

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO**

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“EFECTO DE LA INVERSIÓN TÉRMICA EN EL GRADIENTE
VERTICAL DE CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PM₁₀ EN
AIRE AMBIENTE EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO”**

ASIGNATURA:

Tesis

PRESENTA:

JUBAL GABRIEL DÍAZ RUIZ

Hermosillo, Sonora

Noviembre, 2025

COMITÉ DE TESIS Y FIRMAS

Los miembros del Comité de Tesis del alumno JUBAL GABRIEL DÍAZ RUIZ recomendamos que el documento titulado: “EFECTO DE LA INVERSIÓN TÉRMICA EN EL GRADIENTE VERTICAL DE CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PM₁₀ EN AIRE AMBIENTE EN HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO, sea aceptado como Requisito Parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES.

Director de tesis

Dr. Martín E. Cruz Campas

Sinodal

Dra. Carmen Isela Ortega Rosas

Sinodal

Dr. Roberto Ramírez Leal

Sinodal

Dr. Alberto Macías Duarte

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Estatal de Sonora (UES), por ser mi casa de estudios desde la licenciatura y ahora en la Maestría en Ciencias Ambientales. Le debo gran parte de mi formación académica y profesional, también por haber financiado los equipos de monitoreo utilizados en esta investigación y por prestar sus instalaciones, necesarias para la realización de los vuelos y el desarrollo de este trabajo.

Agradezco sinceramente al personal docente de la UES por su dedicación y compromiso con la enseñanza y la ciencia. En especial, al Dr. Martín E. Cruz Campas, mi director de tesis, por su paciencia, vocación por enseñar, compartir sus experiencias, acompañamiento y valiosas orientaciones durante todo el proceso de investigación.

Extiendo también mi reconocimiento a los sinodales: Dra. Carmen Isela Ortega Rosas, Dr. Roberto Ramírez Leal, Dr. Alberto Macías Duarte, y de manera especial al Dr. Oscar G. Gutiérrez Ruacho, por sus observaciones, tiempo y aportaciones que enriquecieron este trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado durante mis estudios de posgrado, así como por su esfuerzo continuo para fortalecer la investigación científica en México y formar nuevas generaciones de investigadores comprometidos con el país.

A la Dra. Ma Guadalupe González y al Ing. Iván Barrios, por su mentoría y haberme permitido realizar mi servicio de retribución social en proyecto de la Secretaría de Educación y Cultura

Finalmente agradezco también a mis compañero y compañeras Óscar, Alicia, Ana Lilia y Gabriela, quienes hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable dentro y fuera del aula. Por esos desvelos dentro y fuera del salón de clases, y por último a Karina, por todas esas ocasiones que me apoyo cargando y resguardando los equipos.

DEDICATORIA

A Paloma Estrada, mi esposa, por su paciencia, su fe en cada uno de mis proyectos y por acompañarme en cada etapa de este camino.

A Martha Ruiz, mi mamá, por su amor incondicional y por recibirmelos cada mañana con un buen desayuno durante los días de monitoreo.

A Alejandro Díaz, mi papá, por apoyarme en todo momento y celebrar mis logros como si fueran suyos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	2
III. MARCO TEÓRICO	5
III.1. Gradiente adiabático de temperatura e inversión térmica	5
III.2. Efectos de la inversión térmica en la contaminación	6
III.3. Abordajes metodológicos para el estudio de inversión térmica.....	8
III. 4. Uso de drones con sensores para el estudio de la inversión térmica...	8
III. Calidad del aire en Hermosillo.....	9
IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
V. JUSTIFICACIÓN	17
VI. HIPÓTESIS.....	19
VII. OBJETIVOS.....	20
VII.1. Objetivo general	20
VII.2. Objetivos Específicos	20
VIII. METODOLOGÍA.....	21
VIII.1. Diseño del estudio	21
VIII.2. Localización del área de estudio	21
VIII.3. Climatología y meteorología del área de estudio	22
VIII.4. Equipos de monitoreo	23
VIII.4.1. DR2000 Flying Lab.....	23
VIII.5. Variables e indicadores	25

VIII.6. Procedimiento del monitoreo	25
VIII.6.1. Periodo de monitoreo	25
VIII.6.2. Procedimiento de despegue y ascenso	26
VIII.6.3. Control de calidad	26
VIII.7. Análisis estadísticos	27
VIII.7.1. Procesamiento de datos	27
VIII.7.2. Análisis del gradiente térmico vertical.....	28
VIII.6.3. Variación del gradiente térmico vertical	28
VIII.7.4. Relación entre la concentración de PM ₁₀ y el gradiente vertical de temperatura.....	29
VIII.7.5. Determinación de la relación entre concentración de PM ₁₀ con el gradiente térmico vertical	30
IX. RESULTADOS	31
IX.1. Monitoreo de PM ₁₀ y temperatura	31
IX.2. Análisis del gradiente térmico vertical	31
IX.3. Variación del gradiente térmico vertical.....	33
IX.4. Relación entre la concentración de PM ₁₀ y el gradiente vertical de temperatura.	36
IX.5. Determinación de la relación entre concentración de PM ₁₀ con el gradiente térmico vertical	37
IX.6. Comparación de valores máximos de concentración de PM ₁₀ por cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	38
IX.7. Análisis estadístico de máximos de concentración de PM ₁₀ de cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	40
IX.8. Comparación de percentil 95 de concentración de PM ₁₀ por cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	40

IX.9. Análisis estadístico del percentil 95 de concentración de PM ₁₀ por vuelo, considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	42
IX.10. Determinación de la relación entre el valor de Percentil 95 de la concentración de PM ₁₀ con el valor de la pendiente del gradiente vertical de temperatura.	42
X. DISCUSIONES.....	45
X. 1. Monitoreo de PM ₁₀ y temperatura.....	45
X.2. Análisis del gradiente térmico vertical.....	45
X.3. Variación del gradiente térmico vertical	46
X.4. Comparación de promedios de concentración de PM ₁₀ considerando ausencia y presencia de inversión térmica	46
X.5. Análisis estadístico de promedios de concentración de PM ₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	47
X. 6. Comparación de valores máximos de concentración de PM ₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	47
X. 7. Análisis estadístico de máximos de concentración de PM ₁₀ por vuelo con considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	48
X.8. Comparación de percentil 95 de concentración de PM ₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	48
X.9. Análisis estadístico de percentil 95 de concentración de PM ₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.....	48
X.10. Determinación de la relación entre el valor de Percentil 95 de la concentración de PM ₁₀ con el valor de la pendiente del gradiente vertical de temperatura.	49
XI. CONCLUSIONES.....	50
XII. LITERATURA CITADA	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplificación de un perfil vertical de temperatura en la atmósfera a nivel tropósfera y estratosfera.....	6
Figura 2. Esquema comparativo entre condiciones con y sin inversión térmica.....	7
Figura 3. Mapa de localización del área de estudio.....	22
Figura 4. Laboratorio aéreo DR2000 instalado en un dron DJI® Inspire 2.....	23
Figura 5. Fotografía del DR2000 durante la calibración a cero.....	27
Figura 6. Gráfica del gradiente térmico vertical los vuelos realizados durante Sep 2023 – Ago 2024 en Hermosillo, Sonora	32
Figura 7. Variación diaria y estacional del gradiente vertical de temperatura (pendiente) para cada vuelo realizado (varios por día). Pendiente positiva significa a mayor altura mayor temperatura y pendiente negativa significa a mayor altura menor temperatura. Los puntos sin relleno negro, situados cerca de la línea de valor cero, representan valores de pendientes que no son estadísticamente diferentes a cero, considerando un nivel de confianza del 95%	33
Figura 8. Cantidad de inversiones térmicas por mes durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora	35
Figura 9. Tendencia de cantidad de días con presencia de inversión térmica según hora durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora	36
Figura 10. Comparación de los valores promedio de concentración de PM ₁₀ por vuelo bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora.....	37
Figura 11. Comparación de los valores máximos de concentración de PM ₁₀ por vuelo, bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora.....	39
Figura 12. Comparación de los valores del percentil 95 de concentración de PM ₁₀ por vuelo, bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora.....	41

Figura 13. Relación entre la concentración de PM₁₀ (Log de Percentil 95) con el valor de la pendiente (m) del gradiente vertical de temperatura (°C/m) obtenidos en cada vuelo durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora....43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cumplimiento gradual para los valores límite de PM ₁₀ y PM _{2.5} en el aire ambiente. Fuente: NOM-025-SSA1-2021	12
Tabla 2. Características técnicas de los sensores del Laboratorio aéreo DR2000 ...	24

I. RESUMEN

El presente estudio investiga el efecto de la inversión térmica en la calidad del aire mediante el monitoreo de la concentración de partículas PM₁₀ en la porción norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Se utilizó un sensor de luz dispersa montado en un Vehículo Aéreo No Tripulado (dron), junto con sensores que miden las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa y presión barométrica. Se realizaron 55 días de monitoreo en perfiles verticales de concentración de PM₁₀ desde el mes de agosto de 2023 hasta agosto de 2024. Los resultados indican que las concentraciones de PM₁₀ alcanzaron su punto máximo entre octubre y abril, coincidiendo con otoño e invierno.

Para definir los eventos de inversión térmica se utilizaron los valores de la pendiente calculados a partir de los perfiles verticales de temperatura. Durante estos meses, se detectaron 114 gradientes inversos de temperatura, asociados la inversión térmica detectado principalmente a las entre 6:00 a las 9:00 horas.

En el análisis estadístico se utilizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, utilizado con datos no paramétricos, usado para calcular la diferencia en escenarios con y sin inversión térmica. Se determinó que existe diferencia significativa en la concentración de PM₁₀ comparando escenarios de presencia o ausencia de inversión térmica, resultando los valores máximos y constantes durante las condiciones de inversión.

Se determinó que, en presencia del fenómeno de inversión térmica, las concentraciones de partículas PM₁₀ en la atmósfera aumentan debido a la estratificación del aire según su temperatura, lo cual limita la dispersión vertical de estos contaminantes.

Palabras clave: *Calidad del aire, Inversión térmica, Partículas PM₁₀.*

II. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire puede verse afectada tanto por fenómenos naturales como antropogénicos. En la actualidad, la contaminación atmosférica es un tema de interés mundial debido a que en zonas urbanas puede alcanzar concentraciones que generen impactos negativos a la salud poblacional y medio ambiente. La Organización Mundial de la Salud estimó que el índice de enfermedades de origen cardiovascular, pulmonar obstructiva crónica, asma en niños, cáncer pulmonar, isquémica del corazón y enfermedades respiratorias de vías aéreas inferiores pueden ser atribuidas a la contaminación del aire (WHO, 2016).

La contaminación atmosférica generada por la concentración de partículas suspendidas en el aire es uno de los parámetros que con mayor frecuencia se miden cuando se realiza un estudio relacionado con calidad del aire. Las partículas en el aire se clasifican conforme su tamaño y se da mayor importancia a las que son de un diámetro aerodinámico equivalente igual o menor a 10 μm , denominadas PM₁₀. A este tipo de partículas se le atribuye como uno de los causantes de enfermedades respiratorias debido a que por su diminuto tamaño tienen la capacidad de entrar en la fracción respirable del ser humano (van Donkelaar et al., 2016).

Las áreas urbanas son los sitios donde hay mayor densidad poblacional, tráfico vehicular y actividad industrial, las cuales son actividades que afectan directamente a la calidad del aire. Aunado a lo anterior, existen fenómenos meteorológicos que influyen en la concentración de contaminantes atmosféricos, entre ellos la inversión térmica. Este fenómeno natural forma una capa de aire caliente en la tropósfera que por densidad impide la dispersión vertical del aire y eleva las concentraciones de contaminantes atmosféricos en zonas someras (Feng, et al., 2020).

El aire es generalmente más frío a mayor altura, fenómeno conocido como gradiente vertical de temperatura. La fuente de calor en este caso es irradiación del suelo y conforme el aire se aleja de él se hace más frío mediante un proceso adiabático. En días con inversión térmica no se obedece a este principio, sino que conforme el aire se eleva aumenta su temperatura. La inversión térmica se da en sitios donde ocurren cambios de temperatura muy

abruptos. Durante el día, los suelos concentran calor proveniente de la radiación solar y esta se dispersa durante la noche. Cuando la temporada nocturna es prolongada, el suelo tiene mayor tiempo para disipar el calor absorbido durante el día, provocando un choque térmico al momento de comenzar a recibir rayos solares. Las capas formadas por el choque térmico entre las masas de aire frío y caliente se superponen entre sí por diferencias en su densidad. Este fenómeno ocurre durante lapsos del día y desaparece conforme la temperatura va homogenizándose hasta el punto en el que las capas desaparecen (Ledesma, 2011).

Cuando la inversión térmica ocurre en áreas urbanas, impide la dispersión de contaminantes y los mantiene en áreas someras susceptibles al contacto con la población. Es común ver que se presenta, por ejemplo, en la zona metropolitana del valle de México que actualmente cuenta un serio problema de calidad del aire provocado por una inmensa densidad poblacional en combinación de los parámetros meteorológicos del área. Es tan grande la problemática que emiten alertas de contingencia ambiental y restringen el tráfico vehicular para tratar de mitigar la concentración de contaminantes atmosféricos (Navarro, 2019).

