



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Análisis de la distribución espacial de la contaminación del aire por Material Particulado (PM) y polvo urbano, en diferentes áreas de la zona urbana de Puebla”

Noviembre, 2024

### TESIS PROFESIONAL

Para obtener el grado de:

**Licenciatura en Ingeniería Ambiental**

Presenta:

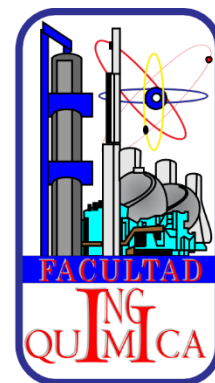
Illiana de Jesús García Tiempo

Directora de tesis:

M.I.A. Miriam Vega Hernández

Codirectora de tesis:

Dra. María Guadalupe Tenorio Arvide





**BUAP**

Oficio No. FIQ/AC/139/2024  
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

**C. ILLIANA DE JESÚS GARCÍA TIEMPO**  
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

**“Análisis de la distribución espacial de la contaminación del aire por Material Particulado (PM) y polvo urbano, en diferentes áreas de la zona urbana de Puebla”**

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: M.I.A. Miriam Vega Hernández.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO.**

Atentamente  
“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”  
H. Puebla de Zaragoza a 20 de junio de 2024

**Dra. Valeria Jordana González Coronel**  
Secretaria Académica

C.c.p. Directora de Tesis: M.I.A. Miriam Vega Hernández.  
C.c.p. Archivo.

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72590  
01 (222) 229 55 00  
Exts. 7250 y 7251

## Dedicatoria:

**A Dios**, por la vida y la familia que me ha dado, por ser guía en cada paso de este camino, y por brindarme el don de la ciencia. A Él, que, en su infinita bondad, ha sido luz y refugio en este recorrido.

**A mis padres, Roberto y María**, por ser la base de mi fortaleza y esfuerzo. Gracias, papá, por ser ese hombre que me inspira a alcanzar mis objetivos y no rendirme; gracias por la paciencia y el tiempo. Y gracias, mamá, por enseñarme el amor a Dios, por ser mi mejor amiga, por ser mi aliada y ser ese apapacho al alma en mis momentos más difíciles.

Gracias por darme raíces para ser fuerte y alas para volar. Gracias por ser su hija, su nena. Espero me alcance la vida para poder devolverles todas las cosas buenas que me han dado.

**A mi hermano, Sadday**, por ser mi compañero de recuerdos compartidos, y un cómplice en las alegrías y penas. Gracias por recordarme que debía avanzar, y no quedarme atrás.

**A mis abuelitos, Roberto y Gudulia, Santiago y Chuchis**, quienes en vida me enseñaron a ser agradecida y me aconsejaban **que debía superarme, que debía superarlos**; les agradezco que me permitieran conocerlos y heredar sus virtudes; siguen presentes en cada paso que doy.

**A mi familia paterna y materna**, quienes desde su amor incondicional han sido el grito de aliento en mis logros y fracasos. Son la herencia de un legado que perdura en mí. Gracias por estar ahí.

A mis cómplices de risas y momentos que atesoro en mi corazón, **mis amigos**.

**A Luis Loyde**, mi colega, gracias por enriquecer y ampliar mi perspectiva de la vida, por ser un apoyo incondicional cuando más lo necesité.

**A Joanna**, mi amiga, mi compañera, gracias por entrar en mi vida y permanecer en ella, gracias por aportar luz y alegría en cada momento juntas.

**A Angela**, mi cómplice, gracias por acompañarme en esta etapa, por respaldarme y vivir tantas aventuras juntas.

A mis amigas, **Amairani, Mariel, Jessica y Nadia**, por darme esos momentos de claridad, por motivarme a ser una mejor versión de mí misma y por enseñarme a ser valiente y auténtica.

**A BTS**, quienes tienen mi profundo aprecio y cariño, gracias por ser una luz en mi camino desde la preparatoria. Sus canciones han sido parte de mi motivación para seguir adelante y no rendirme.

**A mis docentes de preparatoria, María Auroza, Columba y Rebeca,** quienes, con su pasión por la enseñanza, dejaron una huella indeleble en mi formación. Gracias por motivarme y sacar lo mejor de mí, por desafiarme a superar mis propios límites. Con cada presión y cada reto, me impulsaron a ser mejor, a buscar el crecimiento diario y a abrazar mis aspiraciones. Gracias por su dedicación.

**A la Mtra. Miriam,** por ser el punto de partida en mi camino hacia la ingeniería ambiental. Gracias por acompañarme a lo largo de estos años universitarios, por crear un espacio seguro y flexible donde mis compañeros y yo pudimos crecer.

**A la Dra. Tenorio,** por ser el impulso y la inspiración que necesitaba para culminar mi carrera. Su constante apoyo y paciencia me motivaron a avanzar en mi tesis, a buscar respuestas y a no rendirme. Gracias de todo corazón.

**A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,** mi alma mater, que ha sido mi hogar desde la preparatoria. Desde 2015 hasta el 2024, he disfrutado de momentos inolvidables y he forjado amistades que atesoro en mi corazón. Agradezco profundamente a esta comunidad por brindarme la oportunidad de crecer y desarrollarme. Ser BUAP es un honor.

**A Christian,** gracias por ser el soporte que me sostuvo en este último gran paso. Agradezco cada desvelo compartido, cada abrazo en mis momentos de estrés y cada instante en el que me has recordado que siempre puedo contar contigo. Te volviste una parte esencial de mi vida, y tu respaldo ha sido invaluable en mi camino hacia este logro. Te amo.

**Esta tesis la elaboré desde el amor hacia mis seres queridos.**

"Hay algo infinitamente reparador en el reiterado ritmo de la naturaleza, la garantía de que el amanecer llega tras la noche, y la primavera tras el invierno."

-Rachel Carson

## **ÍNDICE**

**INTRODUCCIÓN** 1

**JUSTIFICACIÓN** 2

**OBJETIVOS** 3

**HIPÓTESIS** 4

**CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES** 5

1.1 Contaminación del aire y polvo urbano 6

1.2 Metales pesados en el polvo urbano 6

1.3 Ceniza volcánica en el polvo urbano 7

1.4 Impacto del polvo urbano en la salud humana 9

1.5 Evaluación del riesgo y medidas de mitigación 9

**CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA** 10

2.1 Obtención y validación de las bases de datos de Material Particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y condiciones meteorológicas de la zona urbana de Puebla. 10

2.2 Elaboración de mapas representativos de la dispersión del polvo urbano. 13

2.3 Revisión de literatura para la identificación de efectos del polvo urbano en la salud. 13

2.4 Búsqueda bibliográfica de medidas de mitigación de efectos del polvo urbano. 13

**CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** 14

3.1. Resultados de la obtención y validación de las bases de datos de monitoreo atmosférico y material particulado, así como de la determinación del porcentaje de datos disponibles y la elaboración de gráficas de frecuencia polar. 14

3.2. Resultados de la elaboración de los mapas que integran las gráficas generadas en QGIS. 33

3.3. Resultados sobre la identificación de los posibles efectos que tiene el material particulado y polvo urbano y su contenido, en la salud humana. 48

3.4. Resultados de la recopilación de información sobre las medidas existentes de mitigación y control de la contaminación del aire en Puebla. 52

**CONCLUSIONES** 53

**BIBLIOGRAFÍA** 55

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	15
-----------------	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos típicos de operación de los equipos de monitoreo atmosférico en la detección de material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	11
Tabla 2. Rangos de operación que deben tener los equipos meteorológicos en velocidad de viento y dirección del viento .....	11
Tabla 3. Categorías de desempeño anual de las estaciones de monitoreo atmosférico para evaluar la representatividad de los datos .....	15
Tabla 4. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado $PM_{2.5}$ de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022.....	43
Tabla 5. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado $PM_{2.5}$ de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023.....	44
Tabla 6. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado $PM_{10}$ de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022.....	45
Tabla 7. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado $PM_{10}$ de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023.....	47
Tabla 8. Concentraciones de metales pesados en el polvo urbano cercanos a las estaciones de monitoreo ambiental .....	50
<i>Tabla 9. Fuentes de emisión y generación de los metales pesados en el entorno urbano.....</i>	<i>51</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación Agua Santa en el año 2022 .....	17
Gráfica 2. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación BINE en el año 2022 .....	18
Gráfica 3. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación Ninfas en el año 2022.....	19
Gráfica 4. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación UTP en el año 2022 .....	20
Gráfica 5. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación Agua Santa en el año 2023 .....	21
Gráfica 6. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación BINE en el año 2023 .....	22
Gráfica 7. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación Ninfas en el año 2023.....	23
Gráfica 8. Dispersión del material particulado $PM_{2.5}$ en la estación UTP en el año 2023 .....	24
Gráfica 9. Dispersión del material particulado $PM_{10}$ en la estación Agua Santa en el año 2022 .....	25
Gráfica 10. Dispersión del material particulado $PM_{10}$ en la estación BINE en el año 2022.....	26
Gráfica 11. Dispersión del material particulado $PM_{10}$ en la estación Ninfas en el año 2022.....	27

Gráfica 12. Dispersión del material particulado PM <sub>10</sub> en la estación UTP en el año 2022.....	28
Gráfica 13. Dispersión del material particulado PM <sub>10</sub> en la estación Agua Santa en el año 2023 .....	29
Gráfica 14. Dispersión del material particulado PM <sub>10</sub> en la estación BINE en el año 2023.....	30
Gráfica 15. Dispersión del material particulado PM <sub>10</sub> en la estación Ninfas en el año 2023.....	31
Gráfica 16. Dispersión del material particulado PM <sub>10</sub> en la estación UTP en el año 2023.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de distribución del material particulado PM <sub>2.5</sub> en la Ciudad de Puebla en el año 2022 .....	35
Figura 2. Mapa de distribución del material particulado PM <sub>2.5</sub> en la Ciudad de Puebla en el año 2023 .....	37
Figura 3. Mapa de distribución del material particulado PM <sub>10</sub> en la Ciudad de Puebla en el año 2022 .....	39
Figura 4. Mapa de distribución del material particulado PM <sub>10</sub> en la Ciudad de Puebla en el año 2023 .....	41



## INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en las zonas urbanas es un tema de creciente preocupación en todo el mundo, especialmente en ciudades que experimentan una rápida expansión y desarrollo industrial; reportándose las últimas dos décadas, la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP) ha visto un aumento significativo en los niveles de contaminación del aire debido a factores como el incremento del parque vehicular, la expansión urbana y la actividad industrial (Castillo, Mendoza, García & Pérez, 2024).

La calidad del aire en la zona urbana de Puebla es un tema crítico debido a su impacto en la salud humana y el ambiente. Uno de estos problemas se centra en el contenido de metales pesados en el material particulado de diámetro de 10 micrómetros y 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) lo que plantea desafíos significativos para la salud pública y la calidad del aire en la región; este tema ya se ha mediado en medios de comunicación vía web visitados el 16 de abril de 2024: <https://www.iqair.com/mx/mexico/puebla> y <https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/reporteICA.php>. Es importante mencionar que la contaminación atmosférica es un tema de gran preocupación debido a los diversos componentes de origen natural, antropogénico y/o las emisiones de ceniza por el volcán Popocatepetl que se encuentran dispersas en el ambiente, siendo de especial atención los metales particulados en el entorno urbano, ya que existe un peligro toxicológico en la inhalación directa del material particulado atmosférico (Zereini et al., 2005; Ayrault et al., 2013; Santamaria et al., 2022).

Es esencial realizar evaluaciones detalladas y continuas de la calidad del aire, utilizando datos obtenidos de las estaciones de monitoreo atmosférico, las cuáles miden la cantidad de material particulado que se encuentre suspendido y muestra los patrones de distribución, del mismo modo proporcionan información valiosa para el análisis e investigación de la contaminación atmosférica (Castillo et al., 2024).

Este trabajo de investigación se centra en la dispersión del material particulado de diámetro de 10 micrómetros y 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en la zona urbana de Puebla, con el objetivo de analizar la distribución espacial de la contaminación del aire e identificar los posibles efectos de la contaminación del aire por material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y polvo urbano en la salud humana.

## **JUSTIFICACIÓN**

La contaminación del aire es un problema clave ambiental y social ya que afecta a las zonas urbanas en todo el mundo. En particular, la presencia de Material Particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en el aire, es el resultado del aumento de la actividad antropogénica como consecuencia del crecimiento poblacional, e igualmente puede ser generado por fuentes naturales como la polinización de las plantas, volcanes, calles sin pavimentar, incendios forestales, quema de combustibles fósiles para transporte y las industrias; por lo que es una preocupación significativa para la salud pública debido a sus efectos perjudiciales en los sistemas respiratorios y biológicos. Las fuentes de contaminación naturales y antrópicas emiten gases y partículas de diferentes tamaños con una variedad de compuestos químicos; cuando éstos se depositan en la superficie urbana forman parte del polvo urbano (PU) (Legarreta et al., 2016; Cejudo et al., 2022).

Esta investigación no solo contribuye al conocimiento científico sobre la calidad del aire en Puebla, sino que también proporciona información para el posible desarrollo de investigaciones sobre el análisis y relación entre el Material Particulado y el polvo urbano en la zona urbana de Puebla, así como en la comprensión de cómo estos afectan la salud humana. Los hallazgos de este estudio pueden ser útiles para las autoridades ambientales, el sector salud y para ser una posible referencia para la concientización ambiental, dirigida sobre todo a la población expuesta directamente a fuentes de contaminación como escapes de los autos, chimeneas de establecimientos, etc. en general se busca el bienestar de la población.

## **OBJETIVOS**

Objetivo general:

Analizar la distribución espacial de la contaminación del aire por Material Particulado (PM) y polvo urbano.

Objetivos específicos:

- Validar las bases de datos de las concentraciones de Material Particulado (PM) de la zona urbana de Puebla de los años 2022 y 2023.
- Conocer la distribución del Material Particulado (PM) y polvo urbano en el aire de la ciudad de Puebla, identificando las zonas con mayor contaminación.
- Identificar en fuentes bibliográficas los posibles efectos de la contaminación del aire por Material Particulado (PM) y polvo urbano en la salud humana.
- Identificar en fuentes bibliográficas las medidas existentes de mitigación y control de la contaminación del aire en Puebla.

## **HIPÓTESIS**

En las zonas altamente transitables se concentra la mayor cantidad de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

De acuerdo con el INEGI, Puebla es la cuarta ciudad más poblada del país con 1,692,181 habitantes y tiene un tráfico intenso de 1,269,822 de vehículos de motor, así como una importante zona industrial en su área metropolitana. La calidad del aire en las áreas urbanas de esta ciudad ha sido un tema de creciente preocupación debido a la contaminación por material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y polvo urbano; las fuentes de contaminación en esta región incluyen tanto emisiones antropogénicas, como las relacionadas con el tráfico vehicular y las actividades industriales, así como fenómenos naturales, entre los que destacan las emisiones volcánicas del Popocatepetl; las partículas suspendidas en el aire, especialmente aquellas de tamaño  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , son las más preocupantes debido a su capacidad para penetrar en el sistema respiratorio humano y causar diversos problemas de salud; de acuerdo con estudios recientes, la contaminación del aire se ha visto agravada en los últimos años por el crecimiento urbano y el aumento en el uso de vehículos motorizados en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP) (Juárez, Gay, y Flores, 2005; Osorio, Torrijos, Sánchez y Arroyo, 2011; INEGI, 2020; Castillo et al., 2024; INEGI, 2024).

Además de las fuentes volcánicas y antropogénicas, se ha documentado que la calidad del aire también se ve afectada por las condiciones meteorológicas y geográficas de la región; Puebla capital, ubicada en un valle rodeado por montañas, experimenta fenómenos meteorológicos que pueden atrapar contaminantes en la atmósfera, lo cual agrava la situación de la calidad del aire; los modelos meteorológicos ayudan a realizar un análisis espacial en el cual se puede comprender mejor los factores que influyen a el transporte y dispersión de los contaminantes entre diferentes áreas metropolitanas, como Ciudad de México y Puebla, sugiriendo que las condiciones meteorológicas locales como los patrones de las corrientes de viento y la dirección de propagación de la pluma de contaminación ejercen una influencia significativa en la concentración y distribución

de contaminantes (Osorio et al., 2011; González, Mendoza, Fuentes y Baldasano, 2016; Santamaria et al., 2022).

### 1.1 Contaminación del aire y polvo urbano

La contaminación del aire en las zonas urbanas es un problema ambiental significativo que afecta la calidad de vida de la población; una de las fuentes importantes de contaminación del aire son las partículas de polvo urbano y el material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y son los componentes más críticos del entorno urbano en términos de salud pública, ya que se consideran importantes portadores de metales pesados y otros contaminantes; el material particulado incluye a menudo tanto las partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) como las partículas gruesas ( $PM_{10}$ ), que son una mezcla de partículas orgánicas e inorgánicas; el polvo urbano se compone de partículas suspendidas en el aire que provienen de diversas fuentes, como materiales orgánicos, materiales inorgánicos, esporas de moho, polen, escamas de piel de animales, tráfico vehicular, la actividad industrial, la construcción, la erosión del suelo y los metales pesados (Morales, et al., 2014 ;Cejudo et al., 2022; Naimabadi et al., 2022; Suvetha et al., 2022).

Las fuentes comunes de metales pesados en partículas de polvo en ciudades mexicanas son: por contaminación natural como volcanes y material geológico por erosión del viento; y también por origen antropogénico como lo es la quema de combustibles fósiles, basura y residuos agrícolas, procesos industriales y el tráfico vehicular en calles pavimentadas y no pavimentadas, en este último caso, las partículas de polvo son suspendidas en el aire por el movimiento de automóviles, además de que el polvo de las carreteras también se genera por el desgaste de partes de vehículos, como los neumáticos y frenos (Legarreta et al., 2016; Suvetha et al., 2022).

### 1.2 Metales pesados en el polvo urbano

Entre los componentes del material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y el polvo urbano, los metales pesados atmosféricos se consideran uno de los principales contaminantes

responsables de causar impactos negativos significativos en la salud humana y la calidad ecológica, y el monitoreo y el estudio de estos componentes ayudará a el desarrollo de estrategias de mitigación de riesgos (Salazar, 2023).

