendido PM10

Concentración de PM10: La concentración de las partículas PM10 deben ser menor o igual a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los promedios de 24 horas y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual. Para partículas PM2.5, los promedios de 24 horas en el año, no deben exceder 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para el promedio anual 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (NOM-025-SSA1-2014).

Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico (LGEEPA, 2021).

Contaminación del aire: Es un problema ambiental y social muy importante y, al mismo tiempo, es un problema complejo que plantea múltiples desafíos en términos de gestión y mitigación de contaminantes nocivos. Los contaminantes del aire son emitidos por fuentes antropogénicas y naturales; ellos pueden ser emitidos directamente (contaminantes primarios) o formados en la atmósfera (como contaminantes secundarios). Tienen una serie de impactos en la salud, los ecosistemas, el entorno construido y el clima; pueden ser transportados o formados a largas distancias; y ellos pueden afectar grandes áreas (EPA, 2016).

Iones solubles en agua: Son principalmente sulfatos, nitratos, amonio, Na^+ , K^+ , Cl^- , entre otros. Representan desde el 5% al 19% del material particulado. La composición porcentual de los iones sulfatos y nitratos en un estudio en el Valle de Aburrá varió desde un 14% a 19% en PM2.5 (Gómez et al. 2011).

Material suspendido: Es una mezcla de partículas sólidas y/o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera, las cuales varían en tamaño, forma, área superficial, composición química, solubilidad y origen (Pope III y Dockery, 2006). PM10: partículas inhalables, con diámetros generalmente de 10 micrómetros y menores (EPA, 2013).

PM2.5: partículas finas inhalables, con diámetros generalmente de 2.5 micrómetros y menores (EPA, 2013)