La inversión térmica puede tener consecuencias más graves para los habitantes de ambientes urbanos en zonas áridas, donde la baja humedad y precipitación propician la suspensión y acumulación de polvo. La ciudad de Hermosillo, ubicada al noroeste de México, presenta un clima desértico y a lo largo de las temporadas de otoño – invierno se dan las condiciones adecuadas para la inversión térmica (Gutiérrez Ruacho et al. 2018). Durante estas temporadas del año hay días en los que se crea una capa de partículas de polvo sobre la ciudad y es posible identificarla visualmente. Se han realizado diversos estudios de monitoreo de calidad de aire con PM₁₀ en las que coinciden mayores índices de concentración durante estas temporadas. Se considera que este patrón de mayores concentraciones puede ser atribuible a la inversión térmica, concentrando mayor cantidad de partículas debajo de las masas de aire formadas por este fenómeno (Santos Romo, 2006).

Las estaciones de monitoreo de la ciudad toman muestras a una misma elevación, y generalmente están situadas en las azoteas de edificios. Estos estudios han abordado la calidad del aire desde un enfoque somero, dejando un vacío en la información que se tiene

sobre la distribución vertical de partículas contaminantes en la atmósfera. Un estudio realizado por Samad et al. (2022), se centró en el diseño de sensores meteorológicos para temperatura, presión barométrica y humedad relativa, así como sensores ópticos para medir la concentración de partículas PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}, correlacionando las variables meteorológicas con las concentraciones de partículas. El estudio correlacionó estos datos con las lecturas de PM₁₀ obtenidas en estaciones de monitoreo situadas en las azoteas de edificios distribuidos por la ciudad, proporcionando una comprensión más detallada de la relación entre la inversión térmica y la concentración de contaminantes atmosféricos

En el presente estudio se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), comúnmente conocidos como drones, equipado con un sensor de luz dispersa, para realizar mediciones sistemáticas de la concentración de partículas PM₁₀ a diferentes alturas, desde el nivel del suelo hasta los 120 m. Además, se emplearon sensores para medir variables meteorológicas clave, como la temperatura, la humedad relativa y la presión barométrica, que permitirán identificar días con inversión térmica a partir del gradiente vertical de temperatura.

Este trabajo se realiza con el fin de obtener información nueva referente a la concentración de contaminantes en el perfil vertical de la ciudad de Hermosillo, también podrá servir como base para elaborar modelos predictivos de inversiones térmicas. Además, proporcionará información relevante para la formulación de políticas de gestión ambiental y estrategias de mitigación que ayuden a la salud poblacional.

III. MARCO TEÓRICO

III.1. Gradiente adiabático de temperatura e inversión térmica

El gradiente adiabático describe la variación de temperatura del aire en la altura. El cambio de temperatura ocurre bajo condiciones adiabáticas, es decir, en parcelas de aire donde no hay intercambio de calor. Este concepto se rige directamente de la ley de la termodinámica. Al nivel de la tropósfera, el gradiente adiabático generalmente es positivo, donde a mayor altura la temperatura va disminuyendo. Por otro lado, se define como negativo cuando la temperatura incrementa en la altura, esta condición es conocida como inversión térmica.

El valor promedio del gradiente de temperatura en condiciones ambientales a nivel de tropósfera de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, aunque puede variar dependiente de la ubicación geográfica, el día, la hora y temporada del año. Cuando la temperatura disminuye en la altura se considera que la atmósfera es inestable, pues hay mezcla vertical del aire, por otro lado, cuando la temperatura aumenta se asocia con condiciones de atmósfera estable (Petty, 2008). Se presenta un perfil atmosférico típico de temperatura, donde ésta va disminuyendo progresivamente con algunos pequeños lapsos de inversión térmica señalados a nivel troposférico y otros más constantes en estratosfera (Fig. 1).

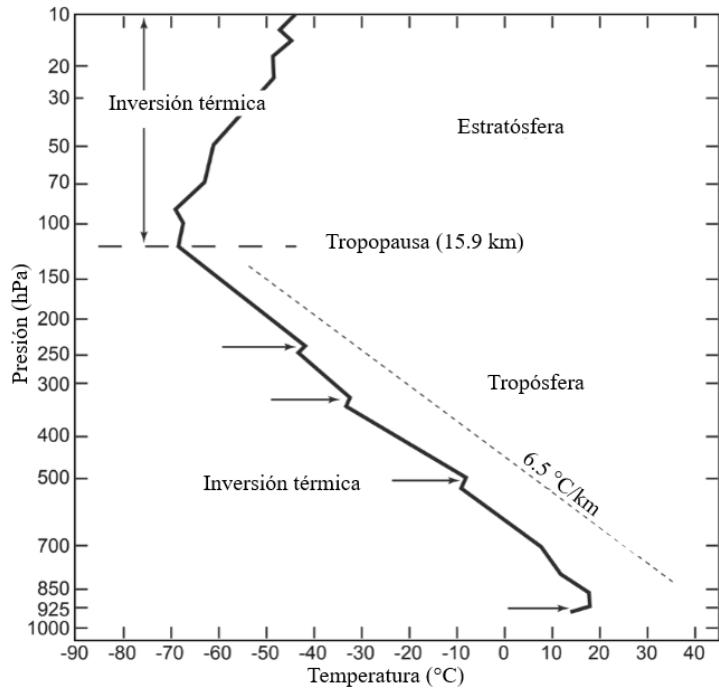


Figura 1. Ejemplificación de un perfil vertical de temperatura en la atmósfera a nivel tropósfera y estratosfera.

*Nota: Adaptado de *A First Course in Atmospheric Thermodynamics*, por G. W. Petty, 2008, Sundog Publishing.*

La inversión térmica es un fenómeno natural que ocurre cuando la temperatura del aire aumenta con la altura, contrario al gradiente adiabático positivo de temperatura. La razón principal para la formación de inversiones térmicas son consecuencia de la radiación. Durante las noches la temperatura del suelo se enfriá generando una capa de aire frío en niveles bajos de la atmósfera bajo otra más cálida. Este tipo de condiciones son temporales y suelen desaparecer con el calentamiento solar.

III.2. Efectos de la inversión térmica en la contaminación

La inversión térmica es uno de los fenómenos naturales que mayor influencia tienen en la calidad del aire urbano. Durante los episodios de inversión térmica se restringe la mezcla vertical del aire, atrapando las emisiones generadas por el tráfico vehicular, quemas clandestinas, emisiones domésticas e industriales. Estudios realizados en Europa indicaron

que el 80% de los días que registraron mayores concentraciones de PM_{10} fueron durante episodios de inversión térmica principalmente en invierno (Lagmiri y Dahech, 2024).

En Vietnam se registraron resultados semejantes, donde las inversiones térmicas se registraron principalmente en temporadas frías, en condiciones meteorológicas con baja actividad de vientos, alta humedad, y baja radiación solar, favoreciendo la estabilidad atmosférica (Thi Thuy et al., 2018). Es importante señalar que el horario de manifestación de inversiones térmicas generalmente es durante las mañanas, coincidiendo con los horarios de mayor aforo vehicular, así como las actividades industriales, de construcción y domésticas. Se ilustra de forma comparativa las condiciones del comportamiento atmosférico durante inversiones térmicas y en situaciones “normales” o de gradiente adiabático positivo (Fig. 2).

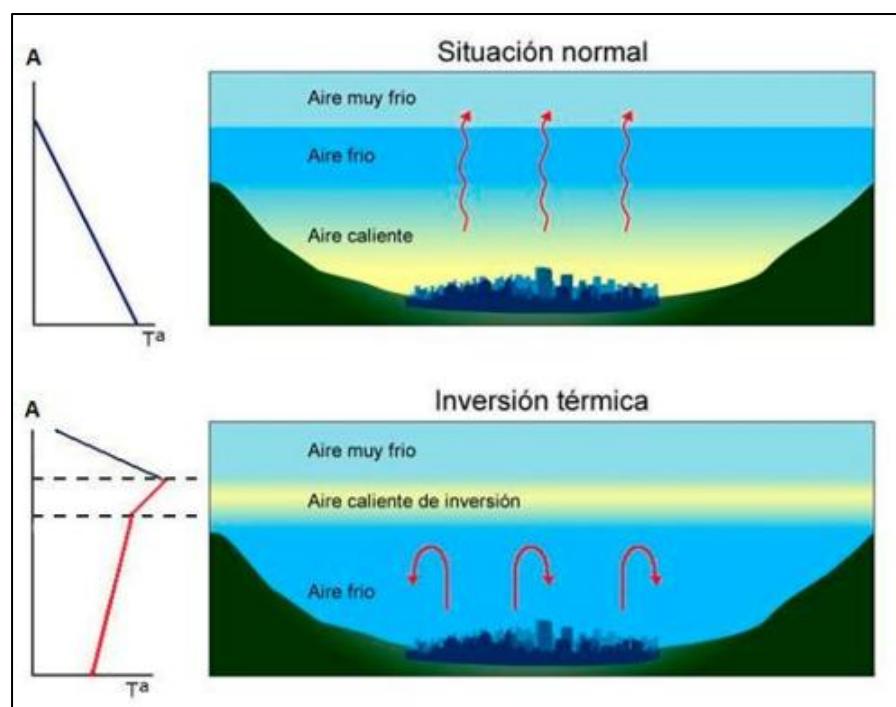


Figura 2. Esquema comparativo entre condiciones con y sin inversión térmica.

Nota. Tomado de Meteorología y contaminación atmosférica, por J. L. Dueñas Puentes, 2013.

III.3. Abordajes metodológicos para el estudio de inversión térmica

El método tradicional para realizar estudios en la atmósfera es mediante radiosondas. Este método consiste en la instalación de sensores aerotransportados en globos llenos de gas ligero como hidrógeno o helio, alcanzando alturas de hasta 35 km. El monitoreo proporciona información detallada de perfiles verticales de temperatura, humedad relativa, presión, velocidad y dirección del viento. En Estados Unidos, Li et al. (2019) analizaron más de 20,000 radiosondeos, logrando determinar la frecuencia, espesor, y gradiente térmico de las inversiones.

III. 4. Uso de drones con sensores para el estudio de la inversión térmica

Los desarrollos tecnológicos han generado avances significativos en los estudios de la atmósfera, como es el caso del uso de drones para la generación de perfiles verticales de variables meteorológicas y contaminantes. Los drones ofrecen más control y precisión de los datos, lo que representa una herramienta ideal para identificar capas de inversión térmica. El uso de estos equipos permite identificar la dinámica del gradiente de temperatura y evaluar su relación con la concentración de partículas (Woo Young et al. 2025).

Estudios con drones y sensores realizados por Tikhomirov et al. (2021) en zonas muy frías del ártico canadiense, permitieron identificar gradientes térmicos en un rango de 10 – 30°C cada 100 m. Las mediciones obtenidas fueron validadas con radiosondeos realizados por la zona, confirmando que el uso de estos equipos puede complementar a los métodos tradicionales para el monitoreo de la atmósfera.

Feng, et al. (2020) señalan la posibilidad de utilizar drones equipados con sensores de luz dispersa para medir la concentración de material particulado en tiempo real. Esta técnica se basa en la medición de la cantidad de luz dispersada por las partículas en la atmósfera y se puede utilizar para obtener perfiles verticales de la concentración de material particulado. Samad, et al. (2022) proponen el uso de un dron equipado con sensores para medir la calidad del aire.

El estudio sugiere que los drones pueden ser una herramienta efectiva para medir la calidad del aire en zonas de difícil acceso, como áreas urbanas con mucho tráfico. La utilización de los drones permite una medición tridimensional de la calidad del aire, lo que

puede proporcionar información más precisa y detallada que los métodos de monitoreo tradicionales.

III. Calidad del aire en Hermosillo

La calidad del aire es un aspecto fundamental para el bienestar humano y ambiental, ya que influye directamente en la salud pública y en los ecosistemas. La contaminación atmosférica propicia una mala calidad del aire y ha sido identificada por la Organización Mundial de la Salud como una de las principales causas de enfermedades respiratorias y cardiovasculares a nivel global, contribuyendo a millones de muertes prematuras cada año (WHO, 2016). Entre los contaminantes atmosféricos más preocupantes se encuentran las partículas en suspensión, especialmente las PM₁₀ (partículas con un diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros), debido a que por su diminuto tamaño cuentan con la capacidad para penetrar en el sistema respiratorio y provocar diversas afecciones de salud (Pope y Dockery, 2006).

Las condiciones meteorológicas desempeñan un papel crucial en la dispersión y concentración de los contaminantes atmosféricos. La temperatura influye en la estabilidad atmosférica y en los procesos de convección, afectando la capacidad del aire para diluir y dispersar los contaminantes (Seinfeld y Pandis, 2016). El aumento de la temperatura puede mejorar la dispersión vertical mediante la generación de corrientes de aire ascendentes, mientras que temperaturas más bajas pueden conducir a condiciones más estables y, por lo tanto, a una mayor concentración de contaminantes en superficies cercanas al suelo (Jacobson, 2002).