Por otro lado, los metales pesados son elementos químicos que pueden ser tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente. Las emisiones de los vehículos generan gases de efecto invernadero, material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), con presencia de metales pesados, tales como: Cromo (Cr), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V), Hierro (Fe) y Zinc (Zn), por la quema de combustible, el desgaste del motor y piezas vehiculares. En la fracción de PM<sub>10</sub> se encuentran de un 75% a un 90% de estos metales, lo cual implica que existe un alto porcentaje de riesgo y probabilidad de generar daños graves al organismo expuesto (Pérez y Hernández, 2006; Salazar, 2023).

Se conjetura que el desarrollo urbano y el aumento del tráfico constante ha llevado un ascenso en la contaminación atmosférica por vehículos motorizados, sobre todo cuando se enciende el motor de un vehículo y la mayor parte de partículas del convertidor catalítico se asienta en la superficie de la carretera en calles y avenidas. Resultado de esto, se liberan varios metales pesados, como el Platino (Pt), Paladio (Pd) y Rodio (Rh), al mismo tiempo una de las razones detrás de la presencia de los metales pesados en las ciudades es el patrón de 'parada y arranque', el flujo del tráfico, desgaste del vehículo como los neumáticos y frenos, de igual modo se relaciona la congestión en áreas específicas de las ciudades como sucede en rotondas, semáforos y cruces (Charlesworth, Everett, McCarthy, Ordoñez y de Miguel, 2003; Ward y Dudding, 2004; Ewen, Anagnostopoulou y Ward, 2009).

En el caso particular de la ciudad de Puebla y zona conurbada, se suma la presencia de ceniza volcánica depositada en la zona urbana.

### 1.3 Ceniza volcánica en el polvo urbano

La ceniza volcánica es un tipo de partícula que puede estar presente en el polvo urbano, especialmente en regiones cercanas a volcanes activos o áreas afectadas

por erupciones volcánicas recientes. Los volcanes pueden liberar una gran cantidad de partículas, desde nano (<50 nm) hasta partículas gruesas PM<sub>10</sub> a la atmósfera; las partículas pequeñas contenidas en la ceniza volcánica son potencialmente inhaladas con facilidad, la mayor parte se aloja en la mucosa nasal y, dada su naturaleza abrasiva, causan inflamación. Algunas llegan a las vías respiratorias bajas; la respiración de estas partículas se manifiesta con síntomas como escurrimiento y obstrucción nasal, irritación en la garganta, tos, flema y en casos extremos en pacientes con enfermedades respiratorias crónicas se presenta dificultad para respirar y broncoespasmo de menor a mayor intensidad (Narváz y Cano, 2004; Trejos et al., 2021).

La ceniza volcánica se constituye por compuestos amorfos (vidrios), cristalinos (minerales) y también investigaciones han detectado metales pesados en pequeñas cantidades. La deposición de ceniza volcánica en áreas urbanas puede ser una fuente adicional de contaminación del aire y puede contribuir a la presencia de polvo urbano debido a que la caída del material particulado se deposita sobre el suelo, casas, calles y en las hojas de plantas y árboles (Shruti, Rodríguez, Martínez, y Hernández, 2018; Santamaria et al., 2022).

Adicionalmente, la actividad volcánica del Popocatepetl ha contribuido significativamente a la calidad del aire en la zona urbana de Puebla y sus alrededores, ya que la emisión de cenizas y otros materiales particulados provenientes del volcán ha sido una constante preocupación para los habitantes de esta región; las partículas de ceniza volcánica contienen metales pesados que pueden ser inhalados o ingeridos, representando un riesgo potencial para la salud humana. Las investigaciones realizadas en el área han identificado la presencia de metales como Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Cromo (Cr) en las cenizas volcánicas, los cuales pueden tener efectos tóxicos en el cuerpo humano si son inhalados o entran en contacto con la piel (Shruti et al., 2018).



#### 1.4 Impacto del polvo urbano en la salud humana

La exposición a metales pesados por medio del polvo urbano, pueden tener efectos adversos en la salud humana; por lo que el abanico de las repercusiones en la salud es amplio, produciéndose en particular en los sistemas respiratorio y cardiovascular, y pueden variar desde irritación ocular y/o respiratoria hasta enfermedades crónicas más graves, de esta forma la exposición e inhalación del polvo urbano que contiene metales pesados, comienzan a producir efectos dañinos en la mayoría de los órganos vitales, ya que no existe un mecanismo por el cual los metales puedan metabolizarse en el cuerpo, en consecuencia, estos metales se acumulan en los tejidos y provocan malfuncionamientos y enfermedades (OMS, 2006; Naimabadi et al., 2022).

#### 1.5 Evaluación del riesgo y medidas de mitigación

Es fundamental evaluar el riesgo asociado con la exposición a metales pesados y ceniza volcánica en el polvo urbano, así como tomar medidas para mitigar este riesgo, esto incluye la monitorización de la calidad del aire, junto con la implementación de políticas y acciones dirigidas a reducir las emisiones y minimizar la exposición de la población a la contaminación (EPA, 2016).

Además del monitoreo y cuantificación de la contaminación del aire, se requiere de medidas como la regulación y control de emisiones de las fuentes industriales y límites establecidos para las emisiones promedio de, gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), el empleo de combustibles más limpios para el transporte y el cumplimiento de las normas de regulación vehicular actualizadas pueden mitigar significativamente los aumentos proyectados en las concentraciones de material particulado, aunque los impactos de los diferentes enfoques varían en distintas áreas de la ciudad, de igual modo es importante el monitoreo constante para examinar la reducción de las emisiones y la mejora de la calidad del aire (OMS, 2006; EPA, 2016; East et al. 2021).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, se desarrolló la siguiente metodología.

2.1 Obtención y validación de las bases de datos de Material Particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y condiciones meteorológicas de la zona urbana de Puebla.

### Obtención:

Se solicitaron las bases de datos de Material Particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y de las condiciones meteorológicas (velocidad y dirección del viento) de los años 2022-2023, a la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT), por medio de la plataforma nacional de transparencia.

### Validación:

Se realizó la validación de las bases de datos, utilizando el Software de RStudio, con el motivo de hacer más ágil la validación de las bases de datos, todo el proceso se desarrolló de acuerdo con los límites y parámetros indicados en el Manual 5 del SINAICA del año 2010 publicado por el Instituto Nacional de Ecología (INE), se tomó de referencia el capítulo 3. BASE DE DATOS DE LA CALIDAD DEL AIRE Y CRITERIOS BÁSICOS PARA SU MANEJO.

En este capítulo se abordan las etapas iniciales del manejo de datos, que incluyen la limpieza y verificación de estos. Además, se presentan los primeros pasos necesarios para conformar una base de datos, proponiendo un formato para su organización. Se explican conceptos para evaluar la calidad de los datos, se proporcionan ejemplos y se mencionan algunas herramientas de estadística. Además de que se detallan las características que deben tener las bases de datos verificadas provenientes de ambos tipos de equipos de medición que son los automáticos y manuales (INE, 2010).

La etapa inicial del manejo de datos para distinguir los datos correctos de los incorrectos es conocer los límites o el rango de operación para los contaminantes,

que en este caso se muestran los que son para el material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Tabla 1).

Tabla 1. Rangos típicos de operación de los equipos de monitoreo atmosférico en la detección de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Tamaño de partícula	Límites del rango de operación
Partículas PM <sub>10</sub>	0-1000 $\mu g/m^3$
Partículas PM <sub>2.5</sub>	0-1000 $\mu g/m^3$

Elaborado a partir de datos extraídos del Instituto Nacional de Ecología (INE), 2010.

Al igual que conocer los rangos de operación de los equipos meteorológicos, particularmente de la velocidad y dirección del viento (Tabla 2).

Tabla 2. Rangos de operación que deben tener los equipos meteorológicos en velocidad de viento y dirección del viento

Parámetro	Límites del rango de Operación
Velocidad del Viento	0 – 50 $m/s$
Dirección del Viento	0-360°

Elaborado a partir de datos extraídos del Instituto Nacional de Ecología (INE), 2010.

Además, para simplificar el manejo de los datos durante las etapas de limpieza, verificación y validación, se recomienda guardar el archivo con registros en resolución horaria y con una frecuencia mensual, es decir, un archivo por cada mes. Al finalizar el año, se deberá compilar un archivo que reúna todos los registros obtenidos durante los doce meses (INE, 2010).

Es necesario verificar la completación de los datos para cada contaminante o variable meteorológica en cada estación de medición, con el fin de identificar aquellas que tienen la información requerida en intervalos de una hora, un día, un mes, un

trimestre y, en algunos casos, durante un año o varios años. Esta revisión debe realizarse sobre la base de datos ya validada, una vez que se han identificado los datos válidos y eliminado los registros inconsistentes o aislados.

En el Manual 5 del SINAICA, en el caso del desempeño anual e histórico por estación de medición, menciona que para generar indicadores que puedan representar el comportamiento de un contaminante o variable meteorológica en el periodo de un año o varios años se aconseja evaluar el desempeño anual y el histórico de las estaciones de medición. En la instancia en que se realizó la validación de datos fue de un desempeño anual por estación por lo que el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) califica este como bueno cuando se registra el 75% o más de datos válidos; regular cuando registra el 50% o más de los datos sin llegar al 75%; y malo cuando registra menos del 50% de datos válidos (INE, 2010).

La validación de las bases de datos se llevó a cabo en el software RStudio, donde también se utilizó la función `polarFreq` para la elaboración de las gráficas.

La función `polarFreq`, según el manual de `Openair`, es un gráfico personalizado para mostrar de manera compacta la distribución de velocidades y direcciones del viento a partir de mediciones meteorológicas. Es similar a la rosa de los vientos tradicional, pero incluye una serie de mejoras para mostrar también cómo varían las concentraciones de contaminantes y otras variables. Puede resumir todos los datos disponibles o mostrarlos por diferentes períodos de tiempo, por ejemplo, por año, mes, día de la semana; la función también puede considerar una amplia gama de parámetros estadísticos (Carslaw, 2019).

La gráfica de polar frequency (frecuencia polar) proporcionó una visualización detallada de cómo las concentraciones de un contaminante (en este caso, la columna STA) varían con la dirección y la velocidad del viento; para lograr interpretar las gráficas, se consideraron los siguientes puntos:

Dirección del Viento:

- La gráfica es circular y cada segmento radial representa una dirección del viento.

Velocidad del Viento:

- Los anillos concéntricos representan diferentes rangos de velocidad del viento, entonces cuanto más lejos del centro se encuentra un punto, mayor es la velocidad del viento.

Intensidad del color:

- Los colores en la gráfica representan el promedio de la concentración del contaminante. Dependiendo de la paleta de colores utilizada, se muestran desde colores brillantes u oscuros.

## 2.2 Elaboración de mapas representativos de la dispersión del polvo urbano.

Con la información que se obtuvo de las bases de datos se elaboraron mapas con el uso de QGIS en donde se incorporaron las gráficas generadas previamente, y cuya finalidad fue observar la distribución del material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) e identificar las zonas con mayor contaminación en la ciudad.

## 2.3 Revisión de literatura para la identificación de efectos del polvo urbano en la salud.

Con base en los resultados del objetivo anterior, se realizó una búsqueda bibliográfica en donde se identificaron los posibles efectos del material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y del polvo urbano, así como de su composición, en la salud humana.

## 2.4 Búsqueda bibliográfica de medidas de mitigación de efectos del polvo urbano.

Por medio de una búsqueda bibliográfica, se reconocieron las medidas existentes de mitigación y control de la contaminación del aire en Puebla.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con la finalidad de dar respuesta a los objetivos planteados, a continuación, se presentan los resultados por objetivos.

3.1. Resultados de la obtención y validación de las bases de datos de monitoreo atmosférico y material particulado, así como de la determinación del porcentaje de datos disponibles y la elaboración de gráficas de frecuencia polar.

Después de la obtención de las bases de datos de monitoreo atmosférico y material particulado, se procedió a realizar la validación de estas mismas en el programa RStudio, seguidamente de la validación de los datos, se aplicó el promedio en porcentaje a cada columna que contiene datos del contaminante (STA), velocidad del viento (ws) y dirección del viento (wd) para comprobar si se está trabajando con un porcentaje mayor o igual a 75% de los datos o con un porcentaje menor, esto con el fin de determinar el desempeño de la estación y así valorar la fiabilidad de los datos que se están empleando.

Es decir las estaciones de medición que son evaluadas con un buen desempeño anual (Tabla 3) cuentan con información completa para generar indicadores, mientras que aquellas con una clasificación inferior necesitan mejoras para poder registrar una mayor cantidad de datos válidos en el futuro (INE, 2010).

Tabla 3. Categorías de desempeño anual de las estaciones de monitoreo atmosférico para evaluar la representatividad de los datos

Equipo de monitoreo	Datos válidos		
	Malo	Regular	Bueno
	(<50%)	(>=50% y <75%)	(>= al 75%)
	0 a 4291	4392 a 6587	6588 a 8784
Automático	(año bisiesto)	(año bisiesto)	(año bisiesto)
	0 a 4379	4380 a 6569	6570 a 8760
	(año no bisiesto)	(año no bisiesto)	(año no bisiesto)

Elaborado a partir de datos extraídos del Instituto Nacional de Ecología (INE), 2010.

Después de haber determinado el desempeño de la estación, en el mismo software, RStudio, con la ayuda de la librería Openair, se utilizó la función *polarFreq* para generar las gráficas, como se muestra en la Ecuación 1.

```
polarFreq (datos_resultado, pollutant = "STA", statistic = "mean", ws.int = 0.5, grid.
line = 0.5, breaks = seq (0, n, x), cols = "jet", main = "AguaSanta2022_PM25")
...Ecuación 1.
```

Ecuación utilizada para la elaboración de las gráficas de dispersión de los contaminantes

Donde:

- polarFreq: Es la función que genera gráficas de frecuencia polar, útil para analizar la distribución de concentraciones de un contaminante en relación con la dirección y velocidad del viento.
- datos\_resultado: El conjunto de datos que contiene las variables que se van a analizar.

- pollutant = "STA" es una variable que representa la concentración de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.
- statistic = "mean": Define el tipo de estadística que se calculará para las concentraciones. En este caso, se calcula el promedio (mean) de las concentraciones de "STA".
- ws.int = 0.5: Establece los intervalos de velocidad del viento para la gráfica. Aquí, el intervalo es de 0.5 m/s.
- grid.line = 0.5: Define el espaciado de las líneas de la cuadrícula en la gráfica polar. En este caso, se colocan líneas de cuadrícula cada 0.5 unidades.
- breaks = seq (0, n, x): Establece los intervalos para las categorías del contaminante. Aquí, se crean divisiones desde 0 hasta n, en incrementos de x.
- cols = "jet": Define la paleta de colores utilizada en la gráfica, usada comúnmente para representar rangos de concentración.

La estadística que se calculó fue el promedio del contaminante, con un intervalo de 0.5 m/s en la velocidad de viento esto con el fin de examinar óptimamente la concentración del material particulado; se colocaron los círculos concéntricos cada 0.5 espacios para una mejor observación y comprensión de la gráfica, también se proporcionó una escala personalizada para cada estación y así se establecieron rangos de la tabla del promedio de las concentraciones, esto con el objetivo de examinar conscientemente las concentraciones de material particulado que presentaron las estaciones a lo largo del año indicado.

Se trabajó con datos que en algunos casos cumplían con el porcentaje mínimo anual del 75%, mientras que en otros eran menores a 75% o al 50%. Dado que los datos con un porcentaje menor se consideran de fiabilidad regular o mala, los análisis realizados con estos datos fueron clasificados como regulares o malos, por lo que



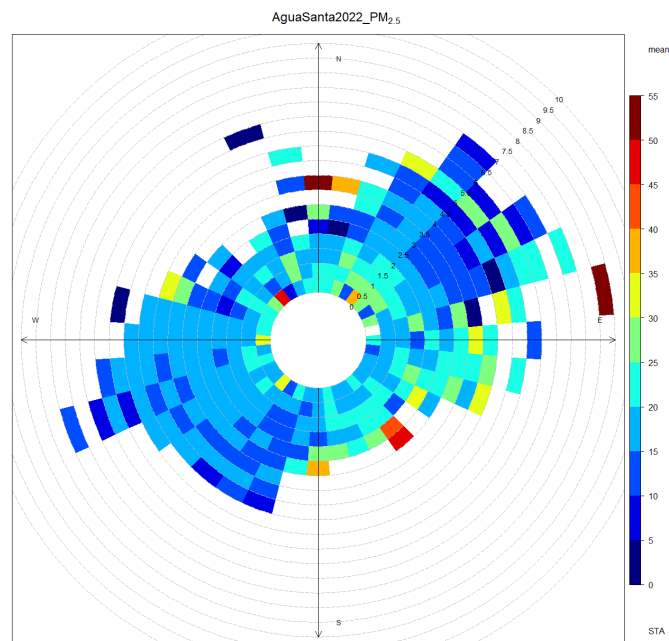
la calidad incompleta de información en ciertos períodos podría afectar la representatividad de los resultados.

### **Resultados de la dispersión del material particulado PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en el año 2022, representado en gráficas.**

Se puede apreciar que en la dirección suroeste las concentraciones registradas son muy bajas al alcanzar máximos puntuales de  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , no obstante, para decidir la dirección del viento dominante se puede decir que se presenta incertidumbre, ya que en la dirección este se presenta la concentración máxima de  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con velocidad de 8.5 m/s, pero también vientos de hasta 7.5 m/s con concentraciones bajas, y hacia el norte existen concentraciones de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a velocidades bajas, lo que dificulta determinar con suficientes argumentos una dirección predominante (Gráfica 1).