La humedad relativa también afecta la calidad del aire al influir en la formación y transformación de aerosoles atmosféricos. Altos niveles de humedad pueden promover la higroscopidad, es decir, la capacidad de las partículas de absorber humedad del aire, aumentando su tamaño y cambiando sus propiedades ópticas y químicas, lo que puede agravar los efectos sobre la salud y reducir la visibilidad (Tang et al., 2016). Por otro lado, bajas condiciones de humedad pueden limitar estos procesos, afectando la dinámica y persistencia de los contaminantes en la atmósfera (Hinds, 1999).

La presión barométrica está asociada con la estructura vertical de la atmósfera y puede influir en la dispersión de los contaminantes. Altas presiones suelen estar vinculadas a condiciones atmosféricas estables con poca mezcla vertical, favoreciendo la acumulación de contaminantes en las capas bajas de la atmósfera (Wallace y Hobbs, 2006). En contraste, bajas presiones suelen asociarse con sistemas convectivos y mayor turbulencia, lo que facilita la dispersión y dilución de los contaminantes atmosféricos (Stull, 1988).

Un fenómeno meteorológico particularmente relevante para la calidad del aire es la inversión térmica, que ocurre cuando una capa de aire más cálido se sitúa sobre una capa de aire más frío cerca de la superficie terrestre. Esta configuración impide la mezcla vertical del aire y actúa como una tapa que atrapa los contaminantes en las capas bajas de la atmósfera, lo que conduce a una concentración elevada de contaminantes y episodios severos de mala calidad del aire. Las inversiones térmicas son comunes en áreas como valles rodeados de montañas, donde las condiciones geográficas y meteorológicas favorecen su formación y persistencia (Whiteman et al., 2014).

Diversos estudios han explorado la relación entre las inversiones térmicas y la concentración de contaminantes atmosféricos, destacando su impacto significativo en la calidad del aire. Por ejemplo, Feng et al. (2020) analizaron las características de las inversiones térmicas en la cuenca del Río Sichuan, China, y encontraron que la frecuencia y duración de estas inversiones están estrechamente relacionadas con incrementos sustanciales en las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} durante el invierno.

En México, durante la década de 1990, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE, gobierno federal) realizó un monitoreo de las PM₁₀ en la ciudad de Hermosillo de 1994-1995. Las muestras tomadas desde el Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, (actualmente la UES) arrojaron una concentración promedio máxima en 24 horas de 189.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y concentración promedio anual máxima de 83.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En esos tiempos, la norma que regulaba las PM₁₀ y PM_{2.5} era la NOM-025-SSA1-1993, que establecía los límites máximos permisibles durante 24 horas y un año, siendo 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondientemente. Durante el periodo muestreado, solamente se rebasó el límite máximo permisible en una sola ocasión (SEMARNAP, 1996). En el 2021 entró en vigor la actualización de la NOM-025-SSA1, la cual establece nuevos límites a permisibles (Tabla 1).

Tabla 1. Cumplimiento gradual para los valores límite de PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente. Fuente: NOM-025-SSA1-2021

Contaminante	Concentración	Año 1 ^a	Año 2 ^a	Año 3 ^a
PM ₁₀ (μg/m ³)	24 h	70	60	50
	Anual	36	28	20
PM _{2.5} (μg/m ³)	24 h	41	33	25
	Anual	10	10	10

Es evidente el cambio entre la norma de 1993 a la del 2021. Los límites en la concentración establecidos en las normas han ido decreciendo, intentando adaptarse a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Dentro de las directrices recomendadas por la OMS para calidad del aire se establecieron los niveles recomendados para concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}. El límite promedio anual es de 15 µg/m³ y 5 µg/m³ y en 24 horas por 45 µg/m³ y 15 µg/m³ para PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente (WHO, 2021).

El Programa de Monitoreo de Calidad del Aire (PEMCA) en la ciudad de Hermosillo, realizado por el municipio, mide a través de una red manual la concentración de partículas en suspensión presentes en el aire. Las estaciones utilizan un muestreador de alto volumen que capta en un filtro las partículas suspendidas. Durante el año 2005 se realizó un programa de monitoreo de PM₁₀ en el mes de julio, donde se detectó una concentración de 87.45 µg/m³ en la estación ubicada en el Plantel Villa de Seris del Colegio de Bachilleres del Estado de Sonora, al sur de la ciudad. En diciembre de ese mismo año se realizó una segunda ronda de monitoreo arrojando concentraciones ligeramente mayores a las tomadas en el verano. En este segundo periodo se obtuvieron muestras que rebasaron los límites establecidos en la norma vigente esas fechas, equivalente a 120 µg/m³. En la estación de monitoreo ubicada en CESUES, se obtuvo una muestra con una concentración de 168.45 µg/m³ (Santos Romo, 2006).

La ciudad de Hermosillo es una de las 10 ciudades más cálidas del mundo (Gutiérrez Ruacho et al., 2018), debido a esto representa particularidades de interés científico. Se realizó un análisis de la variabilidad de las temperaturas y lluvias en la ciudad, así mismo, durante la investigación se analizó también su correlación con las PST, como partículas de polen y esporas. Las concentraciones más altas de PST ocurrieron en el mes de abril de 2014, obteniendo concentraciones de hasta 750.91 µg/m³, coincidiendo también con las temporadas otoño – primavera (Gutiérrez Ruacho et al., 2018).

El Instituto Municipal de Ecología en conjunto con el PEMCA publicó las concentraciones promedio anual par partículas PM₁₀. Durante el 2017 la estación que registró el mayor promedio anual fue la de Villa Bonita con 75.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el menor promedio fue la estación ubicada en el Centro de Hermosillo con 39.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A pesar de lo que se creería debido a los problemas de contaminación actuales en el mundo, el promedio anual en las estaciones del PEMCA en Hermosillo tienden a la baja (Instituto Municipal de Ecología, 2017).

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las altas concentraciones de partículas respirables en el aire ambiente representan un riesgo significativo para la salud de la población. En la ciudad de Hermosillo, Sonora, es fundamental investigar si las condiciones meteorológicas que favorecen la formación de inversión térmica debido a que aumenta las concentraciones de partículas PM₁₀.

De confirmarse esta relación, resulta sumamente relevante analizar el comportamiento del fenómeno de inversión térmica a diferentes escalas temporales, como diaria, semanal, mensual y anual, y para entender su efecto en el gradiente vertical de las partículas respirables conocidas como PM₁₀. Este conocimiento establecerá bases científicas para la formulación de estrategias de prevención y mitigación eficientes por parte de los tomadores de decisión en materia de protección ambiental y de vigilancia de la salud de la población.

En la ciudad de Hermosillo, al ubicarse dentro de una zona desértica, se presentan cambios abruptos de temperatura, provocando choques térmicos en la estratificación de la atmósfera. Las temperaturas son muy altas en el día y bajas noches frías, durante las temporadas de otoño a invierno en el año, propiciando la formación de estratos de masa de aire de distinta temperatura y densidad. Estas son capas de aire caliente que se quedan atrapadas encima del aire frío, impidiendo que el aire contaminado se eleve y se disperse. Eso hace que la contaminación quede acumulada cerca del suelo, al alcance del área respirable de la población.

Aunque este fenómeno es común en climas áridos subtropicales como el de Hermosillo, todavía se sabe poco sobre cuándo pasa exactamente, cuánto dura o qué tanto influye en los niveles de PM₁₀. La mayoría de las estaciones de monitoreo solo miden a nivel del suelo, y por lo tanto no muestran lo que ocurre más arriba en la atmósfera, donde se forman estas capas de inversión.

En base a lo anterior, esta investigación busca analizar cómo se comportan estas inversiones térmicas y cómo afectan la concentración de partículas a diferentes alturas y en distintos momentos. En los últimos años, se ha innovado el monitoreo de calidad del aire, instalando sensores que midan temperatura, presión, humedad relativa y las partículas PM₁₀ en diferentes alturas para obtener una imagen más completa del aire que respiramos. Esto ayudaría a entender mejor por qué hay días más contaminados que otros, y cómo predecirlos.

V. JUSTIFICACIÓN

La calidad del aire depende de la presencia y concentración de contaminantes atmosféricos en el aire ambiente. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud cerca de 3.8 millones de muertes en el mundo al año son provocadas por mala calidad del aire (WHO, 2018). El movimiento de tierras, tráfico vehicular y procesos del sector industrial son actividades llevadas a cabo comúnmente en áreas urbanas y se identifican como fuentes potenciales de contaminantes atmosféricos. Las PM₁₀ se caracterizan por su tamaño y representan un mayor riesgo poblacional debido a que son partículas que entran en la fracción respirable.

Las condiciones climáticas son un factor que influye en la concentración de partículas en el aire. Es posible la presencia de días con el fenómeno de inversión térmica, durante los cuales se dificulta la dispersión de las emisiones de contaminantes atmosféricos. La ausencia de actividad de vientos y precipitaciones en combinación con relieves tenues, es decir, donde no se presenten abruptos en la topografía, propicia una concentración local de contaminantes atmosféricos. Los valles cumplen con este tipo de condiciones y es donde generalmente se dan estos casos (Giemsa et al., 2021). La ciudad de Hermosillo se encuentra ubicada en una planicie y montañas al este. Estas características en la orografía en conjunto con las condiciones meteorológicas mencionadas en párrafos anteriores podrían propiciar la formación de inversión térmica en la ciudad. Monitoreos previos indican el alza en la concentración de partículas PST durante la temporada de otoño a primavera (Gutiérrez Ruacho et al., 2018).

Es significativo conocer si la presencia de condición de inversión térmica tiene efecto en la concentración de los contaminantes, por ello es relevante analizar el comportamiento del fenómeno para entender su efecto en el gradiente vertical de concentración de las partículas respirables conocidas como PM₁₀. El presente trabajo encuentra su justificación al buscar generar nuevo conocimiento científico relacionado al entendimiento de una problemática ambiental de calidad del aire que podrá servir para la formulación de estrategias de mitigación eficientes por parte de los tomadores de decisión en materia de protección ambiental y de vigilancia de la salud de la población.

VI. HIPÓTESIS

Durante los episodios de inversión térmica en Hermosillo, Sonora, las concentraciones de partículas PM₁₀ en la atmósfera aumentan debido a la estratificación del aire según su temperatura, lo cual limita la dispersión vertical de estos contaminantes.

VII. OBJETIVOS

VII.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la inversión térmica en la concentración de partículas PM₁₀ considerando el gradiente vertical de temperatura mediante vuelos por Dron en la ciudad de Hermosillo, Sonora, a fin de determinar el posible aumento de concentración en ausencia y presencia de este fenómeno meteorológico.

VII.2. Objetivos Específicos

- 1) Monitorear la concentración de partículas PM₁₀ de 0 a 120 m de altura en la zona norte de Hermosillo, mediante sensor de dispersión laser montado en dron, a fin de conocer los valores de PM₁₀ en la columna vertical del aire ambiente en el sitio de estudio.
- 2) Identificar inversiones térmicas mediante el uso del valor de la pendiente de la variación del gradiente térmico vertical de 0 a 120 m en la columna vertical del aire ambiente mediante vuelos con dron, a fin de clasificar horas o días con presencia o ausencia de inversión térmica en el sitio de monitoreo.
- 3) Analizar los datos obtenidos para correlacionar las concentraciones de PM₁₀ con eventos de inversión térmica, utilizando herramientas estadísticas apropiadas a fin de identificar diferencia significativa en la concentración de partículas PM₁₀ durante presencia de dicho fenómeno meteorológico.

VIII. METODOLOGÍA

VIII.1. Diseño del estudio

Este estudio se enmarca en un enfoque observacional, diseñado para conocer los perfiles verticales de partículas PM₁₀ en función de la altura y la temperatura ambiental asociadas a dichas alturas. Utilizando dron equipado con sensores se realizan vuelos programados cada seis días durante un año completo, cubriendo así todas las estaciones del año y permitiendo un análisis exhaustivo de la variabilidad estacional. La selección del horario de monitoreo matutino, de 5:00 a.m. a 1:00 p.m., tiene como objetivo identificar los fenómenos de inversión térmica y las variaciones en la concentración de partículas cuando estos ocurren.

El monitoreo vertical de material particulado utilizando drones es una técnica cada vez más utilizada en la investigación y monitoreo de la calidad del aire. Se realizará un tipo de investigación de observación experimental haciendo trabajo de campo. Se tomarán lecturas de concentración de partículas PM₁₀ a diferentes alturas. Para los registros se utilizará sensores que miden temperatura ambiental instalados en el mismo dron.

En general, las investigaciones muestran un enfoque innovador para el monitoreo de la calidad del aire utilizando drones y sensores, lo que podría tener un gran potencial en la lucha contra la contaminación del aire y en la protección de la salud pública. En relación con lo anterior, se propone implementar esta metodología con el fin de contribuir con información valiosa para los tomadores de decisión en materia de calidad del aire.

VIII.2. Localización del área de estudio

El estudio se realizará al norte del área urbana de la ciudad de Hermosillo, Sonora, dentro de las instalaciones de la Universidad Estatal de Sonora (29° 7' 17.83"N, 110°57'49.91"O.



Figura 3. Mapa de localización del área de estudio.

VIII.3. Climatología y meteorología del área de estudio

La ciudad de Hermosillo tiene un clima desértico cálido según la clasificación climática de Köppen BWh (INEGI, 2016) con una temperatura media anual de 26.6°C y una precipitación media anual de 296.5 mm. Los veranos son extremadamente calurosos con temperaturas diarias que pueden superar los 40°C, mientras que los inviernos son suaves y secos, con temperaturas diarias que raramente bajan de los 5°C. Las lluvias son escasas y se concentran en los meses de verano y otoño, principalmente como resultado de la actividad ciclónica tropical.

La temperatura máxima histórica registrada en Hermosillo fue de 48,8°C el 26 de junio de 2016, mientras que la temperatura mínima histórica fue de -7,5°C el 16 de enero de 1962 (Servicio Meteorológico Nacional, 2022).

VIII.4. Equipos de monitoreo

VIII.4.1. DR2000 Flying Lab

Se utilizó un Laboratorio de Vuelo DR2000® (Scentroid, 2022) instalado en un dron DJI® Inspire 2 (Fig. 5) (SZ DJI Technology Co., Ltd., 2016). El DR2000 presenta un sistema de monitoreo que registra únicamente muestras de aire ambiente. La sonda integrada evita que el flujo de aire provocado por las hélices del dron interfiera en las lecturas. Durante el vuelo, analiza los datos de manera continua a una velocidad superior a 1 lectura por segundo y los transmite a la estación terrestre utilizando una transmisión de radio de largo alcance, lo que garantiza una transmisión segura y encriptada de los datos. Los datos se marcan automáticamente con información como la posición GPS, latitud, hora, fecha. Estos datos pueden ser utilizados para diversas aplicaciones exportados mediante el software DRIMS2.



Figura 4. Laboratorio aéreo DR2000 instalado en un dron DJI® Inspire 2.

Nota. Imagen tomada de DR2000 Flying Laboratory – Drone Based Air Quality Monitoring System, por Scentroid Inc. (2022).

El laboratorio aéreo DR2000 incluye un láser contador de partículas PM₁₀ y cuenta con una variedad de sensores posibles de instalar (Tabla 2).

Tabla 2. Características técnicas de los sensores del Laboratorio aéreo DR2000

Contaminante	Tipo de sensor	LMD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ o ppm)	LmD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ o ppm)	Resolución	Calentamiento (s)	Tiempo de respuesta (s)	Vida útil (años)
PM ₁₀	LD	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NA	NA	> 5
CO ₂	NDIR	2000 ppm	1 ppm	0.6 ppm	12	120	2
CO	EC	100 ppm	0.03 ppm	0.001 ppm	40	40	2
O ₂	EC	0.5 ppm	1 ppb	1 ppb	60	30	> 5
NO ₂	EC	1 ppm	0.01 ppm	0.001 ppm	120	60	> 5
SO ₂	EC	1 ppm	0.01 ppm	0.001 ppm	120	20	2

Nota. LMD = límite máximo de detección; LmD = límite mínimo de detección; LD = láser de dispersión; NA = no aplica. Tomado de Scentroid, *DR2000 Manual* (2022).

El principio utilizado por el láser de dispersión luz utilizado para medir la concentración de partículas PM₁₀ se produce debido a la interacción de la luz con las partículas, lo que resulta en cambios en la dirección y la intensidad de la luz dispersada. El patrón de dispersión de la luz puede ser medido y analizado para determinar la concentración y el tamaño de las partículas presentes en el aire (Heintzenberg, 2009).

VIII.5. Variables e indicadores

Para el desarrollo de este estudio se han seleccionado un conjunto de variables clave y sus indicadores asociados, orientados a conocer la dinámica de las partículas PM₁₀ en relación con la temperatura.

La altura se registra como la distancia vertical desde el suelo, permitiendo construir un perfil detallado de la concentración de partículas en función de este parámetro. La concentración de PM₁₀ representa el nivel de contaminación del aire y se convierte en la variable principal para evaluar la calidad del aire en distintos momentos y alturas.

Como principal indicador del estudio se utiliza el gradiente de temperatura, el cual permite identificar fenómenos de inversión térmica mediante la observación de cambios en la temperatura con la altura. Además, se analizará el perfil de concentración vertical de PM₁₀, el cual proporciona una representación de cómo se distribuyen las partículas en diferentes alturas y cómo responden a las condiciones de inversión térmica.

VIII.6. Procedimiento del monitoreo

VIII.6.1. Periodo de monitoreo

El periodo de monitoreo comprende un año. Las lecturas se tomarán cada 6 días durante un año, iniciando en agosto de 2024. El horario del vuelo será por las mañanas, iniciando a las 5:00 a.m. y concluyendo a las 1:00 p.m., dando un total de 8 vuelos por día de monitoreo. El horario de monitoreo podría variar debido a que los preparativos que se llevan a cabo previo a cada vuelo.

Se estima que algunos días pudieran presentarse limitaciones para realizar los vuelos debido a las condiciones meteorológicas, como pueden ser días lluviosos o con alta actividad de vientos, de ser así, se cambiará el día de monitoreo a algún día posterior en el que se pueda llevar a cabo el vuelo para tener representatividad de la semana.

VIII.6.2. Procedimiento de despegue y ascenso

Previo al despegue se comenzó con los registros de las concentraciones de contaminantes y la temperatura. Las lecturas se resguardan en tiempo real en la estación terrestre. El dron se posicionará 60 segundos a 10, 40, 80 y 120 m de altura en un perfil vertical. El objetivo de posicionar el equipo a diferentes alturas durante ese tiempo es con el fin de que se estabilicen los sensores. además de obtener información en suficiencia para esas alturas.

La altura máxima se estableció en base a las limitaciones aéreas establecidas por la NOM-107-SCT3-2019. La variable de respuesta será la altura y las explicativas la concentración de PM₁₀ y la temperatura. El tiempo de vuelo cae en un rango de 10 a 15 minutos. El control de la aeronave se realiza de forma manual.

VIII.6.3. Control de calidad

Previo a cada vuelo el dron se someterá a un proceso de calibración otorgado por el software de DJI utilizado para que los sensores precisen la ubicación espacial vertical y horizontal. Además, es recomendable realizar la calibración en un lugar con poca interferencia electromagnética, como un campo abierto.

Para el uso del DR2000, resulta fundamental calibrar los sensores para corregir posibles desviaciones en la línea de base. Los desarrolladores incorporaron un filtro de carbón activado a su producto con este propósito. Es importante tener en cuenta que antes de calibrar los sensores, es necesario asegurarse de que la unidad haya estado encendida durante al menos 20 minutos (Fig. 7). Para obtener los mejores resultados, se recomienda llevar a cabo la calibración justo antes de realizar el monitoreo. Cabe destacar que el proveedor calibró los sensores de contaminantes y emitió sus certificados respectivos.



Figura 5. Fotografía del DR2000 durante la calibración a cero

Las baterías de los equipos se cargan posteriormente a cada vuelo. Su carga se realiza en un inmueble cerrado, dentro de las instalaciones de la UES, donde las condiciones meteorológicas son muy distintas al exterior. Por este motivo, el sensor de temperatura tarda aproximadamente de 10 a 20 minutos en estabilizarse. Al transcurrir ese tiempo se realizan los preparativos para el despegue. Entre mayor sea el cambio entre el interior y exterior, mayor será el tiempo de estabilización de los sensores.

VIII.7. Análisis estadísticos

VIII.7.1. Procesamiento de datos

Antes de proceder con el análisis, es fundamental realizar una limpieza y organización de los datos obtenidos. Cada vuelo genera un archivo CSV que contiene todas las variables registradas. Dado que los datos se exportan en formato de texto, es necesario convertirlos a valores numéricos para su correcta manipulación. Además, se llevó a cabo un proceso de depuración para estructurar la información, eliminar posibles errores y detectar valores atípicos que puedan afectar el análisis. Este paso garantiza la calidad y confiabilidad de los datos antes de su procesamiento.

Se generaron los siguientes productos en esta etapa: Tabla de resultados del monitoreo que incluye número de días muestreados, valores promedio, máximos y percentil 95 de concentración de PM₁₀ por vuelo, valores promedio, máximo y percentil 95 por día.

VIII.7.2. Análisis del gradiente térmico vertical

Se elaboraron perfiles verticales de temperatura para cada vuelo, representando gráficamente la temperatura (°C) en función de la altura (m). Estos perfiles permitirán analizar el comportamiento de la variación térmica en la columna de aire.

El patrón de temperatura-altura de cada vuelo se representa mediante una línea individual, cuya pendiente reflejará el comportamiento térmico: una pendiente negativa indicará un gradiente térmico vertical positivo (disminución de la temperatura con la altura,), mientras que una pendiente positiva corresponde a un gradiente térmico vertical negativo (disminución de la temperatura con la altura).

VIII.6.3. Variación del gradiente térmico vertical

Para analizar la variación de la temperatura con la altura en cada vuelo, se realizó un análisis de regresión lineal simple y se calculó la pendiente (efecto) de la recta de la relación altura-temperatura. Este valor permitió determinar si la temperatura aumenta o disminuye con la altura, lo que resulta fundamental para identificar eventos de inversión térmica. Los valores de la pendiente se representarán gráficamente, donde el eje X corresponderá a la fecha ordinal de cada vuelo, organizada de manera cronológica, y el eje Y mostrará el valor de la pendiente. Esta representación facilita la identificación de tendencias en la variabilidad térmica a lo largo del periodo de estudio.

La interpretación de estos resultados permite distinguir dos comportamientos principales. Por un lado, líneas con pendiente derivada de disminución de temperatura con la altura y por otro, líneas con pendiente derivada de aumento de temperatura con la altura, pudiéndose establecer éstas últimas como eventos de inversión térmica. Tanto para la determinación de los valores del gradiente térmico vertical cada vuelo, como para la elaboración de la gráfica de distribución de dichos valores de pendiente se utiliza el programa R versión 4.4.1 (R Core Team, 2024), con el paquete ggplot2 versión 3.5.1 (H. Wickham, 2016) para la generación de gráficos.

Se generaron los siguientes productos en esta etapa: Tabla de resultados del cálculo de la pendiente por vuelo que incluye número de vuelos realizados, número de vuelos con patrón de pendiente (m) positiva y número de vuelos con patrón de pendiente (m) negativa. Número de días presentaron al menos un vuelo con inversión térmica, número máximo de vuelos con inversión térmica en un día, gráfica de distribución de valores de pendiente (m) del patrón altura-temperatura de cada vuelo y tabla con la cantidad de días en los que se identificaron vuelos (horas) con inversión térmica.

VIII.7.4. Relación entre la concentración de PM₁₀ y el gradiente vertical de temperatura.

Se realizó una comparación gráfica mediante diagramas de caja, o boxplot, a fin de conocer la distribución de datos numéricos, en este caso promedios, valores máximos y valor del percentil 95 de concentración de PM₁₀ comparando eventos con y sin inversión térmica. Esta técnica se utiliza para resumir grandes cantidades de datos y comparar distribuciones, en la gráfica podrán compararse la mediana, los cuartiles, los valores atípicos y la simetría o asimetría de los datos.

En el análisis estadístico de este estudio y la comparación de las concentraciones de partículas PM₁₀ se realizó en función del comportamiento del gradiente térmico vertical. Dado que estos datos suelen presentar una alta variabilidad, con posibles distribuciones sesgadas o la presencia de valores extremos, es común que no sigan una distribución normal. Por esta razón, se utilizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, un método no paramétrico adecuado para comparar muestras relacionadas. Esta prueba permite evaluar si existe diferencia significativa en la concentración de PM₁₀ bajo dos condiciones atmosféricas distintas: gradiente térmico negativo (disminución de temperatura con la altura) y gradiente térmico positivo (inversión térmica).

Se realizaron tres ejercicios estadísticos de comparación, el primero utilizando los valores promedio de concentración de PM₁₀ de cada vuelo, el segundo utilizando los valores máximos de concentración de PM₁₀ de cada vuelo y el tercero, utilizando los valores de concentración de PM₁₀ correspondientes al percentil 95 de cada vuelo, la comparación es en función de la identificación de presencia o ausencia de inversión térmica en cada vuelo, en

otras palabras, se utilizaron las concentraciones de los tres índices señalados comparando vuelos con pendiente positiva contra vuelos con pendiente negativa en el patrón altura-temperatura identificado por vuelo.

Se generaron los siguientes productos en esta etapa: diagramas de caja o boxplot comparativas entre valores de concentración promedio, máxima y percentil 95 de PM₁₀ de vuelos con pendiente positiva contra vuelos de pendiente negativa. Tabla de resultados de la prueba de Wilcoxon para los tres valores de concentración (promedio, máximos y percentil 95), indicando el criterio de decisión y la interpretación del resultado.