Porcentaje de datos combinados totales con el que se elaboraron las gráficas: 69.40%

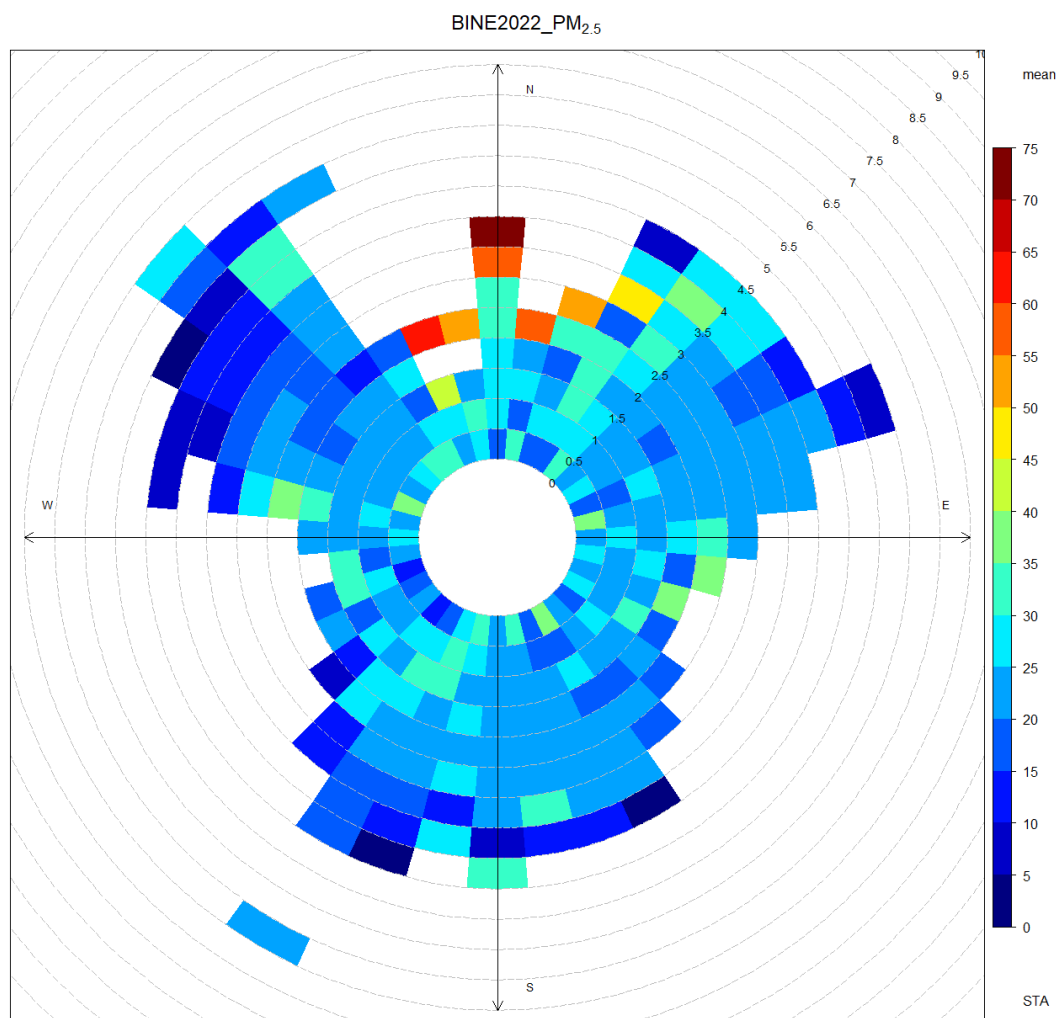
Gráfica 1. Dispersión del material particulado PM<sub>2.5</sub> en la estación Agua Santa en el año 2022



Pese a la baja disponibilidad de datos, se observa claramente que la velocidad predominante oscila entre los 2 m/s y los 4 m/s, y la dirección predominante el Norte, noroeste y noreste. Los otros puntos cardinales presentan velocidades y concentraciones bajas. La máxima concentración que presentó la estación fue de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gráfica 2).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 46.22%

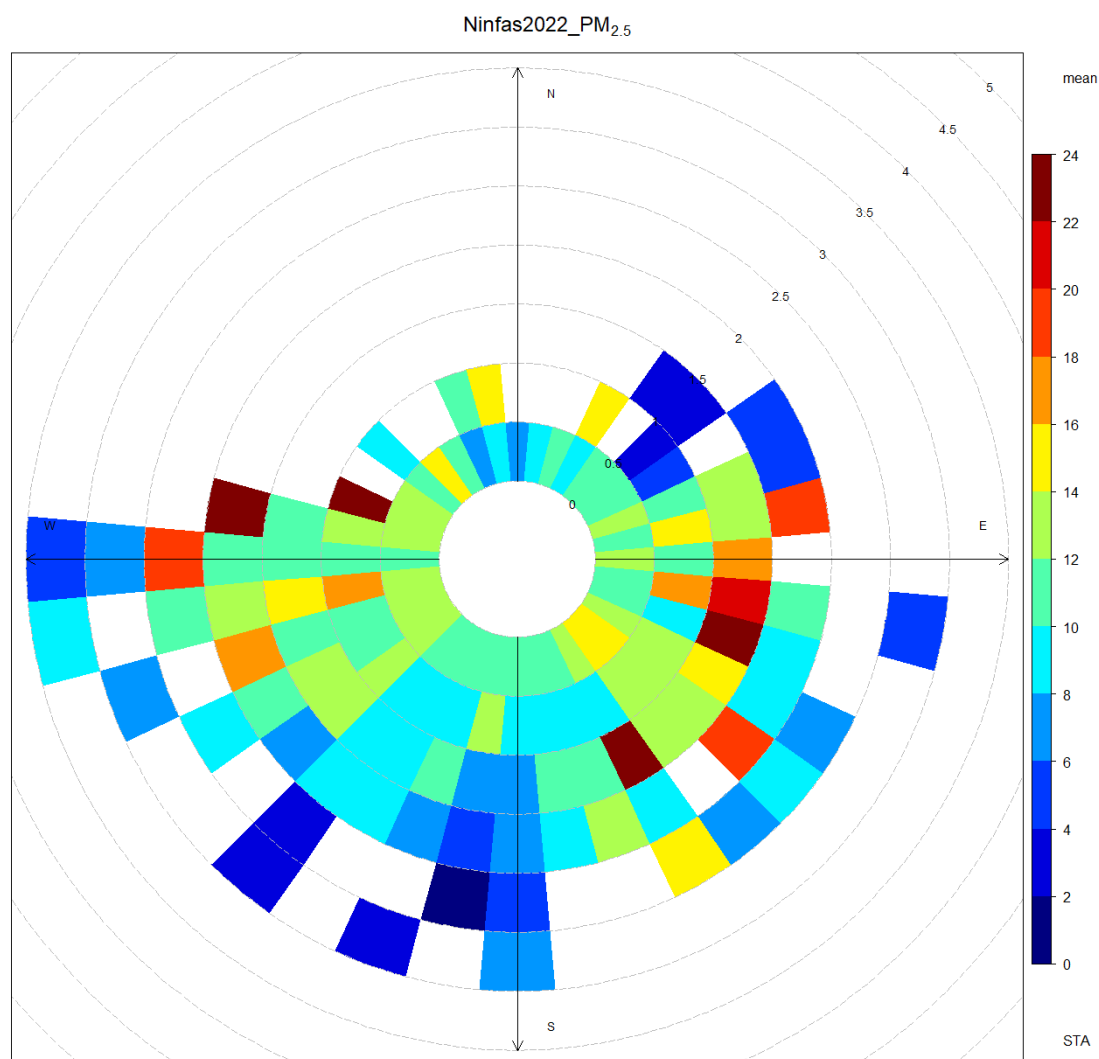
Gráfica 2. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{2.5}$  en la estación BINE en el año 2022



Este gráfico en particular carece de un análisis fiable ya que se presenta la ausencia de datos, pero se presentan concentraciones máximas en direcciones opuestas (este y oeste) y a veces esto se puede dar por que la dirección del viento y velocidad cambia conforme pasa el año, o hay fuentes que estén generando una gran cantidad de material particulado constantemente en esos puntos (Gráfica 3).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 31.83%

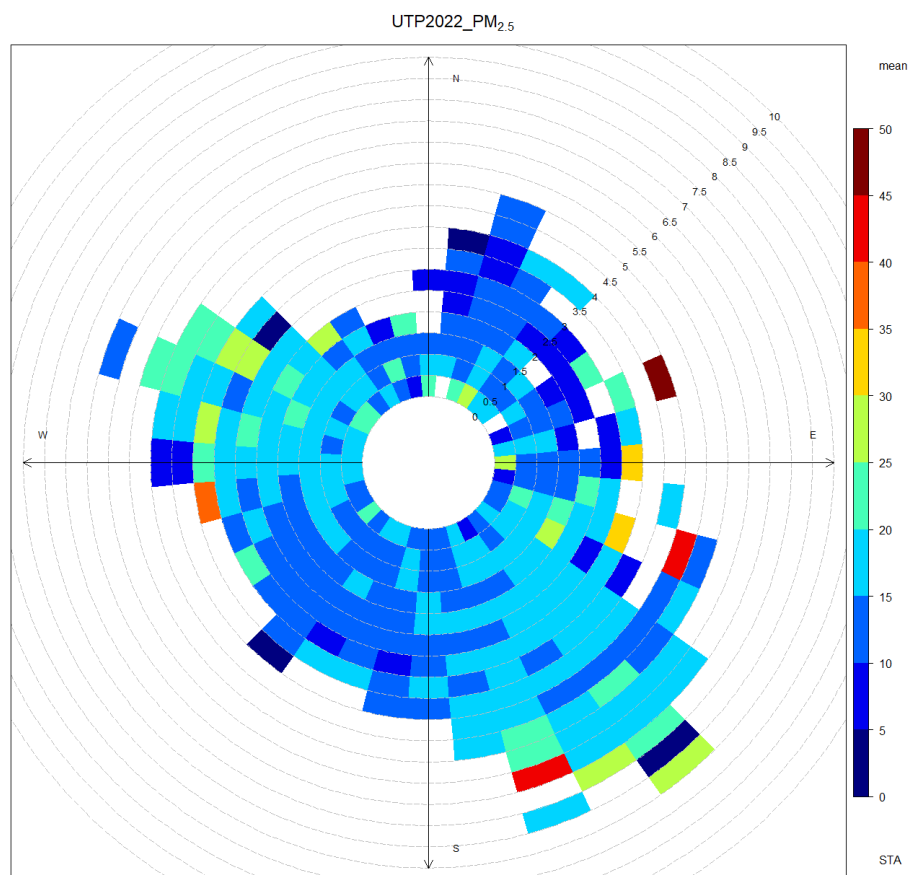
Gráfica 3. Dispersión del material particulado PM<sub>2.5</sub> en la estación Ninfas en el año 2022



El siguiente gráfico presenta una suficiencia de datos regular para poder interpretar la concentración y dirección del viento, en la región noreste se tiene el registro de concentración máxima, sin embargo, no se tienen registros de velocidad continuos en esa área. En cambio, en la dirección sureste, se tienen concentraciones ligeramente inferiores (de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con velocidades que oscilan de los 4.5 m/s a los 6.5 m/s, con mayor cantidad de registros que enriquecen y hacen más confiable la información de esa dirección, por lo que la dirección dominante es de oeste a este (Gráfica 4).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 73.93%

Gráfica 4. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{2.5}$  en la estación UTP en el año 2022

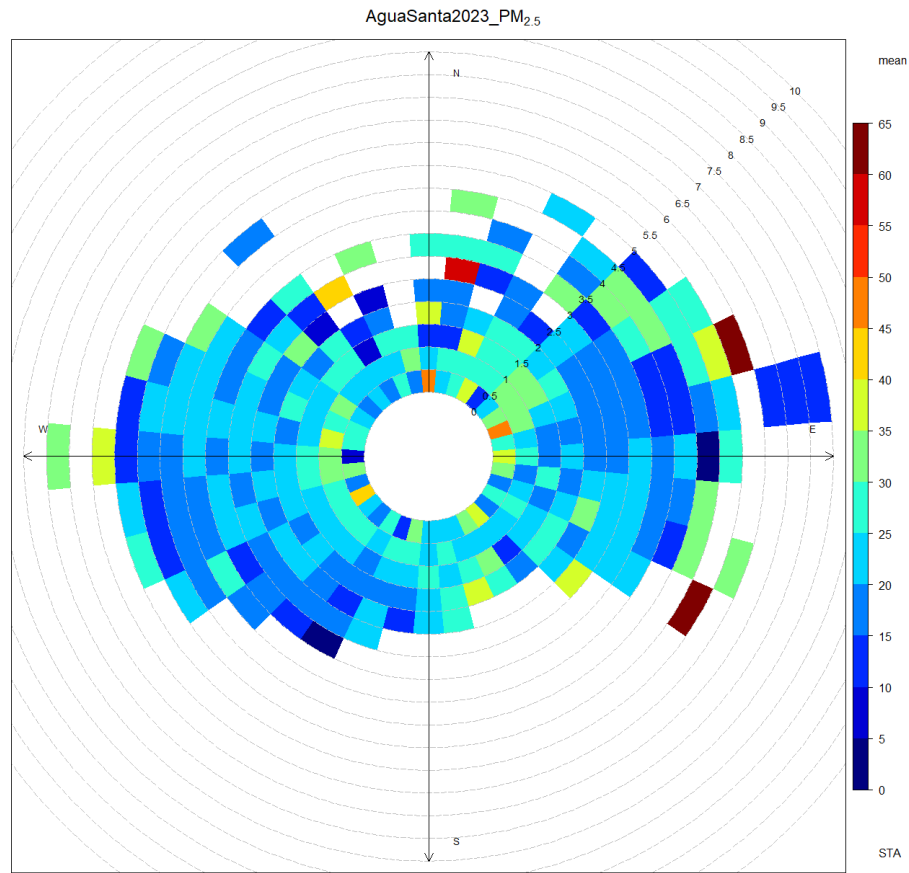


**Resultados de la dispersión del material particulado PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en el año 2023, representado en gráficas.**

Se puede apreciar que en la dirección comprendida entre sureste-noreste, en sentido antihorario, se encuentra la velocidad predominante de 5.5 m/s al registrarse la concentración máxima para ambos casos, sin embargo, la dirección predominante es incierta ya que en la dirección este (zona intermedia entre los máximos registrados) se encuentran las concentraciones más bajas (de hasta 30  $\mu g/m^3$ ) por lo que sería más conservador el proponer la región sureste-noreste (Gráfica 5).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 63.57%

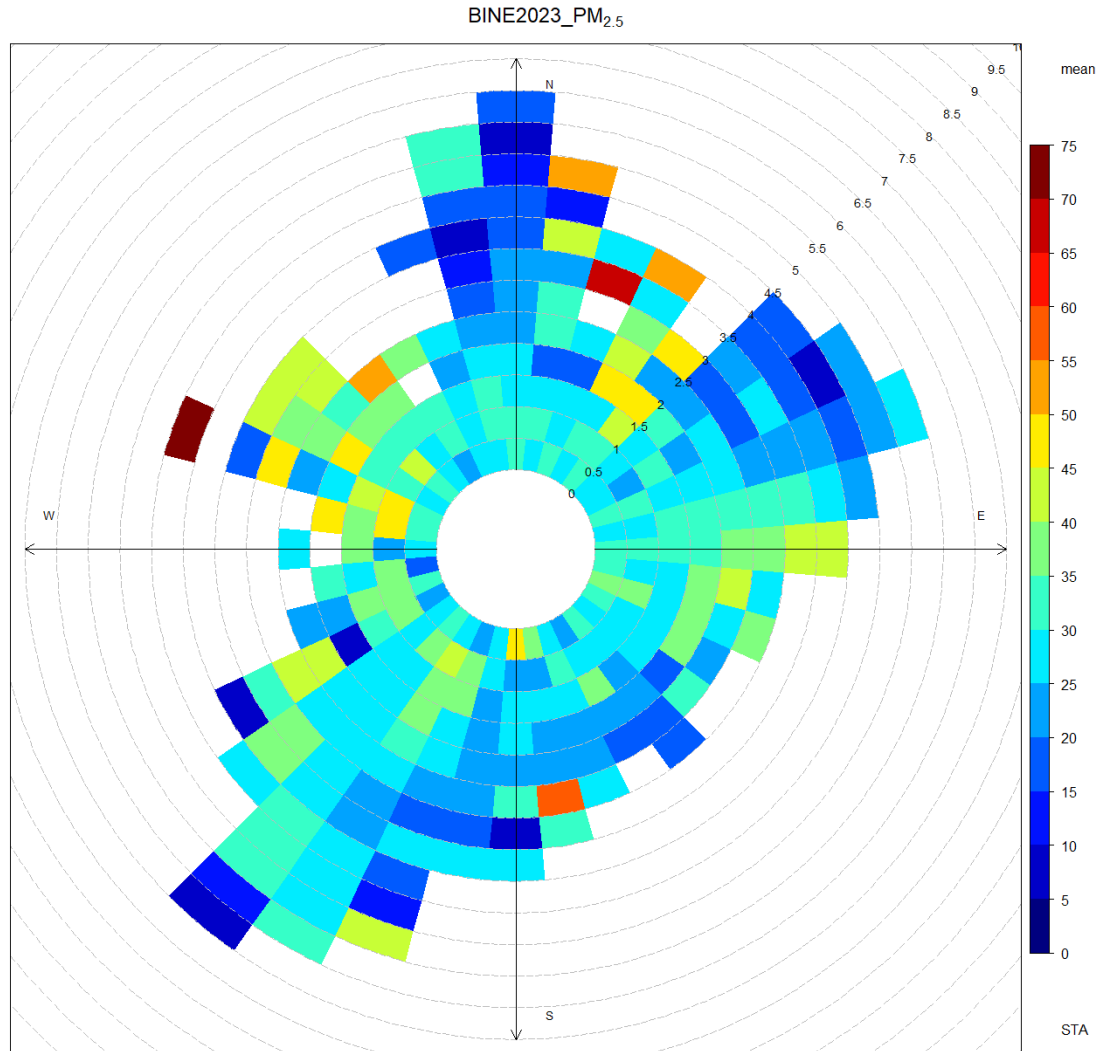
Gráfica 5. Dispersión del material particulado PM<sub>2.5</sub> en la estación Agua Santa en el año 2023



En este gráfico se presenta incertidumbre en las tendencias de concentración y velocidad en el aire, se tiene en la región comprendida entre el noreste y oeste (en el sentido de las agujas del reloj) las concentraciones más bajas (desde 0 hasta 50  $\mu g/m^3$ ) lo que nos deja la región restante de oeste a noreste como la posible dirección predominante del viento, con velocidad predominante de 3 a 4 m/s (Gráfica 6).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 65.86%

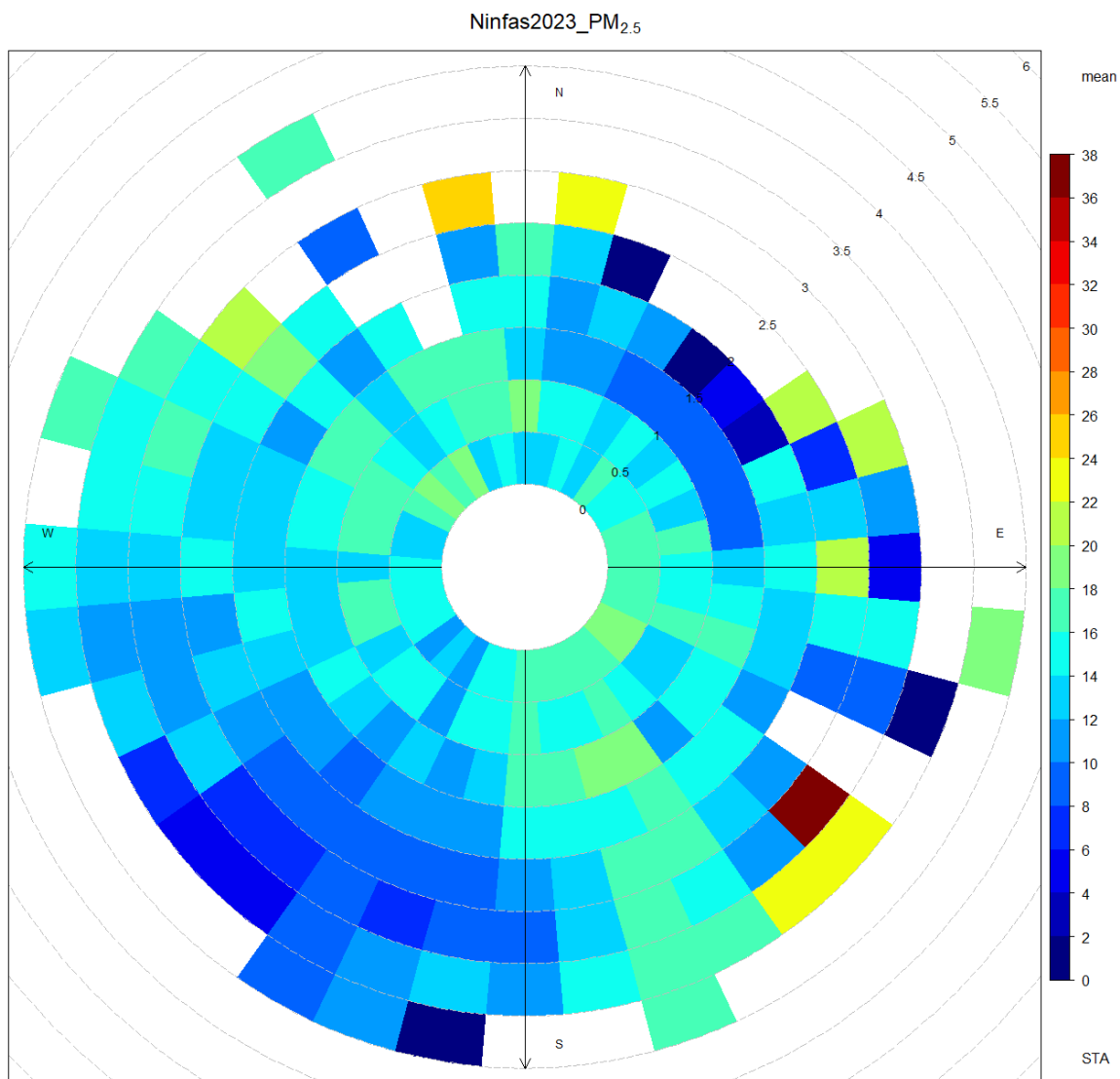
Gráfica 6. Dispersión del material particulado  $PM_{2.5}$  en la estación BINE en el año 2023



En este gráfico se observa a la región suroeste como aquella que presenta las menores concentraciones registradas, y la zona noreste como la que tiene velocidades más bajas. Es evidente la dirección predominante en la región Sureste, con una velocidad de 2.5 m/s a 4 m/s ya que es aquí donde se tiene el registro de la concentración máxima alcanzada de  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gráfica 7).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 74.92%

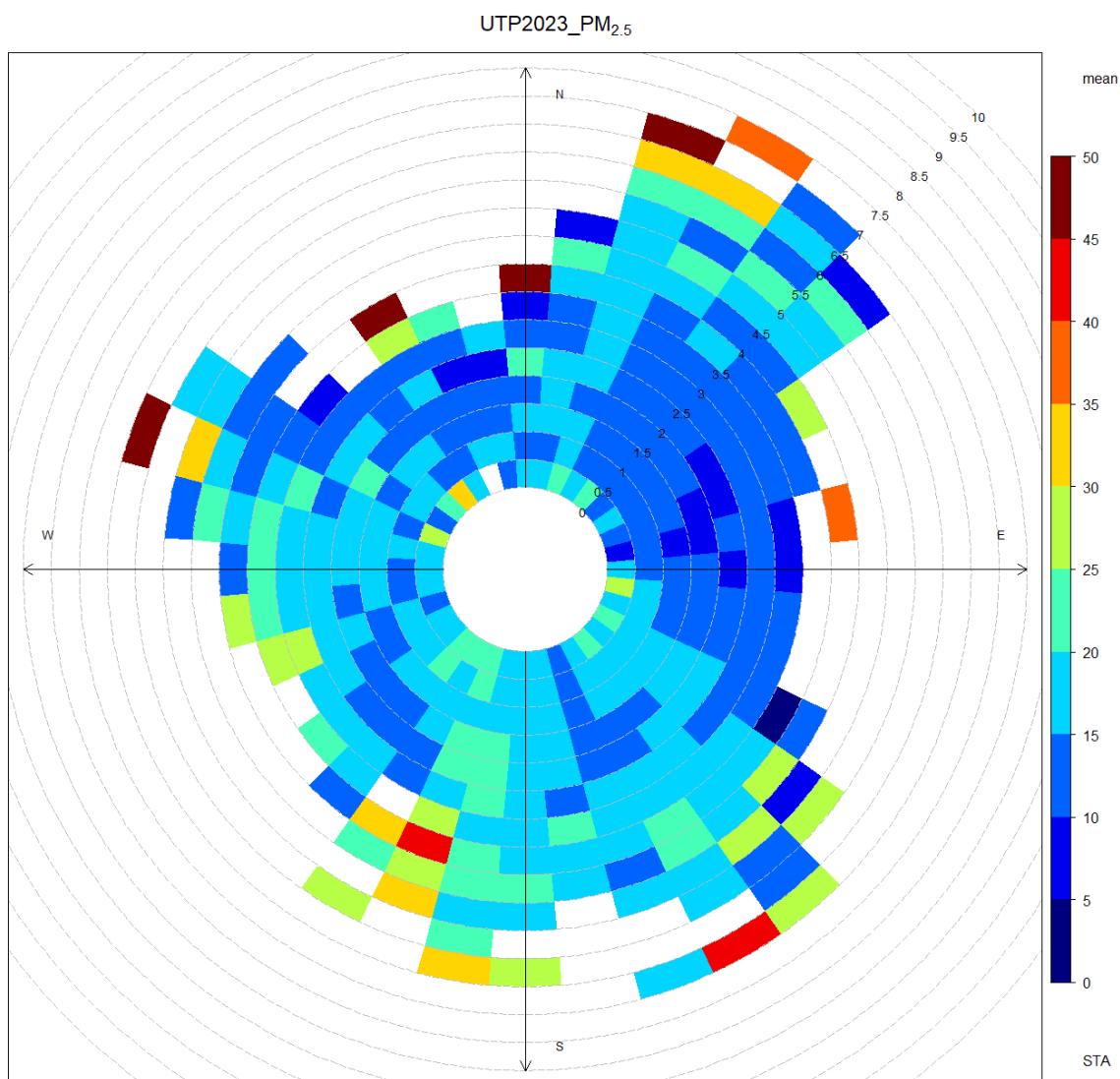
Gráfica 7. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{2.5}$  en la estación Ninfas en el año 2023



En este gráfico se aprecia que la dirección predominante del viento se localiza del lado norte al Sur, en sentido de las manecillas del reloj, con velocidades que pueden variar desde los 3.5 m/s hasta los 6.5 m/s y concentraciones máximas de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se nota que en la dirección Sur se alcanzan concentraciones igualmente altas que oscilan entre 30 y  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gráfica 8).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 81.83%

Gráfica 8. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{2.5}$  en la estación UTP en el año 2023



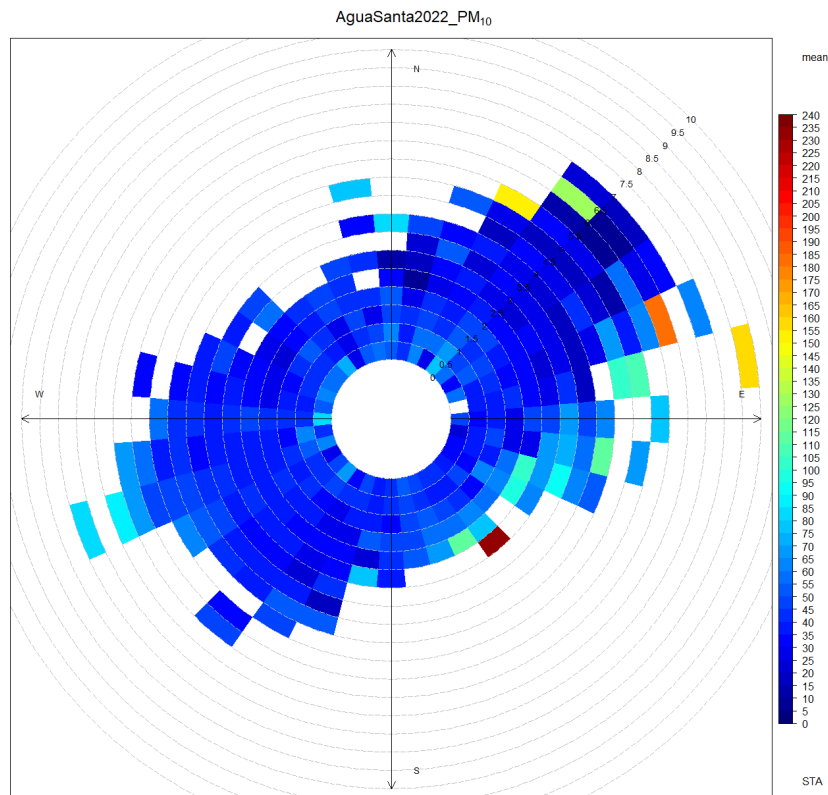


**Resultados de la dispersión del material particulado PM<sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo atmosférico en el año 2022, representado en gráficas.**

En este grafico se aprecia que la zona oeste del cuadrante presenta concentraciones por debajo de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que en el sureste se registra una concentración muy alta que alcanza concentración de 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a una velocidad predominante de 2.5 m/s a 3 m/s, cabe notar que el noroeste y sureste son las zonas donde se presentan las velocidades más bajas, siendo el noreste y Suroeste las regiones con velocidades intermedias y donde predomina la dirección del viento (Gráfica 9).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 85.74%

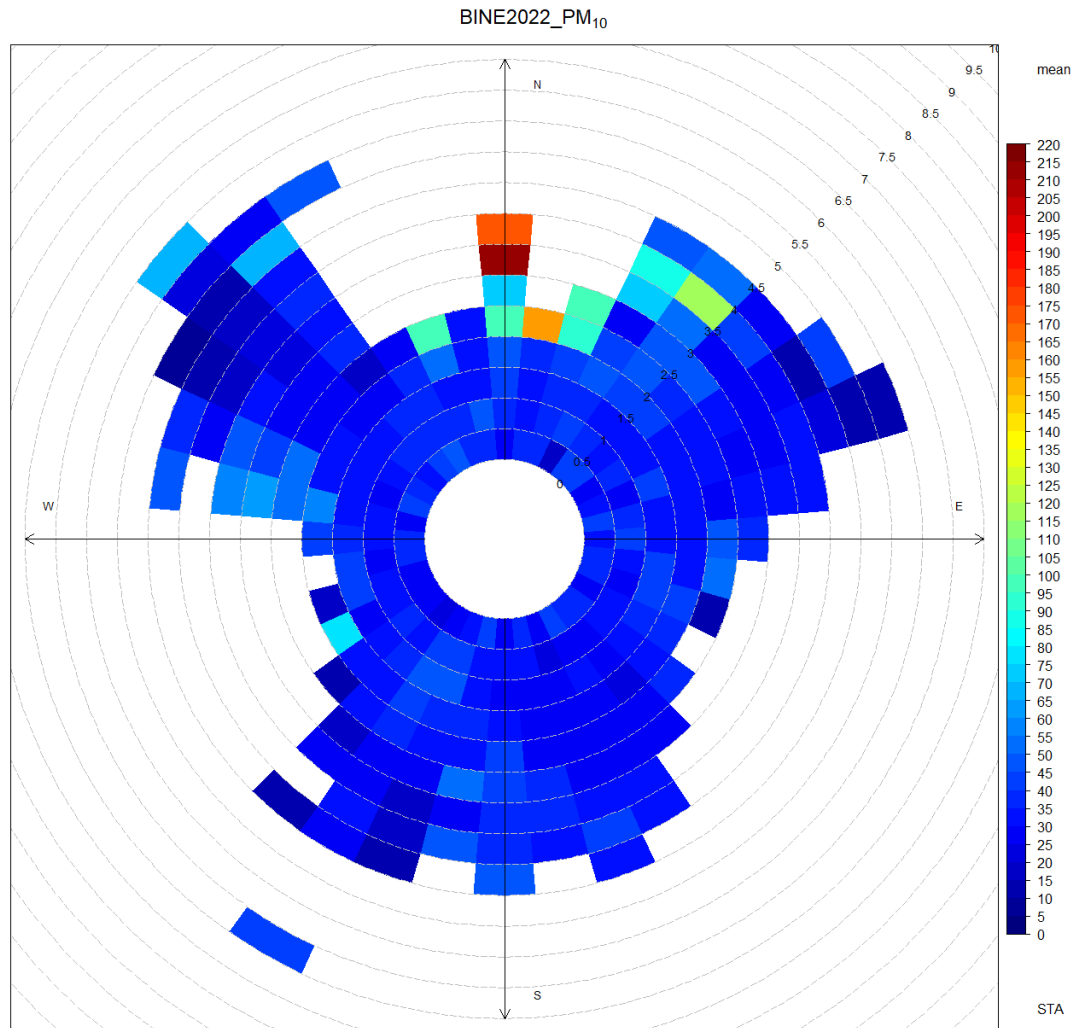
Gráfica 9. Dispersión del material particulado PM<sub>10</sub> en la estación Agua Santa en el año 2022



En este gráfico puede apreciarse que gracias a que la dirección norte presenta velocidades del viento bajas (de 3 a 4.5 m/s), y de este a oeste en sentido contrario de las manecillas del reloj se observa que esta dirección es la dominante con una concentración máxima en el norte de  $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , además, la región que va del noreste al noroeste (en sentido horario) incluye concentraciones menores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gráfica 10).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 71.28%

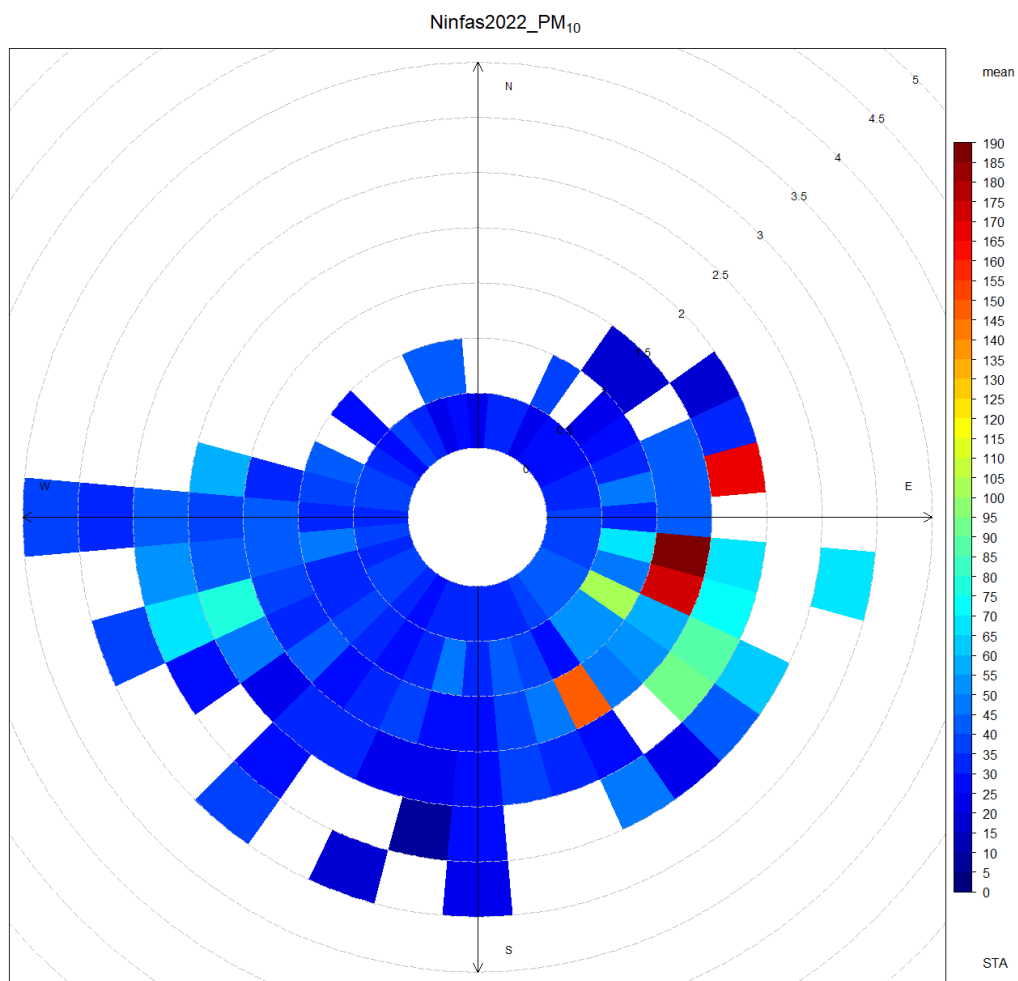
Gráfica 10. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación BINE en el año 2022