VIII.7.5. Determinación de la relación entre concentración de PM₁₀ con el gradiente térmico vertical

Considerando que el valor de la pendiente de la línea representa el comportamiento de la temperatura con la altura en cada vuelo, primero se determinó si existió inversión térmica (según el signo del valor de la pendiente) y segundo el gradiente con el que la temperatura cambia en las distintas alturas, es posible asociar dicho valor a la concentración de PM₁₀. A fin de determinar esa posible relación y considerando los resultados a obtenerse del análisis estadístico señalado en el numeral anterior, se realizará una gráfica de distribución de valores de concentración de PM₁₀ contra valor de la pendiente, buscando identificar una relación, tendencia o patrón. Se generó un gráfico de distribución de concentración de PM₁₀ contra gradiente térmico vertical de cada vuelo, incluyendo línea de tendencia.

IX. RESULTADOS

IX.1. Monitoreo de PM₁₀ y temperatura

Durante un año, a partir de agosto de 2023, se llevaron a cabo monitoreos cada seis días de PM₁₀ y temperatura en la columna de aire ambiente de 0 a 120 m en el sitio, lográndose 55 días de monitoreo según lo programado en el calendario. En cada día de monitoreo, se realizó un vuelo de 0 a 120 m de altura, por cada hora entre las 6:00 a.m. y 1:00 p.m., lo que equivale a 8 vuelos por día. Sin embargo, en algunas horas, las condiciones meteorológicas, particularmente los fuertes vientos o las lluvias, impidieron la operación de los vuelos. En total, se completaron 386 vuelos de monitoreo, cada uno de los cuales generó un promedio de 400 lecturas, con una tasa aproximada de captura de 1 lectura por segundo.

IX.2. Análisis del gradiente térmico vertical

Se presentan los perfiles del gradiente térmico vertical obtenidos durante el periodo de monitoreo (Fig. 8). Cada línea en la gráfica representa la variación de la temperatura en función de la altura para un vuelo específico, mostrando el comportamiento térmico en la vertical desde 0 hasta 120 m, aunque en algunos casos se supera esta altura. Se observa que los perfiles térmicos presentan tanto pendientes positivas como negativas, lo que refleja dos comportamientos atmosféricos claramente diferenciados.

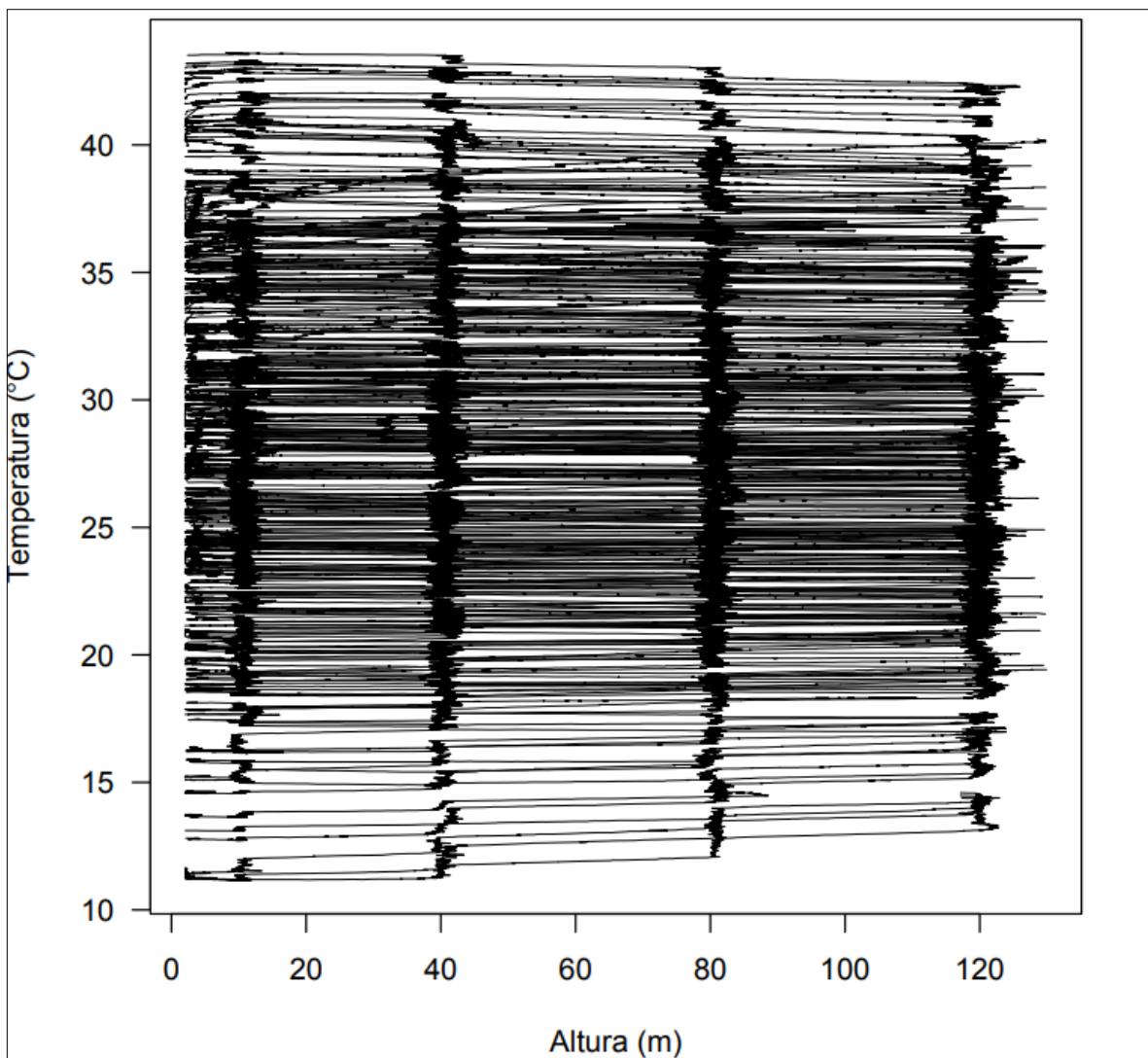


Figura 6. Gráfica del gradiente térmico vertical los vuelos realizados durante Sep 2023 – Ago 2024 en Hermosillo, Sonora

Puede apreciarse que el conjunto de líneas (vuelos) forma una figura de cuña, ancha a la izquierda y delgada a la derecha. Esta forma se debe a que las líneas de comportamiento de temperatura respecto a la altura de los vuelos realizados en días con temperaturas iniciales de aproximadamente 30°C o mayores muestran generalmente una pendiente negativa, lo que indica que, a mayor altura, menor temperatura. Por el contrario, las líneas de comportamiento de temperatura respecto a la altura de los vuelos realizados en días con temperaturas iniciales de aproximadamente 25°C o menores muestran generalmente una pendiente positiva, lo que indica que, a mayor altura, mayor temperatura.

Las pendientes positivas corresponden vuelos que registraron inversión térmica, donde la temperatura aumenta con la altura. Por otro lado, las pendientes negativas corresponden a un gradiente térmico vertical típico.

IX.3. Variación del gradiente térmico vertical

En la Figura 6 se presenta la variación de la pendiente (m) correspondiente a la relación altura-temperatura para cada uno de los vuelos registrados durante el periodo de estudio. En esta gráfica, el eje X representa la fecha ordinal de cada vuelo, organizada de manera cronológica desde el inicio del monitoreo (donde el Día 1 corresponde al 22 de agosto de 2023), mientras que el eje Y muestra el valor de la pendiente calculada. Cada punto en la gráfica representa el gradiente térmico vertical de la serie de datos altura-temperatura para un vuelo específico, considerando que se realizaron varios vuelos por día.

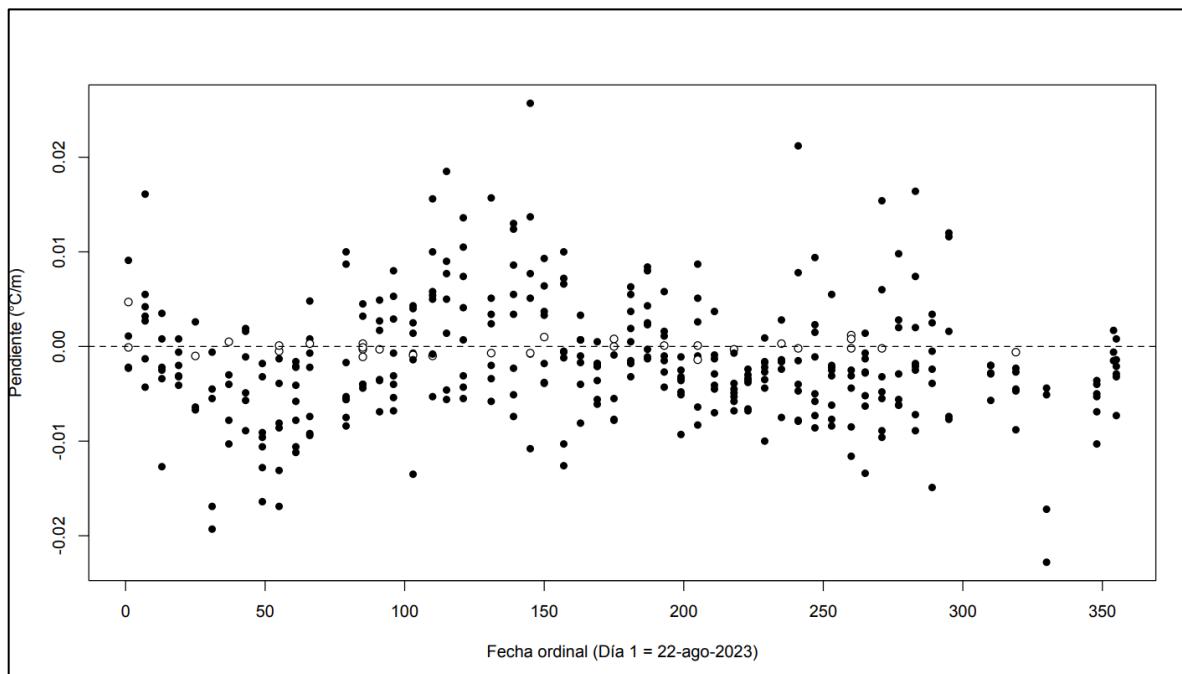


Figura 7. Variación diaria y estacional del gradiente vertical de temperatura (pendiente) para cada vuelo realizado (varios por día). Pendiente positiva significa a mayor altura mayor temperatura y pendiente negativa significa a mayor altura menor temperatura. Los puntos sin relleno negro, situados cerca de la línea de valor cero, representan valores de pendientes que no son estadísticamente diferentes a cero, considerando un nivel de confianza del 95%

Esto sugiere que, en esos vuelos, no se observó un cambio significativo en la temperatura con respecto a la altura, lo que indica condiciones atmosféricas neutras o sin un gradiente térmico vertical definido.

Por otro lado, los puntos que se encuentran por encima de la línea de cero en la gráfica corresponden a pendientes positivas, lo que indica un gradiente térmico vertical negativo. Estos valores sugieren la presencia del fenómeno de inversión térmica. Por el contrario, los puntos que se encuentran por debajo de la línea de cero corresponden a pendientes negativas, lo que refleja un gradiente térmico vertical positivo.

Cuando la pendiente es muy grande y positiva, indica un gradiente térmico vertical negativo muy pronunciado, es decir, un aumento muy rápido de la temperatura con la altura. Esto es característico de inversiones térmicas fuertes, donde las capas de aire cercanas a la superficie están significativamente más frías que las capas superiores.

Por otro lado, cuando la pendiente es muy grande y negativa, refleja un gradiente térmico vertical positivo muy pronunciado, es decir, una disminución muy rápida de la temperatura con la altura.

Durante el periodo de estudio, se identificó la presencia de inversión térmica en 36 días de monitoreo. En los días en los que se detectó este fenómeno, el número de vuelos con inversión térmica varió entre un mínimo de 1 vuelo y un máximo de 6 vuelos por día. Esto indica que, en algunos días, la inversión térmica estuvo presente durante varias horas, mientras que en otros solo se observó en una hora específica. Se enlistan los meses del periodo de monitoreo y la cantidad de días donde por lo menos se detectó una inversión térmica (Fig. 8).

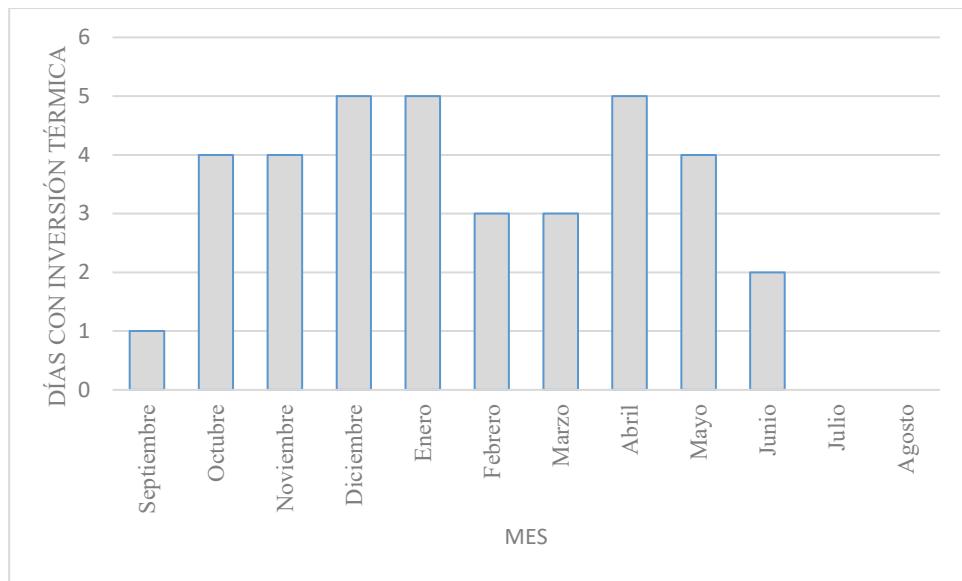


Figura 8. Cantidad de inversiones térmicas por mes durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

El número total de días que presentaron al menos una hora con inversión térmica fue de 36, de un total de 55 días de monitoreo, representa el 65%. Además, se analizó la distribución horaria de la inversión térmica, identificando en qué horas del día este fenómeno fue más frecuente. La mayor cantidad de días con inversión térmica se registró a las 6:00 de la mañana, y a medida que avanzaba el día la frecuencia de inversiones térmicas disminuyó notablemente. Se registraron cantidad de días que presentan inversión térmica según la hora. Es pertinente aclarar que existen días con esta condición en varias horas del día. Se muestra el patrón o tendencia de frecuencia del fenómeno de inversión térmica según la hora (Fig. 9).

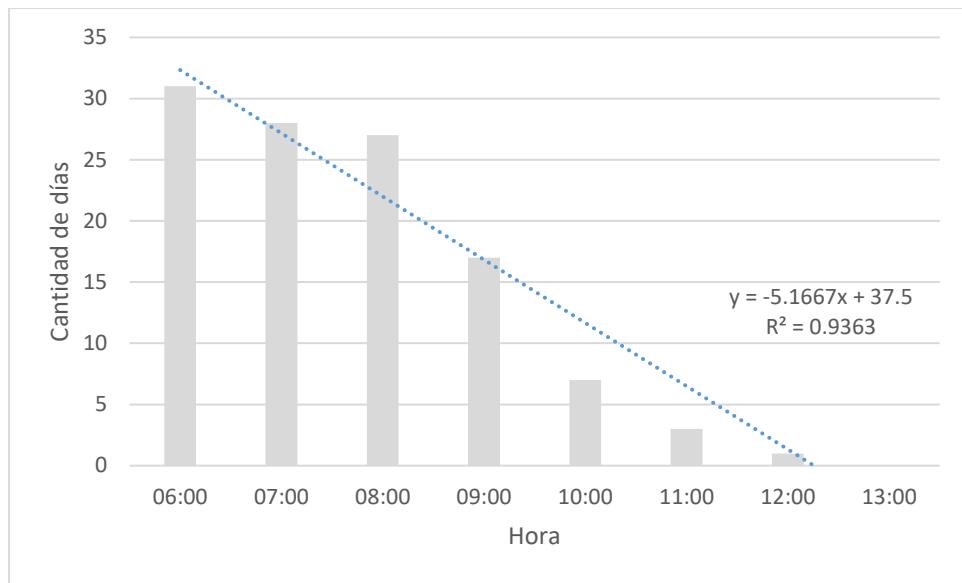


Figura 9. Tendencia de cantidad de días con presencia de inversión térmica según hora durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

Estos resultados reflejan que la inversión térmica es un fenómeno más común durante las horas tempranas del día, cuando la radiación solar aún no ha calentado lo suficiente la superficie. A medida que avanza el día y aumenta la temperatura del suelo, la inversión térmica tiende a desaparecer, lo que explica su menor frecuencia y desaparición en horas posteriores.

IX.4. Relación entre la concentración de PM₁₀ y el gradiente vertical de temperatura.

Mediante la gráfica de cajas se ilustra la distribución de los valores de PM₁₀ en ambos escenarios, permitiendo visualizar posibles diferencias en los niveles de contaminación asociados a la estabilidad atmosférica debida a la inversión térmica.

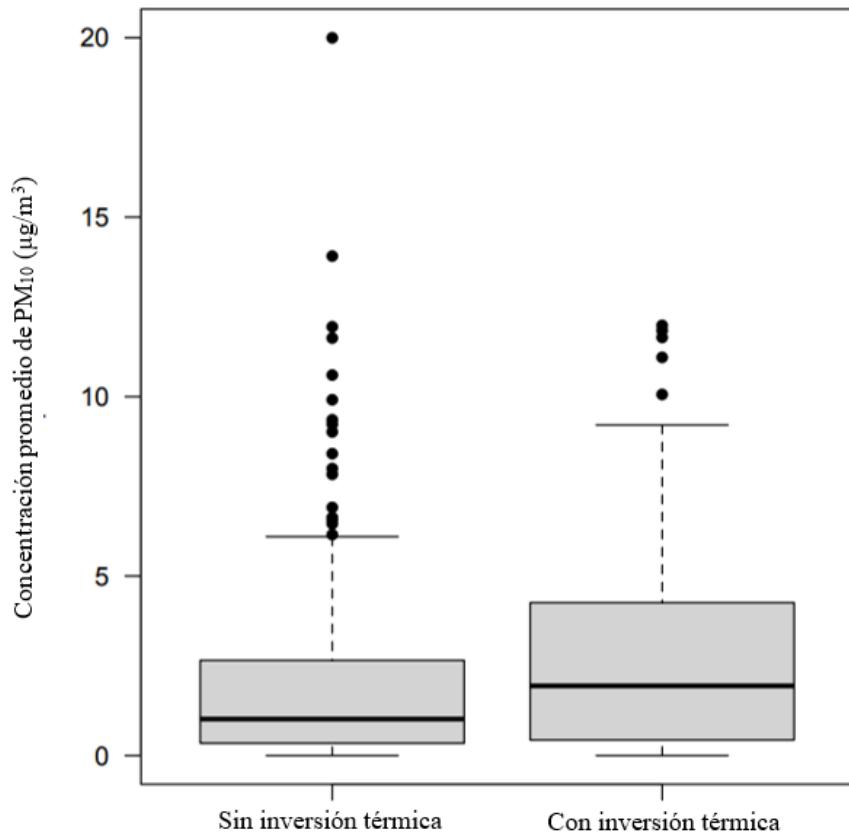


Figura 10. Comparación de los valores promedio de concentración de PM₁₀ por vuelo bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

Las concentraciones promedio de PM₁₀ son mayores durante los episodios de inversión térmica (Fig. 10). Además, se aprecia una mayor dispersión de los datos en los vuelos con inversión térmica. En contraste, en ausencia de inversión térmica, los valores se concentran en un rango más estrecho y con menores máximos, es decir, los valores más altos de PM₁₀ observados en ausencia de inversión térmica son inferiores a los que se alcanzan cuando esta está presente.

IX.5. Determinación de la relación entre concentración de PM₁₀ con el gradiente térmico vertical

Existe evidencia convincente de que la ocurrencia de inversión térmica tiene un efecto en la concentración promedio de PM₁₀ durante el vuelo (Prueba de Wilcoxon, $P = 0.009$).

Los vuelos en los que se registró inversión térmica tienen una mediana en la concentración de PM₁₀ mayor que aquella de los vuelos sin inversión térmica (Fig. 10).

Estos resultados respaldan la hipótesis de que la inversión térmica pudiera influir en la acumulación de partículas en la baja atmósfera, debido a la estabilidad atmosférica y la reducción en la dispersión de contaminantes generadas por el bloqueo de dispersión en la vertical por distribución de densidad del aire.

IX.6. Comparación de valores máximos de concentración de PM₁₀ por cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

Para evaluar el impacto de la inversión térmica en la concentración de partículas PM₁₀, se realizó una comparación de los valores máximos registrados en cada vuelo, diferenciando entre condiciones con y sin inversión térmica. La distribución de estos valores mediante diagramas de caja y bigotes, permitiendo visualizar la dispersión y posibles diferencias entre ambos escenarios (Fig. 11).

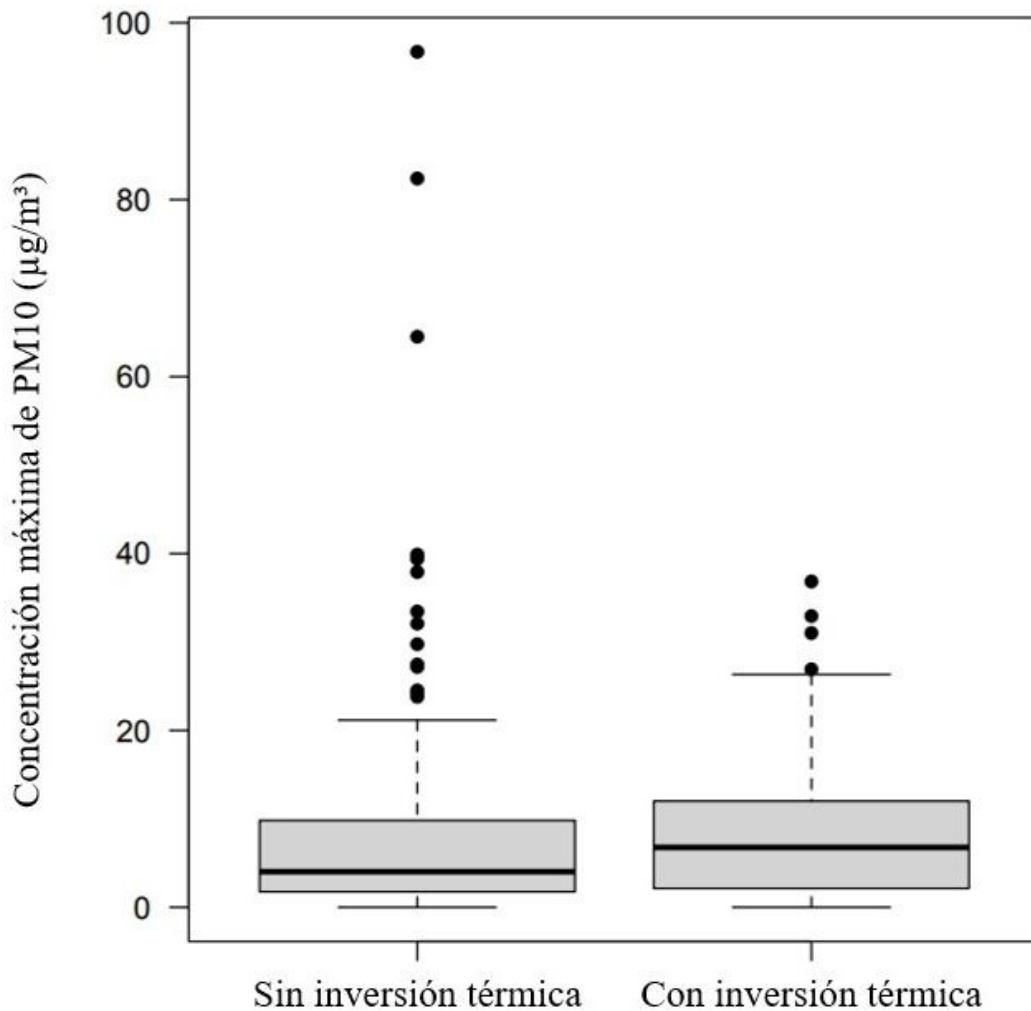


Figura 11. Comparación de los valores máximos de concentración de PM₁₀ por vuelo, bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

La comparación de los valores máximos de concentración de PM₁₀ registrados durante los vuelos realizados en condiciones con y sin inversión térmica. De forma visual, se observa que las concentraciones máximas de PM₁₀ tienden a ser ligeramente mayores en los vuelos donde se identificó inversión térmica, reflejado en una mediana de mayor valor y en una distribución desplazada hacia valores superiores. Asimismo, se aprecia que los valores de PM₁₀ presentan una dispersión similar en ambos escenarios, aunque con presencia de valores atípicos más altos en ausencia de inversión térmica. Estos valores extremos pueden

estar asociados a condiciones puntuales, como emisiones locales, tráfico vehicular, ráfagas de viento, que momentáneamente provocó que las concentraciones se elevaran.

IX.7. Análisis estadístico de máximos de concentración de PM₁₀ de cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica.

Mediante la Prueba de Rangos con Signo de Wilcoxon, se realizó análisis estadístico, comparando los valores máximos de concentración de PM₁₀ de aquellos vuelos identificados con inversión térmica contra los vuelos en los que no se identificó inversión térmica. Se identificó una diferencia significativa en los valores máximos de PM₁₀ entre vuelos con y sin inversión térmica, con un valor $P = 0.040$, lo que podría indicar que la inversión térmica tiene un efecto en la concentración de contaminantes.