En el gráfico se presenta una ausencia considerable de datos, sin embargo, se puede apreciar la tendencia en la región oeste de velocidades altas y concentraciones bajas, mientras, en contraste, en la región este se tienen concentraciones que van desde  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en velocidades de los 1 m/s hasta los 2 m/s; la dirección predominante es de este a oeste en sentido de las manecillas del reloj (Gráfica 11).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 32.86%

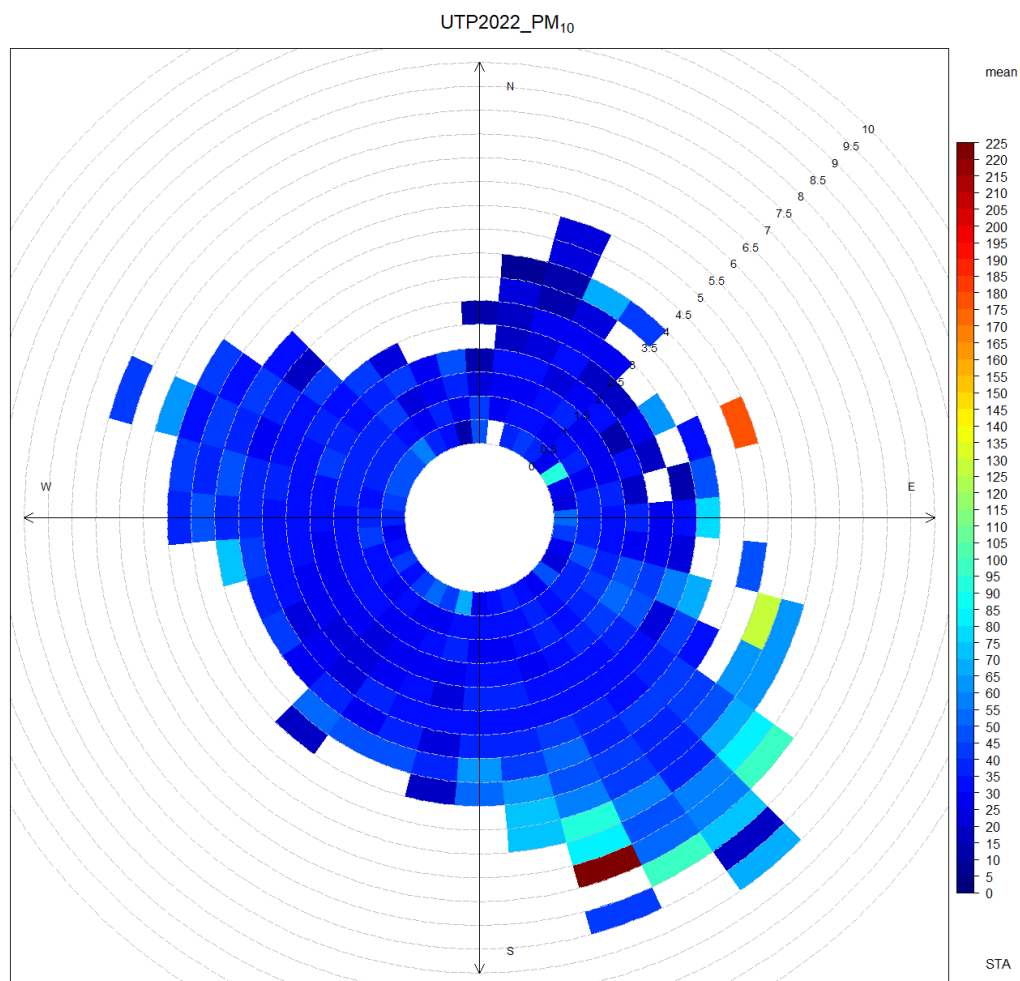
Gráfica 11. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación Ninfas en el año 2022



Este gráfico nos presenta un comportamiento particular ya que las altas velocidades suelen resultar en concentraciones bajas, sin embargo, al analizar la dirección predominante sureste encontramos que la concentración máxima es de  $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a velocidades de 6 m/s a 6.5 m/s, en contraste con la región no predominante que alcanza en promedio los 5 m/s como máximo, con concentraciones que en promedio no superan los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gráfica 12).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 85.34%

Gráfica 12. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación UTP en el año 2022

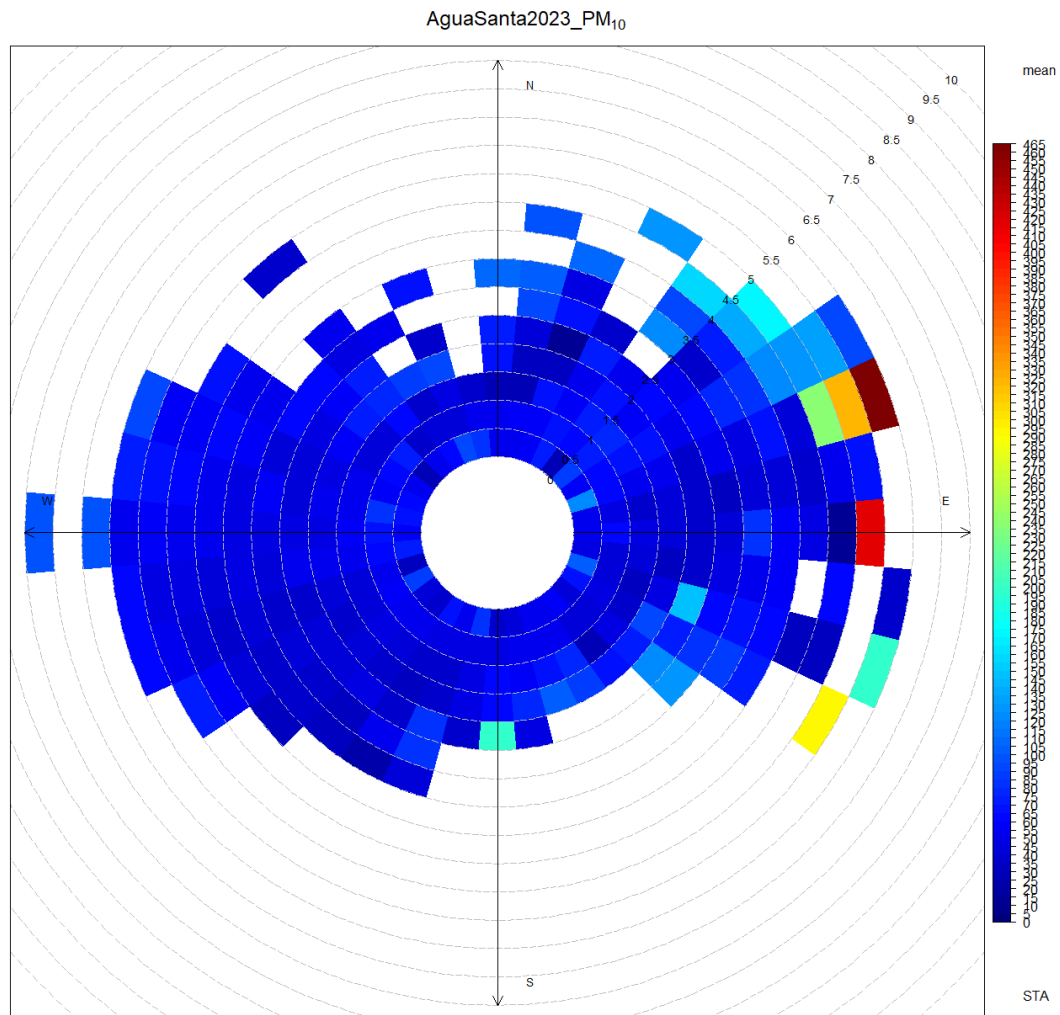


## Resultados de la dispersión del material particulado PM<sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo atmosférico en el año 2023, representado en gráficas.

En este gráfico se aprecia claramente a la dirección oeste como la dirección del viento predominante, y del lado noreste se alcanzó la concentración máxima de 465  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con velocidades de 5 m/s a 6 m/s, y se destaca el resto del cuadrante porque presenta concentraciones relativamente bajas (Gráfica 13).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 68.63%

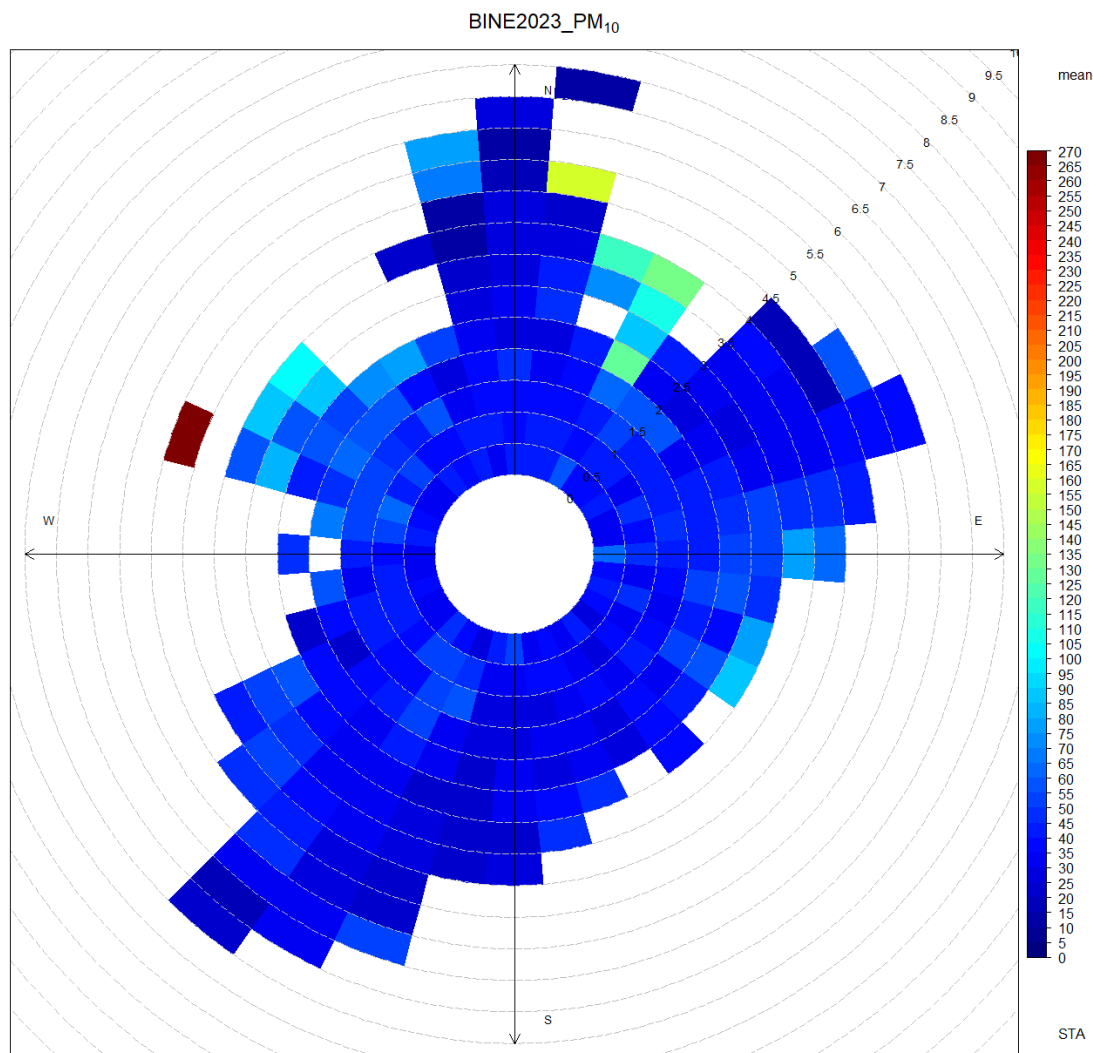
Gráfica 13. Dispersión del material particulado PM<sub>10</sub> en la estación Agua Santa en el año 2023



En este gráfico es notable el alcance de grandes velocidades en la región suroeste, norte, y noreste de hasta 6.5 m/s, sin embargo, esto ocasiona dispersión y por tanto concentraciones relativamente bajas. Es en la zona noroeste donde se presenta una alta concentración de  $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a una velocidad dominante de 4.5 a 5 m/s; la dirección predominante es del lado noreste al suroeste (en sentido contrario a las manecillas del reloj) (Gráfica 14).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 92.51%

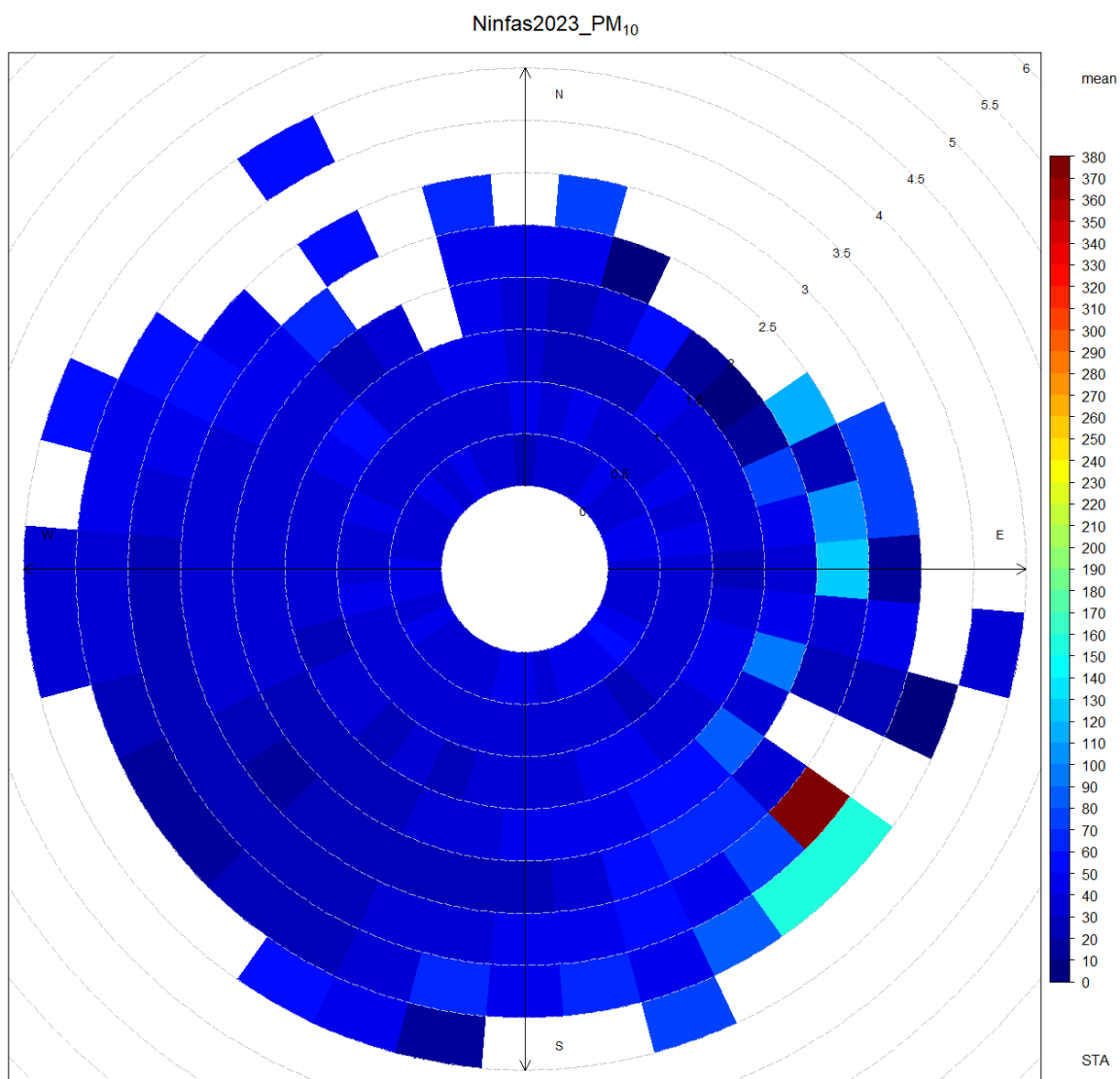
Gráfica 14. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación BINE en el año 2023



En este gráfico se observa que en la dirección noroeste, oeste y suroeste se presentan velocidades de hasta 4 m/s con concentraciones muy bajas. Es en la región suroeste y sureste donde se aprecia la velocidad dominante y dirección predominante, y con un valor de  $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a una velocidad que oscila entre los 2.5 m/s y los 3 m/s se encuentra la mayor concentración (Gráfica 15).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 72.12%

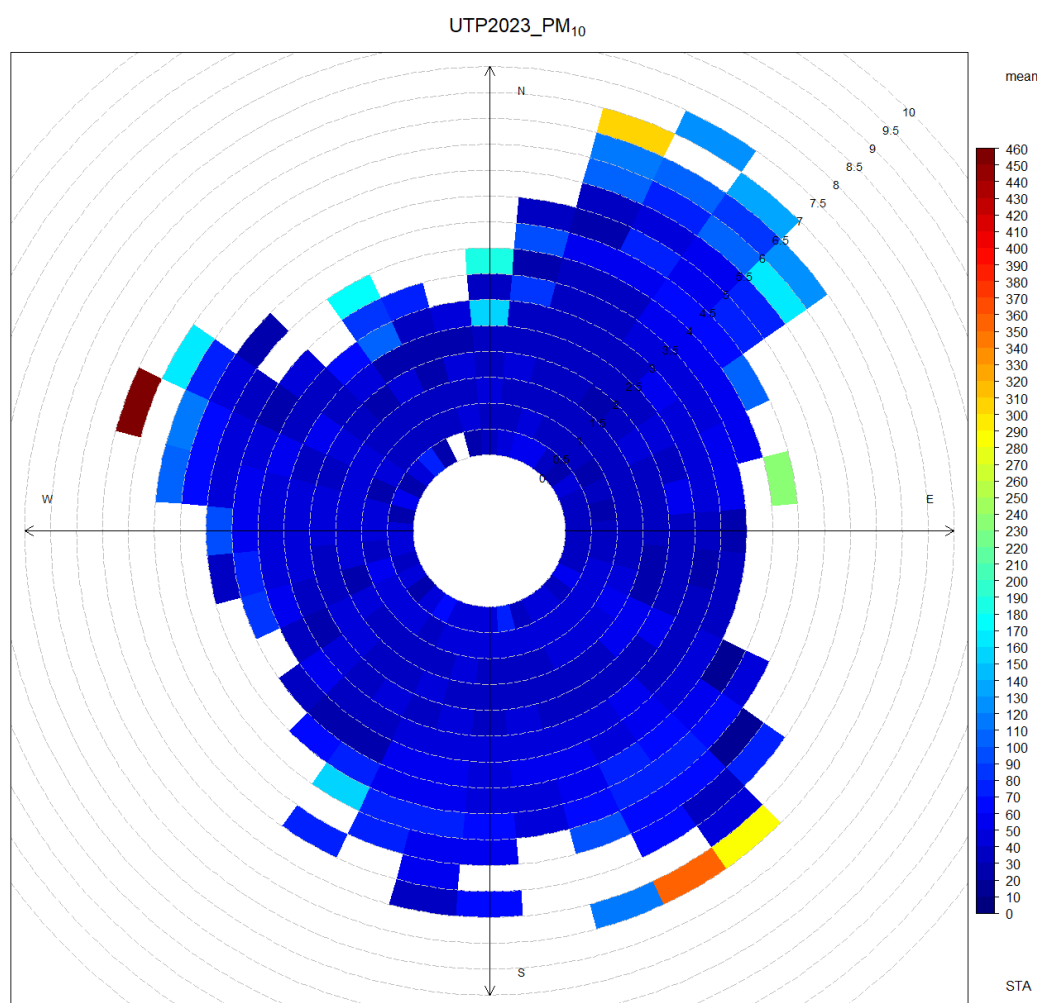
Gráfica 15. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación Ninfas en el año 2023



Este gráfico nos muestra variaciones importantes en la dirección predominante a lo largo del año, el perfil de velocidad se observa relativamente constante en las direcciones noreste, oeste y sureste, con el máximo puntual de concentración encontrado al oeste con  $460 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a velocidades de 5.5 m/s a 6 m/s. Sin embargo, en la región sureste se alcanzan concentraciones de  $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $330 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a velocidades más altas, las cuales podrían ser direcciones predominantes en otras épocas del año (Gráfica 16).

Porcentaje de datos totales con el que se está trabajando en las gráficas: 85.37%

Gráfica 16. Dispersión del material particulado  $\text{PM}_{10}$  en la estación UTP en el año 2023





3.2. Resultados de la elaboración de los mapas que integran las gráficas generadas en QGIS.

Con base en los análisis previos sobre la distribución espacial del material particulado en la zona urbana de Puebla, se procedió a la elaboración de mapas detallados que reflejan la dispersión y el promedio de las concentraciones del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . A través de herramientas estadísticas y gráficas generadas en RStudio se identificaron zonas críticas donde los niveles de material particulado superan los umbrales recomendados por la OMS. Estos mapas permiten la visualización de la distribución del material particulado en el área de estudio.

En los mapas se pueden observar los puntos dónde se localizan las estaciones de monitoreo atmosférico, al mismo tiempo estas se encuentran enumeradas:

1. Agua Santa.
2. BINE.
3. Ninfas.
4. UTP.

En el mismo mapa se puede observar el radio de alcance que es de 3 km debido a que es la cobertura de monitoreo de cada estación, según la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA); se decidió realizar un radio representativo de 1.5 km en las gráficas que anteriormente se analizaron, en el mapa elaborado en QGIS.

A continuación, se muestra el análisis de los mapas que exponen la dispersión del material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en las distintas áreas de estudio. Estos mapas permiten identificar las zonas con mayores concentraciones de contaminantes, proporcionando una visión clara de cómo factores como la topografía y las

condiciones meteorológicas influyen en la distribución espacial de estos contaminantes.

Se interpreta que en el Norte está la mayor concentración del  $PM_{2.5}$  que es de  $75 \mu g/m^3$ , y fue captada por la estación 2 (BINE), de igual manera se presenta la mayor cantidad de concentración de  $PM_{2.5}$  que va de  $45 \mu g/m^3$  a  $65 \mu g/m^3$  en esa misma estación, misma dirección (norte); la estación 1 (Agua Santa) presenta concentraciones desde  $45 \mu g/m^3$  a  $55 \mu g/m^3$  en dirección la dirección noreste, lo que tienen en común es que esas concentraciones están en dirección a vías principales, del lado norte, se encuentra la autopista México-Puebla, y del lado noroeste de la estación 1, está el Periférico Ecológico (Figura 1).

La estación 4 (UTP), llega a presentar valores menores de  $50 \mu g/m^3$ ; y en la estación 3 (Ninfas) valores menores de  $25 \mu g/m^3$ , la velocidad y dirección del viento predominante puede variar a lo largo del año y a las condiciones geográficas de la zona (Figura 1).

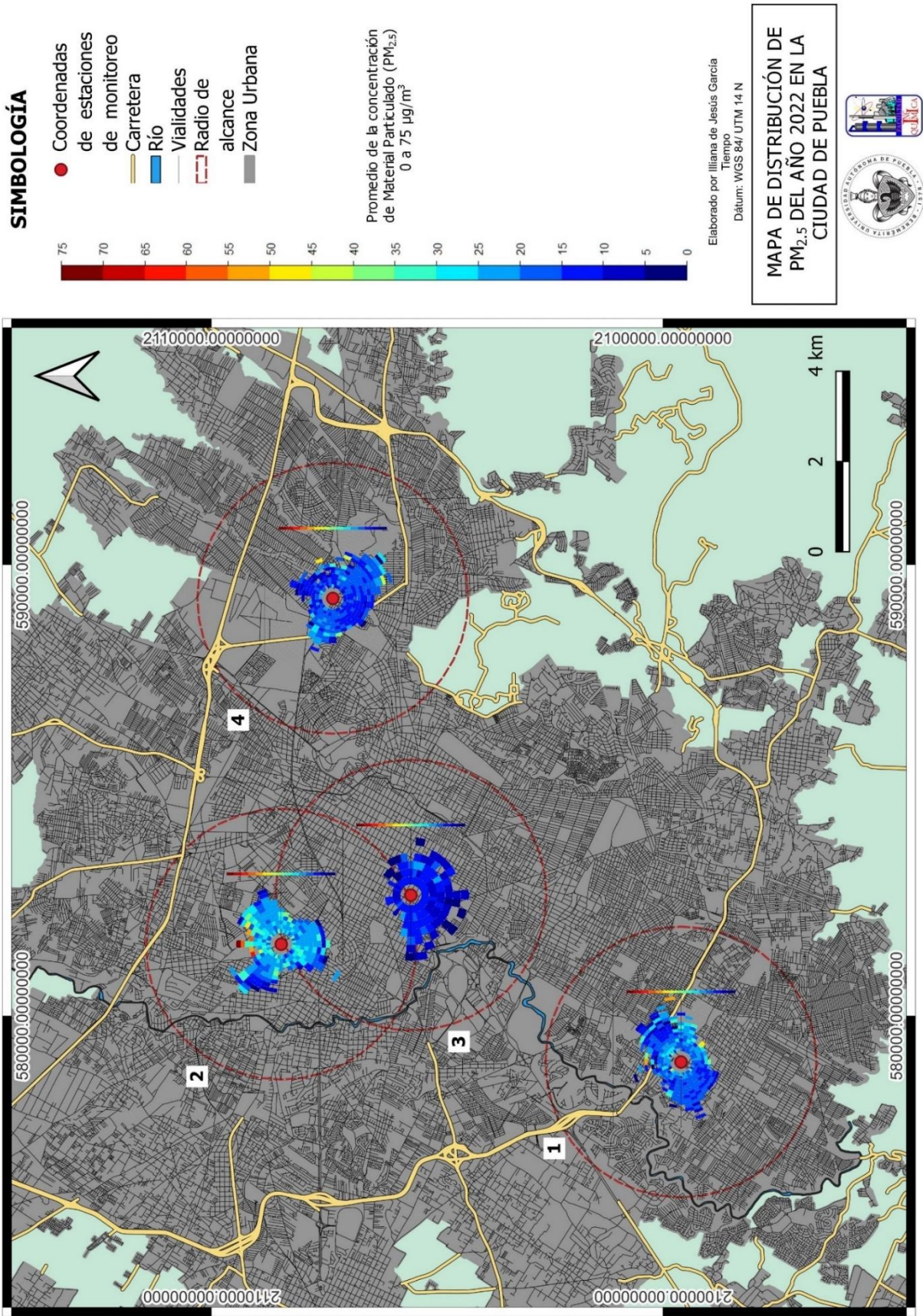


Figura 1. Mapa de distribución del material particulado  $PM_{2.5}$  en la Ciudad de Puebla en el año 2022

Se observa que las mayores concentraciones se presentan en la estación 2 (BINE) estas van de  $50 \mu g/m^3$  a  $75 \mu g/m^3$ , con dirección noroeste y noreste, la estación 4 (UTP) tiene varios picos amarillos de concentraciones que van de  $45 \mu g/m^3$  a  $50 \mu g/m^3$ , con dirección al norte y noroeste; en dónde se presenta un aumento e contaminación en comparación al año anterior es la estación 1 (Agua Santa), las mayores concentraciones se presentan del lado este y son de  $55 \mu g/m^3$  a  $65 \mu g/m^3$ ; la estación 2 (Ninfas), presenta un ligero aumento en sus concentraciones pero en su mayoría permanecen bajas. la velocidad y dirección del viento predominante puede variar a lo largo del año y a las condiciones geográficas de la zona (Figura 2).



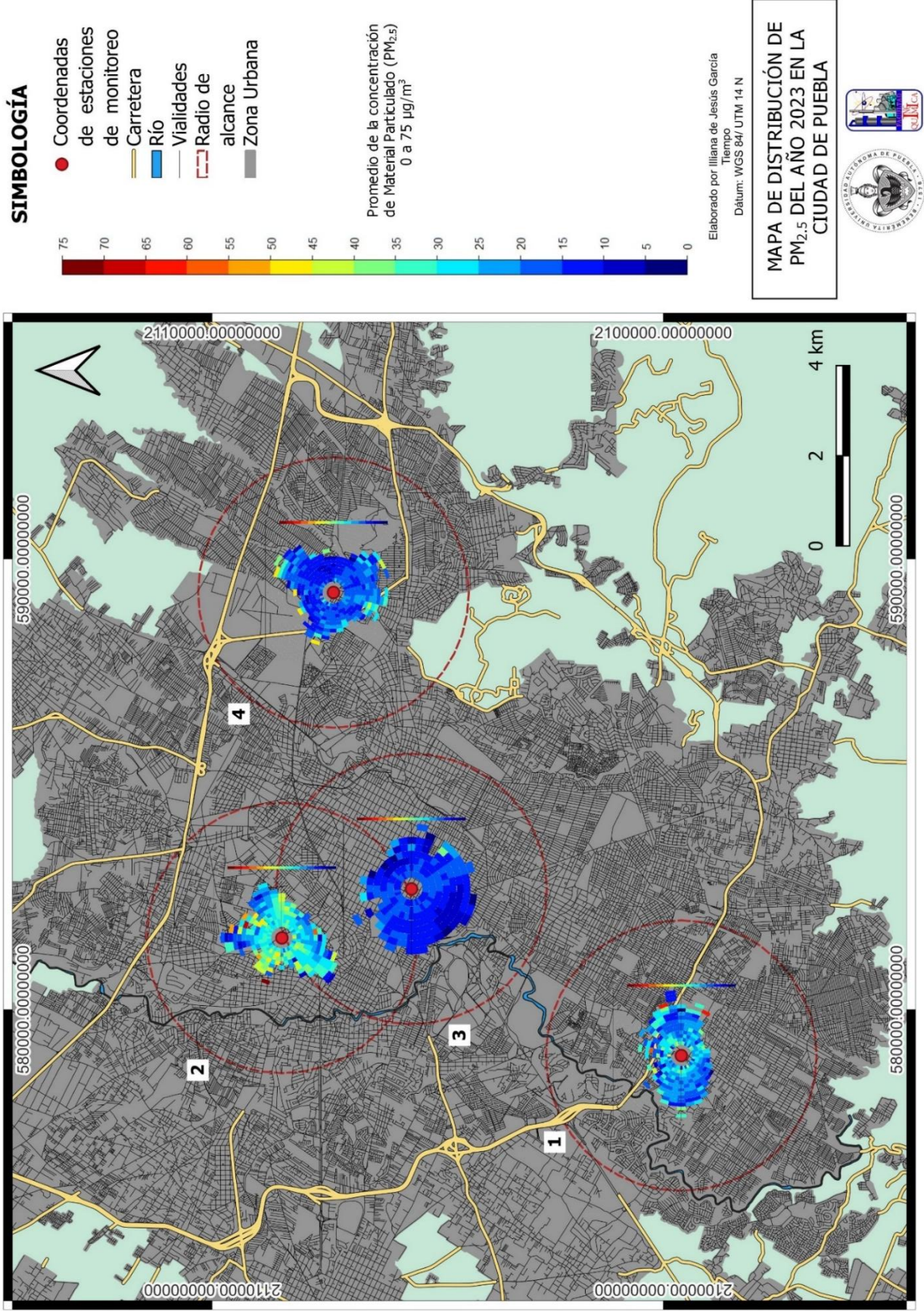


Figura 2. Mapa de distribución del material particulado  $PM_{2.5}$  en la Ciudad de Puebla en el año 2023

Se analiza que en la estación 1 (Agua Santa) se presenta una concentración relativamente elevada en comparación con otras zonas. En los alrededores de esta estación, más en la dirección noreste y sureste, los tonos de amarillo y naranja que indican concentraciones de  $PM_{10}$  superiores a  $105 \mu g/m^3$  a  $240 \mu g/m^3$  con una dirección al sureste; en la estación 3 (Ninfas), se observa una concentración considerable alrededor de esta estación, con tonos similares a los de la estación 1, pero con una extensión espacial menor, estas concentraciones van de  $150 \mu g/m^3$  a  $190 \mu g/m^3$ . Sin embargo, se nota una dispersión considerable de los contaminantes (Figura 3).

En la estación 4 (UTP) se presentan puntos que alcanzan valores moderadamente altos, concentraciones de  $180 \mu g/m^3$  a  $225 \mu g/m^3$ , en una dirección al sureste; para la estación 2 (BINE) la concentración máxima va de  $175 \mu g/m^3$  y  $220 \mu g/m^3$ , en dirección al norte (Figura 3).



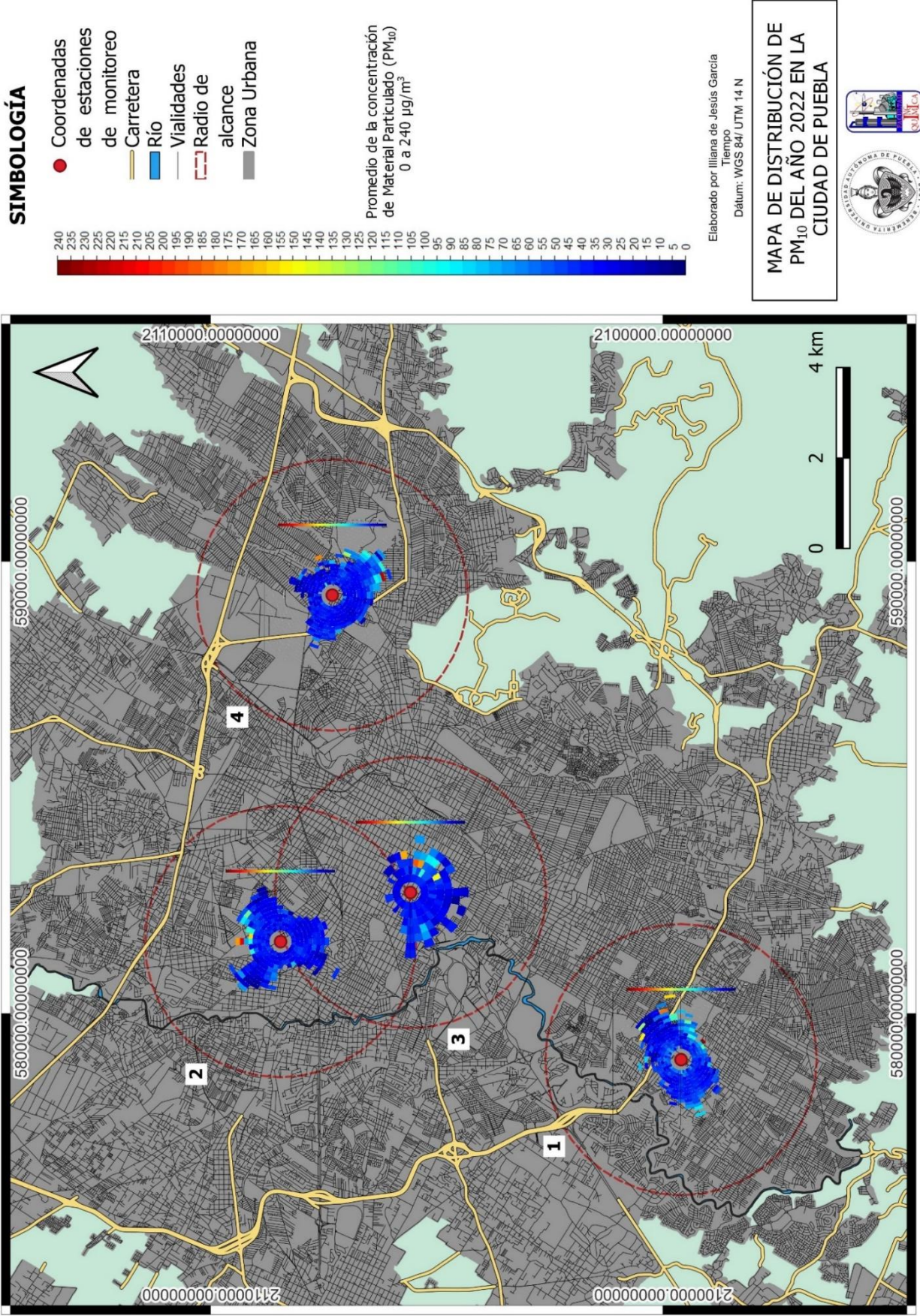


Figura 3. Mapa de distribución del material particulado  $PM_{10}$  en la Ciudad de Puebla en el año 2022

Se descifra que las zonas con mayor concentración se encuentran en las áreas cercanas a las estaciones de monitoreo 1 (Agua Santa), 4 (UTP) y 3 (Ninfas). La Estación 1 (Agua Santa) muestra las concentraciones más altas, con valores de  $420 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $465 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica un incremento respecto al año anterior. La Estación 4 (UTP) también refleja un aumento significativo, con niveles que llegan a los  $460 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que sugiere un deterioro importante en la calidad del aire en esta zona. La Estación 3 (Ninfas) presenta un aumento en las concentraciones, con valores entre  $295 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aunque sigue mostrando niveles más bajos que las estaciones 1 y 4 (Figura 4).