IX.8. Comparación de percentil 95 de concentración de PM₁₀ por cada vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

En el análisis del percentil 95 de la concentración de PM₁₀, se compararon los valores obtenidos en vuelos identificados bajo condiciones con y sin inversión térmica. Se muestra la distribución de estos datos mediante diagramas de caja, evidenciando un valor mayor de percentil 95 de concentración de partículas en situaciones de inversión térmica (Fig. 12).

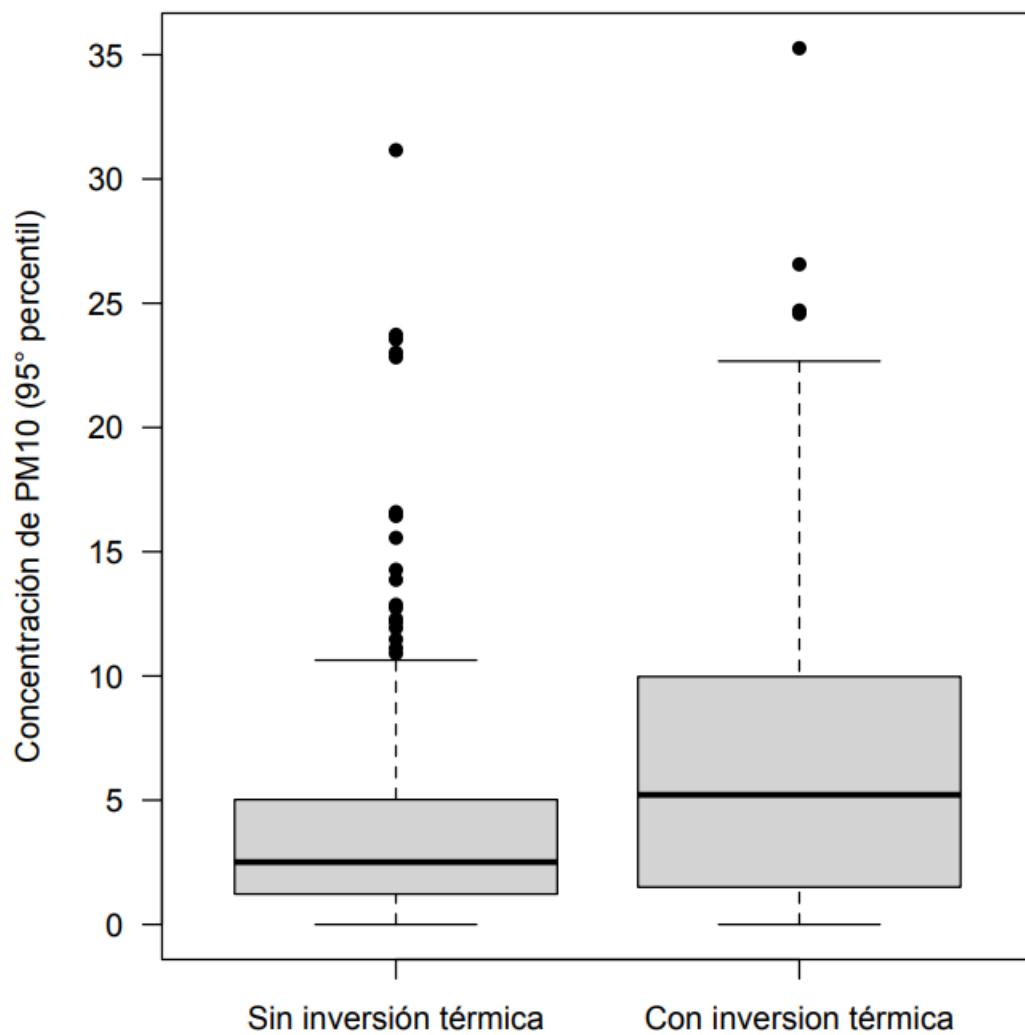


Figura 12. Comparación de los valores del percentil 95 de concentración de PM₁₀ por vuelo, bajo condiciones de presencia y ausencia de inversión térmica durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

Se observa que, en condiciones sin inversión térmica, la distribución de las concentraciones de PM₁₀ presenta un valor de mediana baja y una menor dispersión, con valores atípicos dispersos en niveles relativamente bajos. En contraste, cuando hay inversión térmica, la mediana de las concentraciones de percentil 95 aumenta notablemente y la dispersión de los datos es mayor, lo que sugiere una acumulación más efectiva de contaminantes en la capa baja de la atmósfera.

IX.9. Análisis estadístico del percentil 95 de concentración de PM₁₀ por vuelo, considerando ausencia y presencia de inversión térmica.

Existe evidencia convincente de que la ocurrencia de inversión térmica tiene un efecto en el 95^{vo} percentil de la concentración PM₁₀ por el vuelo (Prueba de Wilcoxon, $P < 0.001$). Los vuelos en los que se registró inversión térmica tienen una mediana del 95^{vo} percentil de la concentración de PM₁₀ mayor que aquella de los vuelos sin inversión térmica.

IX.10. Determinación de la relación entre el valor de Percentil 95 de la concentración de PM₁₀ con el valor de la pendiente del gradiente vertical de temperatura.

Se encontró evidencia convincente el percentil 95 de la concentración de PM₁₀ está positivamente asociado al gradiente térmico vertical (Prueba Wald de coeficiente de regresión lineal, $t = 4.902$, g.l. = 382, $P < 0.001$). Este comportamiento sugiere que la inversión térmica favorece la acumulación de partículas en niveles bajos de la atmósfera, aumentando su concentración debido a la dificultad de su dispersión vertical por motivos de densidad de las capas de aire (una capa de aire más caliente y menos densa arriba y una capa más fría y densa abajo).

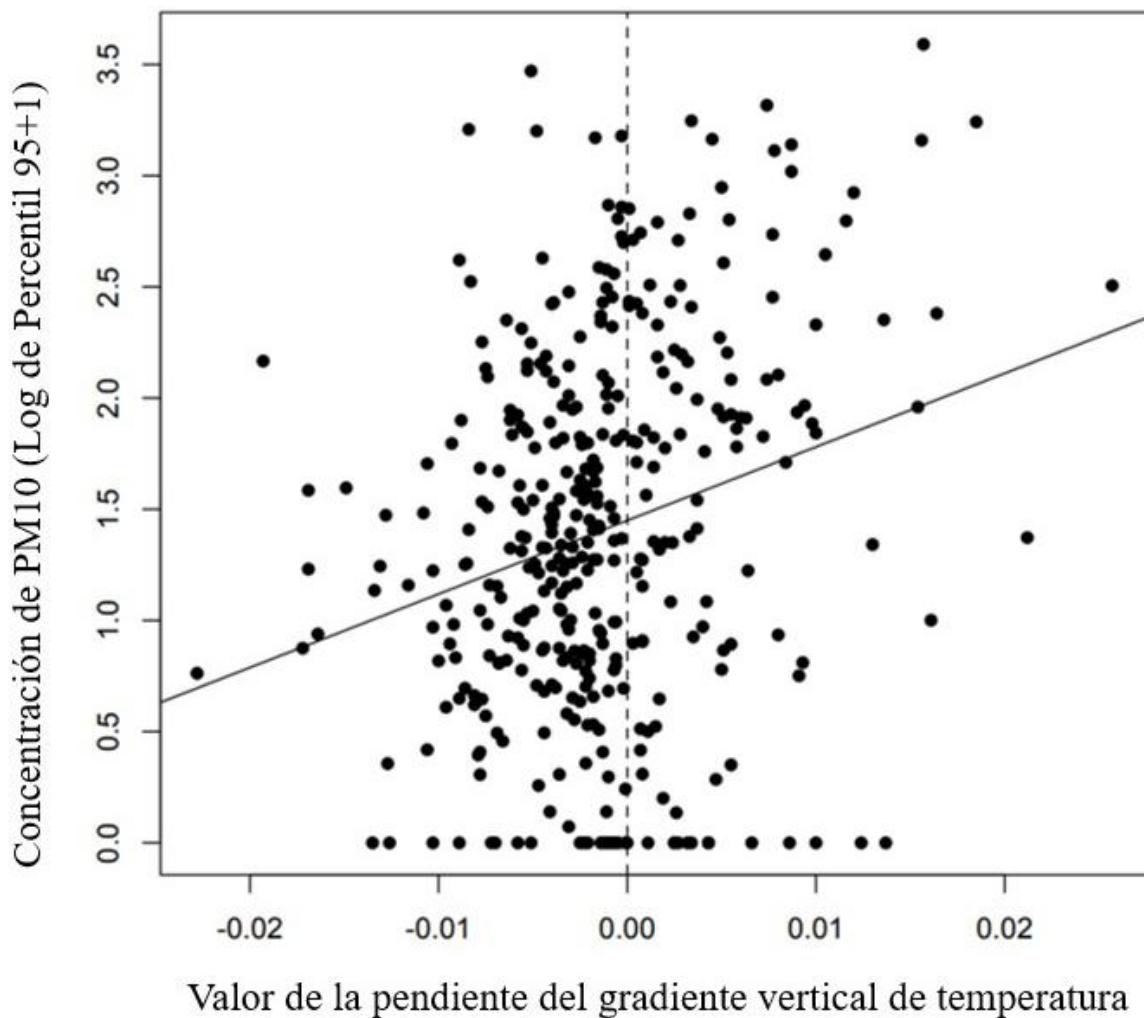


Figura 13. Relación entre la concentración de PM₁₀ (Log de Percentil 95) con el valor de la pendiente (m) del gradiente vertical de temperatura (°C/m) obtenidos en cada vuelo durante el periodo de monitoreo septiembre 2023 - agosto 2024 en Hermosillo, Sonora

El diagrama de dispersión muestra una dispersión en los datos resultantes de la relación concentración PM₁₀ y la variación del gradiente vertical de temperatura, sin embargo, es posible identificar la tendencia de dicha relación, la cual indica que, a mayor valor de la pendiente, entiéndense ésta como un gradiente vertical de temperatura que se incrementa con la altura, mayor concentración de PM₁₀. El hecho de que la tendencia general sea creciente respalda la hipótesis de que las inversiones térmicas tienen un impacto significativo en la calidad del aire, al actuar como una barrera que impide la dispersión vertical de los contaminantes, en este caso partículas PM₁₀.

Los resultados sugieren que la inversión térmica es un factor clave en la concentración de PM₁₀, y su efecto se hace evidente al analizar la relación entre el percentil 95 de las concentraciones de partículas y la pendiente del gradiente térmico vertical (Fig.13). La correlación positiva observada indica que condiciones de mayor estabilidad atmosférica están asociadas con una mayor acumulación de partículas en la atmósfera.

X. DISCUSIONES

X. 1. Monitoreo de PM₁₀ y temperatura

El uso del laboratorio aéreo DR2000 permite el monitoreo de la concentración de PM₁₀ y la temperatura en perfiles verticales de manera simultánea. Tras periodo de monitoreo a lo largo de un año, fue posible registrar que las concentraciones más elevadas de PM₁₀ se presentaron durante las primeras horas del día, es decir, cuando la temperatura es más baja, principalmente entre las 6:00 a 10:00 horas. Durante las noches el suelo se enfriá mediante radiación y en combinación con la estabilidad atmosférica propicia las condiciones adecuadas para que ocurra el fenómeno de inversión térmica. Este comportamiento es frecuentemente relacionado por otros autores, como es el caso del estudio realizado por Samad et al. (2022), quienes demostraron que la estabilidad atmosférica y la baja actividad del movimiento del aire, favorecen la acumulación de partículas alturas cercanas al suelo, mientras que el incremento de la velocidad del viento promueve la dispersión de partículas. Los perfiles obtenidos en su estudio mostraron mayores concentraciones de partículas en áreas someras, y disminuyen con la altura conforme toma distancia de la fuente de emisión, resultado coherente con lo registrado en el presente trabajo.

X.2. Análisis del gradiente térmico vertical

El gradiente de temperatura vertical permitió identificar condiciones de inversión térmica mayormente predominantes entre las 6:00 y 10:00 horas, especialmente en la temporada de otoño e invierno. Dichas inversiones, inducidas por la radiación nocturna, generan una capa estable que impide la mezcla vertical de las masas de aire y limita la dispersión de partículas. Estos resultados son consistentes con lo descrito por Rolland (2003), quien documentó dentro de su investigación que la tasa de descenso en la temperatura disminuye significativamente durante la noche, intensificándose durante la temporada de invierno, dando como producto una mayor estabilidad atmosférica. Lo anterior coincide con los perfiles de temperatura obtenidos en este estudio, así como con las características de la inversión térmica atribuibles a la de tipo de radiación nocturna, y, por lo tanto, relacionable

con el incremento de las concentraciones de PM₁₀ en las temporadas frías del año y dentro las primeras horas del día.