Las zonas con menores concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en 2023 se encuentran alrededor de la Estación 2 (BINE), donde los valores son relativamente bajos en comparación con otras áreas, con concentraciones entre  $265 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aunque esta estación sigue mostrando niveles más bajos que las demás, también ha experimentado un ligero aumento en las concentraciones respecto al año anterior, lo que indica un deterioro leve en la calidad del aire en esta zona (Figura 4).



- SIMBOLOGÍA**
- Coordenadas de estaciones de monitoreo
  - Carretera
  - Río
  - Vialidades
  - Radio de alcance
  - Zona Urbana

Promedio de la concentración de Material Particulado (PM<sub>10</sub>)  
0 a 465 µg/m<sup>3</sup>

Elaborado por Iliana de Jesús García  
Tiempo  
Datum: WGS 84/ UTM 14 N

**MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PM<sub>10</sub> DEL AÑO 2023 EN LA CIUDAD DE PUEBLA**

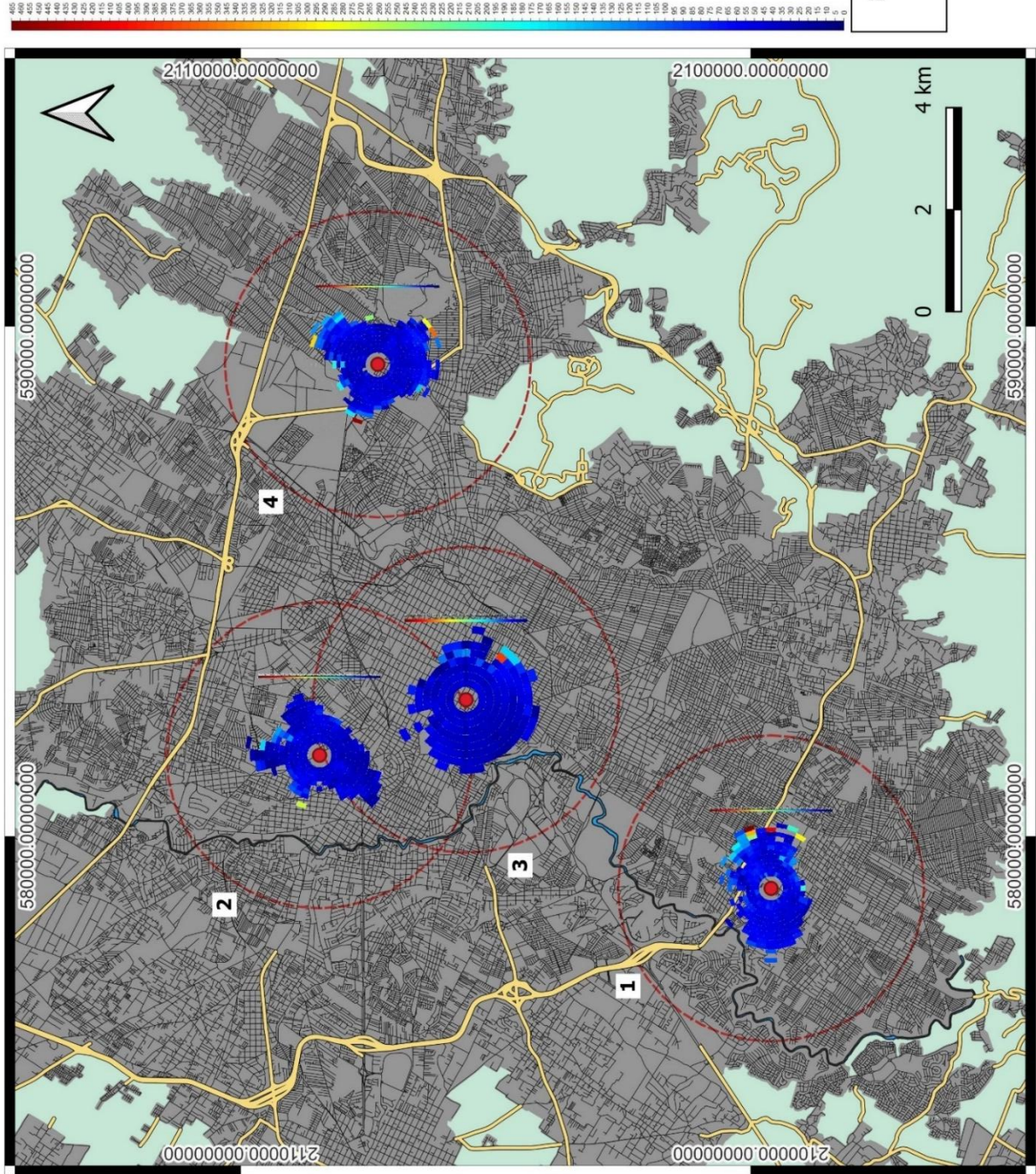
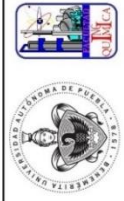


Figura 4. Mapa de distribución del material particulado PM<sub>10</sub> en la Ciudad de Puebla en el año 2023

Una vez expuestas las gráficas y elaborados los mapas, se desarrollaron las siguientes tablas con los datos sintetizados de estos mismos para una mejor comprensión.

### **Resultados de la recopilación de datos representados en las gráficas de los mapas del material particulado PM<sub>2.5</sub> del año 2022.**

Los resultados de las gráficas del material particulado PM<sub>2.5</sub> del año 2022, presentados en la Figura 1, muestran una representatividad de datos regular para la estación 1 (Agua Santa) y la estación 4 (UTP), y mala para las estaciones 2 (BINE) y 3 (Ninfas). Esto se debe al porcentaje de datos totales resultante de la convergencia de tres datos simultáneamente. Es decir, se tomaron en cuenta únicamente los casos en los que los tres parámetros (material particulado (PM<sub>2.5</sub>), velocidad del viento y dirección del viento) coincidieron en un mismo punto, y ese valor fue utilizado para el cálculo del porcentaje de datos totales en converger (Ver tabla 4).

En la Figura 1 se muestra que la concentración máxima detectada de material particulado PM<sub>2.5</sub> fue en la estación 2 (BINE), en dirección al Norte y en esa misma dirección desde la estación 1 (Agua Santa) se presenta la segunda máxima concentración, por último punto se agregó la aplicación de la NOM-025-SSA1-2021, la cual tiene por objeto establecer los valores límites permisibles de concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente como medida para la protección a la salud humana, así como los criterios para su evaluación (Secretaría de Salud, 2021).

La última columna de la tabla 4, se añade con el fin de saber si puede aplicar o no la NOM-025-SSA1-2021 ya que esta solamente evalúa los datos de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), por lo que para saber si es aplicable, se requirió obtener los promedios de los cuatros trimestres del año y se necesitó que al menos tres trimestres contaran con el 75% de muestras válidas para asegurar la representatividad anual. En caso contrario, no se puede evaluar el cumplimiento del

indicador correspondiente (Secretaría de Salud, 2021); para el caso de estudio del material particulado PM<sub>2.5</sub> del año 2022, la norma solamente puede aplicar para la estación 1 (Agua Santa), estación 3 (Ninfas) y estación 4 (UTP), y no aplicar para la estación 2 (BINE) por insuficiencia de datos.

Tabla 4. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022

Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM <sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022							
Estaciones de monitoreo	Datos de PM <sub>2.5</sub>	Datos de velocidad del viento	Datos de dirección de viento	Datos totales en converger	Desempeño de la estación	Concentración máxima detectada	Aplicación de la NOM-025-SSA1-2021
1. Agua Santa	80.35	87.42	87.19	69.40	Regular	55	Aplica
2. BINE	55.60	75.30	75.28	46.22	Malo	75	No aplica
3. Ninfas	88.36	35.19	35.07	31.83	Malo	24	Aplica
4. UTP	85.38	86.91	86.84	73.93	Regular	50	Aplica

**Resultados de la recopilación de datos representados en las gráficas de los mapas del material particulado PM<sub>2.5</sub> del año 2023.**

La Tabla 5 corresponde a las gráficas del material particulado PM<sub>2.5</sub> del año 2023 que están incluidas en la Figura 2; la representatividad de los datos es buena para la estación 4 (UTP) y regular para la estación 1 (Agua Santa), estación 2 (BINE) y estación 3 (Ninfas), la mayor cantidad de material particulado se presentó nuevamente en la estación 2 (BINE), y consecutivamente en la estación 1 (Agua Santa) (Tabla 5), estos resultados coinciden con los del año pasado (Tabla 4) a

excepción de la dirección en dónde se encuentra esa mayor cantidad de material particulado PM<sub>2.5</sub>, con esto se observa un que ambas estaciones tienden a detectar y medir grandes cantidades de este material particulado PM<sub>2.5</sub>.

La NOM-025-SSA1-2021 solo aplica para la estación 3 (Ninfas) y estación 4 (UTP) ya que cumplen con la cantidad de muestras válidas para una representatividad anual, en cambio para la estación 1 (Agua Santa) y estación 2 (BINE), no puede aplicar la norma antes mencionada (Ver tabla 5).

Tabla 5. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023

Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023

Estaciones de monitoreo	Datos de PM <sub>2.5</sub>	Datos de velocidad del viento	Datos de dirección de viento	Datos totales en converger	Desempeño de la estación	Concentración máxima detectada	Aplicación de la NOM-025-SSA1-2021
1. Agua Santa	70.59	84.96	84.95	63.57	Regular	65	No aplica
2. BINE	66.62	96.66	96.43	65.86	Regular	75	No aplica
3. Ninfas	94.79	79.00	78.99	74.92	Regular	38	Aplica
4. UTP	89.72	90.99	90.99	81.83	Buena	50	Aplica

### Resultados de la recopilación de datos representados en las gráficas de los mapas del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2022.

Las gráficas obtenidas y visualizadas en la Figura 3, ofrecen un panorama detallado de la distribución del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2022. Para facilitar su



interpretación, los datos más relevantes se han consolidado en la Tabla 6, donde se destaca la representatividad de los datos, que van desde buena para la estación 1 (Agua Santa) y estación 4 (UTP), regular para la estación 2 (BINE) y mala para la estación 3 (Ninfas). A partir de esta síntesis, se puede observar que la estación con una concentración más alta del material particulado PM<sub>10</sub> es la estación 1 (Agua Santa), seguida de la estación 4 (UTP) (Tabla 6), ambas con dirección al sureste (Figura 3).

En este caso en particular la NOM-025-SSA1-2021, aplica para todas las estaciones ya que los datos de material particulado PM<sub>10</sub> cumplen con el mínimo de muestras válidas para una representatividad anual (Tabla 6).

Tabla 6. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>10</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022

Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>10</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2022

Estaciones de monitoreo	Datos de PM <sub>10</sub>	Datos de velocidad del viento	Datos de dirección de viento	Datos totales en converger	Desempeño de la estación	Concentración máxima detectada	Aplicación de la NOM-025-SSA1-2021
						µg/m <sup>3</sup>	
		%					
1. Agua Santa	94.93	90.75	88.91	85.74	Buena	240	Aplica
2. BINE	88.99	75.30	75.28	71.28	Regular	220	Aplica
3. Ninfas	90.93	35.19	35.07	32.86	Mala	190	Aplica
4. UTP	98.31	86.91	86.84	85.34	Buena	225	Aplica

## **Resultados de la recopilación de datos representados en las gráficas de los mapas del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2023.**

Las gráficas distribuidas en la Figura 4, muestran la variación de distribución y niveles del material particulado PM<sub>10</sub> en el año 2023 en las distintas áreas de la Ciudad de Puebla. Para una mejor comprensión, los valores obtenidos en las gráficas han sido resumidos en la Tabla 7, lo que permite una visión más clara de los puntos críticos. Se detecta que la representatividad de los datos es buena para la estación 2 (BINE) y estación 4 (UTP), y regular para la estación 1 (Agua Santa) y estación 3 (Ninfas), a partir de eso la concentración máxima del material particulado PM<sub>10</sub> la presenta la estación 1 (Agua Santa) y el segundo sitio con la mayor concentración de PM<sub>10</sub> es la estación 4 (UTP) (Tabla 7), de manera similar a el año pasado (Tabla 6), esas dos estaciones fueron las que detectaron mayor cantidad de material particulado PM<sub>10</sub>, la diferencia es que se detectó una mayor concentración de PM<sub>10</sub> en el año 2023, por lo que si hubo un deterioro significativo de la calidad del aire en las zonas de dónde se encuentran las estaciones 1 (Agua Santa), 3 (Ninfas) y 4 (UTP) (Ver tabla 6 y 7).

Con el tema de la NOM-025-SSA1-2021, en esta situación aplica solo para la estación 2 (BINE), 3 (Ninfas) y 4 (UTP); no aplica para la estación 1 (Agua Santa), esto se debe a la falta de muestras válidas en los datos de material particulado PM<sub>10</sub>, para esa estación (Tabla 7).

Tabla 7. Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>10</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023

Datos sintetizados de los resultados presentados sobre el material particulado PM<sub>10</sub> de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ciudad de Puebla para el año 2023

Estaciones de monitoreo	Datos de PM <sub>10</sub>	Datos de velocidad de viento	Datos de dirección de viento	Datos totales en converger	Desempeño de la estación	Concentración máxima detectada	Aplicación de la NOM-025-SSA1-2021
						µg/m <sup>3</sup>	
1. Agua Santa	75.42	84.96	84.95	68.63	Regular	465	No aplica
2. BINE	93.43	96.66	96.43	92.51	Buena	270	Aplica
3. Ninfas	91.32	79.00	78.99	72.12	Regular	380	Aplica
4. UTP	93.63	90.99	90.99	85.37	Buena	460	Aplica

3.3. Resultados sobre la identificación de los posibles efectos que tiene el material particulado y polvo urbano y su contenido, en la salud humana.

Las afectaciones a la salud derivadas de la exposición a material particulado (PM) y metales pesados son diversas y potencialmente graves; estudios han analizado el PM<sub>10</sub> destacando la toxicidad de los metales pesados, que frecuentemente afectan las vías respiratorias; al inhalarse, estos metales se vuelven bioaccesibles al reaccionar con fluidos corporales, lo que puede provocar trastornos reproductivos, genotoxicidad o problemas gastrointestinales, y en los niños el impacto en la salud es mayor debido a su menor tolerancia a las toxinas, lo que los hace especialmente vulnerables (Morales, et al., 2014; Shruti, et al., 2018).

La exposición al PM<sub>2.5</sub>, tanto a corto como a largo plazo, ha demostrado afectar negativamente la función pulmonar e incrementar el riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares, entre ellas la obstrucción pulmonar crónica, asma y cáncer, además, el Instituto Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado al PM<sub>2.5</sub> como un agente carcinógeno, ya que puede producir efectos adversos en la salud dependiendo de los compuestos que lo conformen (Mamani y Calsina, 2022).

La exposición prolongada a los metales pesados presentes en el polvo urbano puede tener efectos tóxicos en órganos vitales; entre los metales pesados más peligrosos destacan el cadmio, el plomo, el cromo y el níquel, reconocidos por sus propiedades cancerígenas, estos contaminantes pueden también afectar la reproducción y el desarrollo humano, provocar efectos negativos en el sistema cardiovascular, renal y respiratorio, así como causar toxicidad en la sangre, el corazón y el sistema inmunológico, elevando el riesgo de enfermedades graves a largo plazo en las personas expuestas (Mowla, Rahman, Islam y Aich, 2021; Suvetha, et al., 2022).

Para este estudio se consideraron resultados previos referentes a las concentraciones de metales pesados en muestras cercanas a las estaciones de



monitoreo ambiental, los metales considerados fueron: de el cromo (Cr), cobre (Cu), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), estaño (Sn), vanadio (V) y zinc (Zn) en las muestras de polvo urbano evaluadas superan los valores de fondo de suelos internacionales establecidos por Kabata-Pendias 2011, lo que nos indica que estos elementos han sido enriquecidos por actividades antropogénicas, por otro lado, el vanadio mostró en la mayoría de las muestras evaluadas un valor de fondo menor al establecido en suelos internacionales mencionados anteriormente. Los datos de las concentraciones obtenidas de metales pesados (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb ,Sb, Sn, V y Zn) mostraron la existencia de contaminación de acuerdo con el índice de carga contaminante (PLI) (Tabla 8). El enriquecimiento de metales pesados en el polvo urbano proviene de diferentes fuentes cómo la actividad industrial, flujo vehicular, desgaste de piezas automotrices, entre otras (Tabla 9).

Tabla 8. Concentraciones de metales pesados en el polvo urbano cercanos a las estaciones de monitoreo ambiental

Estaciones	Muestras	Elementos									PLI
		Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	V	Zn	
		mg/kg									
1. Agua santa	1	80.75	25.50	628.24	59.29	14.89	48.33	18.46	52.78	112.73	2.14
	2	139.52	82.59	853.01	113.30	30.72	14.36	32.38	96.31	355.50	3.77
2. BINE	1	128.45	40.07	831.43	77.84	32.36	38.38	22.67	113.49	228.38	4.80
	2	128.77	116.12	863.68	139.47	68.01	32.82	26.25	94.13	468.94	4.32
3. Ninfas	1	123.73	69.14	798.90	103.99	104.98	47.88	23.47	95.64	468.91	2.20
	2	189.69	108.08	945.64	109.94	40.14	10.23	31.83	181.97	322.07	3.41
4. UTP	3	85.28	36.38	688.58	57.60	29.03	28.43	19.24	22.18	167.92	4.92
	1	184.52	37.90	919.69	105.69	34.61	39.76	28.40	167.28	204.18	4.01
Valor de fondo	2	73.07	43.17	775.99	72.13	26.62	42.92	21.98	92.78	312.69	3.15
		59.5	38.9	488	29	27	0.67	2.5	129	70	

*Nota: El índice de carga contaminante (PLI) permite evaluar el grado de contaminación de un suelo mediante la acumulación de metales pesados en el polvo urbano, identificando la contribución específica de cada elemento a dicha contaminación.*

*Tabla 9. Fuentes de emisión y generación de los metales pesados en el entorno urbano (Elaborada a partir de datos de Sager, 2020).*

Fuentes de emisión y generación de metales pesados	
Elementos	Origen de los metales pesados en el entorno urbano
Cromo (Cr)	Los vehículos de motor, la incineración de residuos y las industrias metalúrgica y galvánica.
Cobre (Cu)	Residuos electrónicos, el desgaste eléctrico, los polvos de abrasión de las pastillas de freno, la corrosión de las tuberías de cobre y los fungicidas.
Manganeso (Mn)	Los suelos agrícolas fertilizados en los alrededores de las ciudades para la horticultura y la producción de cultivos y el acero utilizado en los rieles de tranvías y ferrocarriles.
Níquel (Ni)	Las aleaciones metálicas de los motores, baterías de Ni-Cd y la combustión del petróleo.
Plomo (Pb)	Las baterías, el vidrio, la gasolina con plomo, el desgaste de los frenos, la pérdida de contrapesos de plomo y los productos electrónicos
Antimonio (Sb)	Aceites automotrices, desgaste de pastillas de freno, baterías y fuegos artificiales.
Estaño (Sn)	La minería, la combustión de petróleo y carbón, y la producción y el uso de compuestos de estaño.
Vanadio (V)	El asfalto y la combustión del petróleo.
Zinc (Zn)	El agua de escorrentía de techos, canaletas y alféizares, el caucho de los neumáticos, baterías, equipos electrónicos, aditivos de aceite para la protección contra el desgaste y las pinturas.

En este contexto, los metales pesados, al ser contaminantes no degradables, altamente tóxicos y acumulativos, representan una de las mayores amenazas para la salud pública. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), si las tendencias actuales de contaminación del aire continúan, esta se convertirá en la principal causa de muerte prematura a nivel mundial (Castillo et al., 2024).

#### 3.4. Resultados de la recopilación de información sobre las medidas existentes de mitigación y control de la contaminación del aire en Puebla.

En el estado de Puebla, a través del Programa de Gestión de Calidad del Aire y de Acción ante el Cambio Climático Estado de Puebla 2021-2030, se plantea la implementación de diversas medidas para mitigar y controlar la contaminación del aire, con el objetivo de mejorar la calidad del ambiente y proteger la salud de sus habitantes (AMBIENS Consultoría, Sustentabilidad y Gestión Climática SA de CV, 2022). Una de las principales iniciativas es la adopción de un plan de electromovilidad para el sector de transporte, que busca reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones contaminantes provenientes de los vehículos. En paralelo, la toma de acciones para disminuir las emisiones en el transporte de carga pesada y en el transporte público, así como reducir las emisiones en los vehículos de transporte ligero.

Otro enfoque importante es el de incentivar y adoptar el trabajo remoto, con el fin de reducir el número de desplazamientos y, por ende, las emisiones vehiculares. Además, auspiciar el desarrollo de una ciudad accesible para peatones, promoviendo el uso de medios de transporte no motorizados.

En el sector industrial, se busca establecer medidas para minimizar las emisiones, con el objetivo de limitar el impacto ambiental de dichas actividades. Asimismo, la implementación de regulaciones y controles sobre la quema agrícola, al mismo tiempo que se promuevan prácticas agrícolas sostenibles para reducir la

contaminación del aire. Además, se recalca la importancia de reforzar el programa de manejo del fuego y prevención de incendios forestales para minimizar las emisiones derivadas de incendios incontrolados.

En términos de monitoreo y evaluación, se busca elaborar e implementar el Programa de Auditoría Ambiental y Certificación de Edificaciones Sustentables, con el propósito de asegurar que las construcciones cumplan con los estándares ambientales adecuados. También, el rediseño del sistema de monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP), donde lo que se busca es ampliar el alcance a otras áreas del estado para obtener una visión más completa de la situación atmosférica.

Finalmente, el mantener actualizado el inventario de emisiones de contaminantes, compuestos y gases de efecto invernadero, así como el desarrollo de un programa de contingencias ambientales atmosféricas para la ZMVP y los municipios que cuentan con sistemas de monitoreo atmosférico, asegurando una respuesta adecuada ante posibles afectaciones ambientales.

Estas medidas reflejan un esfuerzo integral para enfrentar los desafíos de la contaminación del aire en Puebla y mejorar la calidad del entorno urbano y rural.

## **CONCLUSIONES**

En base al análisis de la distribución espacial de la contaminación del aire por material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y polvo urbano en Puebla, se confirma que este último puede representar un riesgo significativo para la salud humana. Las partículas de polvo y el material particulado ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ), al transportar metales pesados, generan efectos adversos en la salud, afectando considerablemente la calidad de vida en las zonas de mayor concentración.

Cumpliendo con el primer objetivo, se obtuvieron las bases de datos sobre concentraciones de material particulado ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ) para los años 2022 y 2023

mediante la Plataforma Nacional de Transparencia (PNT), validadas utilizando RStudio.

Con respecto al segundo objetivo, el análisis mediante sistemas de información geográfica (SIG) permitió mapear la distribución espacial del material particulado y los metales pesados. Los resultados revelan una alta correlación entre las concentraciones y fuentes de emisión antropogénicas, como el tráfico vehicular y la actividad industrial, identificando zonas de mayor contaminación y factores que contribuyen a la dispersión de estos contaminantes.

En cuanto al tercer objetivo, la revisión bibliográfica permitió identificar los efectos potenciales de los metales pesados en la salud humana y sus principales fuentes de emisión. Los metales como Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn y Zn, exceptuando V, presentan concentraciones elevadas debido a actividades antropogénicas, lo que implica un riesgo para la población, especialmente para los niños. En particular, la estación Ninfas destacó por sus niveles elevados de contaminación, representando un riesgo para la población infantil cercana a las escuelas de la zona.

Finalmente, con relación al cuarto objetivo, se identificaron las medidas implementadas en Puebla a través del Programa de Gestión de Calidad del Aire y de Acción ante el Cambio Climático 2021-2030. Entre las principales iniciativas se incluyen la adopción de la electromovilidad, la reducción de emisiones vehiculares, y el fomento del transporte no motorizado, junto con medidas para reducir las emisiones en los sectores industrial y agrícola.

El fortalecimiento del monitoreo de la calidad del aire y la actualización continua del inventario de emisiones son clave para una gestión efectiva de la contaminación. Además, las partículas  $PM_{2.5}$ , representan un riesgo significativo para la salud humana debido a su toxicidad y capacidad de permanecer en suspensión por largos periodos. Estas partículas ingresan al organismo a través de las vías respiratoria, oral y dérmica, lo que aumenta la exposición de la población.

Es fundamental seguir explorando el área de la calidad del aire y el análisis atmosférico, así como mejorar el funcionamiento de las estaciones de monitoreo, con el fin de obtener más información sobre la calidad del aire en la ciudad de Puebla, enriquecer las estrategias de mitigación y lograr un mejor control sobre la contaminación atmosférica en el área metropolitana de Puebla. Esta investigación no solo permitirá un mejor entendimiento de la problemática actual, sino que también se espera que sirva como un antecedente importante para futuras investigaciones en el campo de la contaminación atmosférica por material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y del polvo urbano.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AMBIENS Consultoría, Sustentabilidad y Gestión Climática SA de CV. (2022). *Programa de gestión de calidad del aire y de acción ante el cambio climático estado de Puebla 2021-2030*. Recuperado el 5 de agosto de 2024 de <https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/documents/ProAire-PEACC-Puebla-2021-2030.pdf>
2. Ayrault, S., Catinon, M., Boudouma, O., Bordier, L., Agnello, G., Reynaud, S., y Tissut, M. (2013). Street dust: Source and sink of heavy metals to urban environment. *EDP Sciences*, 1(20001). doi: 10.1051/e3sconf/20130120001
3. Carslaw, D. (2019). *The openair manual — open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 2.6-6*. University of York, Heslington, Inglaterra.
4. Castillo, J. O., Mendoza, J. C., García, J., y Pérez, G. (2024). Enhancing air quality forecasting in the Metropolitan Zone of the Valley

of Puebla: A comparative analysis of CAMS and REMA data. *Research Square*. doi: 10.21203/rs.3.rs-3775064/v1

5. Cejudo, F. R., Goguitchaichvili, A., Bautista, F., Cervantes, M. A., Mendiola, F., Cortés, J. L.,...Pelcastre, J. P. (2022). El polvo urbano de las vialidades de la Ciudad de México: un análisis espacialmente lineal de los elementos potencialmente tóxicos, propiedades magnéticas y tamaño de partículas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38(1), 351-371. doi: 10.20937/RICA.54372
6. Charlesworth, S., Everett, M., McCarthy, R., Ordoñez, A., y de Miguel, E. (2003). A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK. *Environment International*, 29(5), 563-573. doi: 10.1016/S0160-4120(03)00015-1
7. Costa, D. L., y Dreher, K. L. (1997). Bioavailable transition metals in particulate matter mediate cardiopulmonary injury in healthy and compromised animal models. *Environmental health perspectives*, 105(5), 1053–1060. doi: 10.1289/ehp.97105s51053
8. Dirgo, J., y Leith, D. (1985). Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Science and Technology*, 4(4), 401–415. doi: 10.1080/02786828508959066
9. East, J., Montealegre, J. S., Pachon, J. E., y García, F. (2021). Air quality modeling to inform pollution mitigation strategies in a Latin American megacity. *The Science of the total environment*, 776(145894). doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145894
10. Ewen, C., Anagnostopoulou, M. A., y Ward, N. I. (2009). Monitoring of heavy metal levels in roadside dusts of Thessaloniki, Greece in relation to motor vehicle traffic density and flow. *Environmental monitoring and assessment*, 157(1-4), 483-498. doi: 10.1007/s10661-008-0550-9



11. González, S. N., Mendoza, O. O., Fuentes, V. y Baldasano, J. M. (Mayo de 2016). Assessment of meteorological models for air pollution transport: Analysis between Mexico and Puebla metropolitan areas. *3rd International BSC Doctoral Symposium 2016*. Simposio llevado a cabo en el Barcelona Supercomputing Center, Barcelona, España.
12. Harrison, R. M., Smith, D. J. T., Pio, C. A., y Castro, L.M. (1997). Comparative receptor modelling study of airborne particulate pollutants in Birmingham (United Kingdom), Coimbra (Portugal) and Lahore (Pakistan). *Atmospheric Environment*, 31(20), 3309-3321. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00152-0
13. Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). Manual 5. Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire. Recuperado el 10 de junio de 2024, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
14. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Recuperado el 28 de septiembre de 2024 de [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#resultados\\_generales](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#resultados_generales)
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Estadística de vehículos de motor registrados en circulación*. Recuperado el 28 de septiembre 2024 de <https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/#tabulados>
16. Juárez, A., Gay, C., y Flores, Y. (2005). Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera*, 18(1), 57-69.
17. Legarreta, A., Corral, A. Y., Delgado, M., Torres, J., y Flores, J. P. (2016). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Cultura Científica y Tecnológica*, 56(1), 234-245.

Recuperado el 29 de agosto de 2024 de <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/818>

18. Mamani, M. E., y Calsina, J. E. (2022). *Contaminación microbiológica y de metales totales en material particulado igual o menor a 2.5 micras en el área urbana de Juliaca* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca, Perú.
19. Morales, S. S., Rodríguez, P. F., Jonathan, M. P., Navarrete, M., Herrera, M. A., y Muñoz, N. P. (2014). Characterization of As and trace metals embedded in PM10 particles in Puebla City, México. *Environmental monitoring and assessment*, 186(1), 55-67. doi: 10.1007/s10661-013-3355-4
20. Mowla, M., Rahman, E., Islam, N., y Aich, N. (2021). Assessment of heavy metal contamination and health risk from indoor dust and air of informal E-waste recycling shops in Dhaka, Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 4(100025). doi: 10.1016/j.hazadv.2021.100025
21. Naimabadi, A., Ghasemi, A., Mohtashami, M., Saeidi, J., Bakaeian, M., Mashadrizeh, A. H.,... Mohammadi, A. A. (2022). Heavy metal analysis in of indoor and outdoor dust extracts and cytotoxicity evaluation and inflammation factors on lung, gastric and skin cell lines. *Heliyon*, 8(12). doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12414
22. Narváez, O., y Cano, F. (2004). Cenizas volcánicas: Contaminación ambiental. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 17(3), 232-238.
23. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado el 23 de mayo de 2024 de

[https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)

24. Osorio, M. A., Torrijos, T., Sánchez, A., y Arroyo, O. (2011). Preliminary analysis for an air quality management DSS in the Metropolitan Valley of Puebla, Mexico. *WSEAS Press*, 210-216.
25. Pérez, L. F., y Hernández, L. (2006). *Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá*. (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.
26. Sager, M. (2020). Urban Soils and Road Dust—Civilization Effects and Metal Pollution—A Review. *Environments*, 7(11), 98. doi: 10.3390/environments7110098
27. Salazar, T. (2023). *Generación de un modelo de monitoreo de la contaminación atmosférica por metales pesados en zonas de flujo vehicular, basado en las propiedades magnéticas de biomonitores y polvo urbano* (Tesis doctoral). Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
28. Salazar, T., Cejudo, F. R., y Calvo, G. (2023). Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring. *Chemosphere*, 310(136795). doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136795
29. Santamaría, J. D., Castañeda, M. D., EasLinares, V., Ramírez M. E., Juárez, M., Velasco, A., Águila, E.,... Báez, R. (2022). Caracterización fisicoquímica de material particulado del Popocatepetl, trayecto Atlixco-Puebla, y su impacto en la salud y el ambiente. *Acta Universitaria*, 32, 1–22. doi: 10.15174/au.2022.3489

30. Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT). (2024). *Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA)*. Recuperado el 27 de agosto de 2024 de [https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/principal\\_monitoreo.php#section\\_monitoreo](https://calidaddelaire.puebla.gob.mx/views/principal_monitoreo.php#section_monitoreo)
31. Secretaría de Salud. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. 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. (2021). Recuperado el 25 de agosto de 2024 de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
32. Shruti, V. C., Rodríguez, P. F., Martínez, E., y Hernández, D. (2018). Metal concentrations in recent ash fall of Popocatepetl volcano 2016, Central Mexico: Is human health at risk?. *Ecotoxicology and environmental safety*, 162, 324-333. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.06.067
33. Suvetha, M., Charles, P. E., Vinothkannan, A., Rajaram, R., Paray, B. A., y Ali, S. (2022). Are we at risk because of road dust? An ecological and health risk assessment of heavy metals in a rapid growing city in South India. *Environmental Advances*, 7(100165), doi: 10.1016/j.envadv.2022.100165
34. Trejos, E. M., Silva, L. F., Hower, J. C., Flores, E. M., González, C. M., Pachón, J. E., y Aristizábal, B. H. (2021). Volcanic emissions and atmospheric pollution: A study of nanoparticles. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 746–755. doi: 10.1016/j.gsf.2020.08.013

35. United States Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Light-duty vehicles and light-duty trucks: Clean fuel fleet exhaust emission standards. Recuperado el 10 de abril de 2024 de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P100O9ZJ.pdf>
36. Ward, N. I., y Dudding, L. M. (2004). Platinum emissions and levels in motorway dust samples: Influence of traffic characteristics. *Science of the Total Environment*, 334-335, 457-463. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.049
37. Zereini, F., Alt, F., Messerschmidt, J., Wiseman, C., Feldmann, I., Bohlen, A.v., Müller, J.,... Püttmann, W. (2005). Concentration and distribution of heavy metals in urban airborne particulate matter in Frankfurt am Main, Germany. *Environmental & technology*, 39(9), 2983-2989. doi: 10.1021/es040040t

Sitios web visitados:

Visitado el 16 de abril de 2024. <https://www.iqair.com/mx/mexico/puebla>

Visitado el 16 de abril de 2024.  
<https://calidaddel aire.puebla.gob.mx/views/reporteICA.php>

Visitado el 12 de septiembre de 2024.  
<https://www.oecdbetterlifeindex.org/es/topics/environment-es/>