X.3. Variación del gradiente térmico vertical

Se observó que gradientes térmicos verticales positivos correspondieron a condiciones de inversión térmica, mientras que las negativas son atribuibles a gradientes normales de temperatura. De acuerdo con Mokhov y Akperov (2006), el gradiente térmico medio en la troposfera disminuye aproximadamente 6 °C/km, pero presenta variaciones regionales y estacionales directamente asociadas con la temperatura superficial del sitio. Los autores demostraron que un aumento de la temperatura del suelo reduce la estabilidad atmosférica, creando modificaciones el perfil térmico vertical. En consecuencia, la pendiente obtenida en este estudio puede interpretarse como un indicador físico de estabilidad, validado por observaciones climatológicas y reanálisis atmosféricos globales.

X.4. Comparación de promedios de concentración de PM₁₀ considerando ausencia y presencia de inversión térmica

Los valores de las lecturas bajo condiciones de inversión térmica mostraron promedios de las concentraciones de PM₁₀ considerablemente superiores a aquellos sin inversión. Este comportamiento promueve el confinamiento de las partículas dentro de una capa estable de masa de aire, donde se dificulta la mezcla vertical. Los resultados concuerdan con lo reportado por Samad et al. (2022), quienes observaron concentraciones mayores de contaminantes en alturas someras durante periodos de estabilidad, especialmente cerca de fuentes móviles de emisión.

X.5. Análisis estadístico de promedios de concentración de PM₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

Se encontraron diferencias entre los valores promedio de PM₁₀ con y sin inversión térmica. Esto sugiere que la estabilidad atmosférica tiene un efecto directo sobre la elevación en la concentración de partículas. Lo anterior se respalda por investigaciones previas como la de Tzanis et al. (2018), evaluaron las diferencias en la precisión de modelos de predicción de concentraciones de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}. En este sentido, la aplicación de la prueba de Wilcoxon en el presente trabajo se usó debido a la ausencia de normalidad en los datos, y permitió identificar un efecto significativo diferencias en las concentraciones de PM₁₀ entre condiciones de con y sin inversión térmica, lo que confirma que este fenómeno influye en la concentración de partículas.

X. 6. Comparación de valores máximos de concentración de PM₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

Los valores máximos de concentración PM₁₀ mostraron un notable incremento durante los episodios de inversión térmica, siendo más prolongados y con picos más notables que en días sin inversión. Esta situación es atribuible a condiciones atmosféricas estables, donde se limita la dispersión vertical de partículas y favorece elevadas concentraciones en zonas superficiales. Otros autores reportaron resultados similares como es el caso de Xu, et al. (2018), quienes enfocaron su investigación en relación con el impacto de las condiciones meteorológicas durante el invierno en relación con la contaminación por partículas. Identificaron que la concentración por partículas aumenta en un 40 – 70% en condiciones de nula actividad del viento y alta humedad relativa, provocando episodios prolongados de contaminación. En este estudio, los valores máximos de concentración PM₁₀ se registraron durante la temporada de otoño – invierno en horarios de 6:00 – 10:00 horas, en condiciones de estabilidad atmosférica y enfriamiento del suelo por radiación nocturna, siendo un factor clave que intensifica la concentración de partículas.

X. 7. Análisis estadístico de máximos de concentración de PM₁₀ por vuelo con considerando ausencia y presencia de inversión térmica

En relación con la prueba de hipótesis realizada a los valores máximos de PM₁₀, demostró diferencias estadísticamente significativas entre los vuelos con y sin inversión térmica. El resultado respalda la hipótesis sobre los efectos que tiene la inversión térmica en el incremento de PM₁₀. Estudios como el de Xu, et al. (2018) evaluaron la influencia de las condiciones meteorológicas en la concentración de partículas en regiones de China, encontrando incrementos significativos en los valores máximos de partículas durante condiciones de estabilidad atmosférica y alta humedad.

X.8. Comparación de percentil 95 de concentración de PM₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

La comparación al percentil 95 de concentración de PM₁₀ permitió la evaluación de los niveles de concentración registrados durante el monitoreo en condiciones con y sin inversión térmica. Los resultados presentaron una acumulación prolongada de PM₁₀ durante los episodios de inversión térmica. Investigaciones previas respaldan estas condiciones, como es el caso de Li et al. (2017), quienes dieron un enfoque al análisis de percentiles 5 y 95 de concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, con el fin de caracterizar las variables meteorológicas con las altas concentraciones de partículas, asociando que la dispersión vertical de partículas se limita en condiciones de estabilidad atmosférica, alta presión y temperaturas moderadas. Lo anterior respalda al presente estudio, donde los valores de percentil 95 de PM₁₀ se intensifican durante los episodios de inversión térmica.

X.9. Análisis estadístico de percentil 95 de concentración de PM₁₀ por vuelo considerando ausencia y presencia de inversión térmica

El percentil 95 de concentraciones de PM₁₀ mostró diferencias significativas en los valores con y sin inversión térmica ($P < 0.001$). El resultado presenta una influencia significativa entre la concentración elevadas de PM₁₀ durante los episodios de inversión térmica.

En investigación de Li et al. (2017), se realizó un análisis estadístico de percentil 95 para caracterizar las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} con las variables meteorológicas, presentando una relación significativa entre ellas. En ese sentido, y de los resultados obtenidos mediante la prueba de Wilcoxon, se refuerza la hipótesis del efecto que tiene la inversión térmica en el incremento de la concentración de partículas PM₁₀.

X.10. Determinación de la relación entre el valor de Percentil 95 de la concentración de PM₁₀ con el valor de la pendiente del gradiente vertical de temperatura.

El determinar los valores del percentil 95 de concentración de PM₁₀, el gradiente vertical de temperatura y relacionar ambos valores sugiere una relación entre la concentración de PM₁₀ en días con y sin inversión térmica. Los resultados de la investigación de Li et al. (2017), demostraron que el percentil 95 de concentración de PM₁₀ se presentan una mayor acumulación bajo condiciones meteorológicas sin actividad de viento y estabilidad atmosférica. Recapitulando, los gradientes térmicos verticales de temperatura indican los episodios de inversión térmica, es decir, a mayor altura mayor temperatura. De manera consistente, los resultados de este estudio confirman que existe una correlación directa en el efecto que ejerce la inversión térmica en la concentración de PM₁₀.

Estos hallazgos respaldan la hipótesis del presente estudio, de que la inversión térmica no solo modifica el gradiente vertical de temperatura, sino que constituye un factor relevante en la concentración de PM₁₀.

XI. CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos y las discusiones previamente descritas, es posible aceptar la hipótesis del estudio, la cual consiste que durante los episodios de inversión térmica la concentración de partículas PM_{10} aumentan provocado por la estratificación térmica en la atmósfera donde se limita la dispersión vertical de contaminantes.

Los eventos de inversión térmica se concentraron principalmente en las primeras horas del día (6:00 a 10:00 horas), y fueron más frecuentes durante las estaciones de otoño e invierno, coincidiendo con las condiciones temporales de la región donde las noches son más prolongadas, hay menor radiación solar y mayor estabilidad atmosférica.

Los valores de las pendientes positivas de la relación altura – temperatura indicaron episodios de inversión térmica, y representan un papel relevante en la distribución vertical de las partículas PM_{10} , propiciando el aumento de concentración en las capas bajas de la atmósfera. Estos valores también presentan concentraciones mayores de PM_{10} , en términos de promedio, máximos y percentil 95. El análisis de la estadística de Wilcoxon evidenció diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de PM_{10} entre condiciones con y sin inversión térmica, lo cual valida la hipótesis planteada en el estudio.

En conclusión, los resultados sugieren que la inversión térmica es un fenómeno meteorológico determinante en la dispersión de partículas. Dentro del contexto local, la ciudad de Hermosillo presenta las condiciones favorables para su formación e incluyendo en la dinámica de dispersión de PM_{10} . La elaboración de perfiles verticales de temperatura y concentración de partículas brinda información valiosa para crear indicadores de calidad del aire, que promuevan alternativas de prevención de riesgos contra la salud en la ciudad.

XII. LITERATURA CITADA

1. C. Rolland. (2003). Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in alpine regions. *Journal of Climate*, 16(7), 1032–1046.
2. Dueñas Puentes, J. L. (2013). Meteorología y contaminación atmosférica. Universidad de La Rioja.
3. Feng, X., Wei, S., & Wang, S. (2020). Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution. *Science of the Total Environment*.
4. Giemsa, E., Soentgen, J., Kusch, T., Beck, C., Münkel, C., & Cyrys, J. (2021). Influence of local sources and meteorological parameters on the spatial and temporal distribution of ultrafine particles in Augsburg, Germany. *Frontiers in Environmental Science*.
5. Gutiérrez Ruacho, J., et al. (2018). Análisis de la variabilidad de las temperaturas y lluvias en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, para la evaluación del riesgo ambiental local y regional.
6. Heintzenberg, J. (2009). The SAMUM-1 experiment over Southern Morocco: Overview and introduction. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*.
7. Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behaviour, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons Inc.
8. Instituto Municipal de Ecología. (2017). Informe de resultados. Programa de evaluación y mejoramiento de la calidad del aire (PEMCA) de Hermosillo, Sonora. H. Ayuntamiento de Hermosillo.
9. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales de la carta de climas (Serie II).
10. Jacobson, M. Z. (2002). *Atmospheric pollution: History, science and regulation*. Cambridge University Press.

11. Lagmiri, S., & Dahech, S. (2024). Temperature inversion and particulate matter concentration in the low troposphere of Cergy-Pontoise (Parisian region). *Atmosphere*.
12. Ledesma, M. (2011). *Principios de meteorología y climatología*. Ediciones Paraninfo, S.A.
13. Li, J., Chen, H. B., Li, Z. Q., Wang, P. C., Fan, X. H., He, W. Y., & Zhang, J. Q. (2019). Analysis of low-level temperature inversions and their effects on aerosols in the lower atmosphere. *Advances in Atmospheric Sciences*.
14. Li, X., Chen, X., Yuan, X., Zeng, G., León, T., Liang, J., Chen, G., & Yuan, X. (2017). Characteristics of particulate pollution ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) and their space-scale-dependent relationships with meteorological elements in China. *Sustainability*.
15. Mokhov, I. I., & Akperov, M. G. (2006). Tropospheric lapse rate and its relation to atmospheric stability and climate variations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*.
16. Navarro, A. (2019). Control de contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(3), 631–663.
17. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a las partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Secretaría de Salud.
18. Petty, G. W. (2008). *A first course in atmospheric thermodynamics*. Sundog Publishing.
19. Pope, C. A. III, & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
20. R Core Team. (2024). *R: Language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

21. Samad, A., Álvarez Flórez, D., Chourdakis, I., & Vogt, U. (2022). Concept of using an unmanned aerial vehicle (UAV) for 3D investigation of air quality in the atmosphere—Example of measurements near a roadside. *Atmosphere*, 13(5), 663.
22. Santos Romo, J. (2006). Evaluación de la calidad del aire por partículas suspendidas PM₁₀, NO_x y SO₂ en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Universidad de Sonora.
23. Scentroid. (2022). DR2000 Flying Laboratory – Drone Based Air Quality Monitoring System. Scentroid Inc. <https://www.scentroid.com/dr2000-flying-laboratory>
24. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. John Wiley & Sons.
25. SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca). (1996). Delegación Federal en el Estado de Sonora. Concentración de partículas en aire ambiente para la ciudad de Hermosillo, Sonora, México durante el período 1990–1995.
26. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2022). Registro histórico de temperaturas máximas y mínimas de la estación Hermosillo, Sonora. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
27. Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers.
28. SZ DJI Technology Co., Ltd. (2023). DJI Inspire 2 User Manual (v1.8). SZ DJI Technology Co., Ltd. <https://www.dji.com/inspire-2>
29. Thi Thuy, N., Thi Lan, N., et al. (2018). Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*.
30. Tikhomirov, A. B., Lesins, G., & Drummond, J. R. (2021). Drone measurements of surface-based winter temperature inversions in the High Arctic at Eureka. *Atmospheric Measurement Techniques*.

31. Tzanis, C. G., Alimisis, A., Philippopoulos, K., & Deligiorgi, D. (2018). Applying linear and nonlinear models for the estimation of particulate matter variability. *Environmental Pollution*.
32. van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Hsu, N. C., Kahn, R. A., Levy, R. C., Lyapustin, A., Sayer, A. M., & Winker, D. M. (2016). Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical–statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology*.
33. Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Elsevier.
34. Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag. <https://ggplot2.tidyverse.org>
35. Whiteman, C. D., & Hoch, S. W. (2014). Pseudovertical temperature profiles in a broad valley from lines of temperature sensors on sidewalls. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
36. Woo Young, W., et al. (2025). Investigation of vertical profiles of particulate matter and meteorological parameters using UAV-based observations. *Atmosphere*.
37. World Health Organization (WHO). (2016). *Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks*. WHO Press.
38. World Health Organization (WHO). (2021). *Diretrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*.
39. World Health Organization (WHO) Observatory. (2018). *Mortality from household air pollution*. World Health Organization.
40. Xu, Y., Xue, W., Lei, Y., Zhao, Y., Cheng, S., Ren, Z., & Huang, Q. (2018). Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China during winter. *Atmosphere*.