

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA



## FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

### Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental

### “EVALUACIÓN TEMPORAL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) Y SU RELACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES MEDIANTE HYSPLIT Y CBPF EN CHIMBOTE, SANTA, ÁNCASH (2024–2025)”

### Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental

#### Autor:

Bach. Flor Nelida Perez Fernandez

Dr. Guillermo A. Chávez Santa Cruz  
Docente UNACH – CIP 28030

#### Asesor:

Dr. Guillermo Alejandro Chavez Santacruz

#### Coasesor:

Mg. Leonel Alonso Paccosonco Sucapuca

Chota – Perú

2026



Leonel Alonso Paccosonco Sucapuca  
Ingeniero Ambiental  
Reg CIP N°241546



# Universidad Nacional Autónoma de Chota

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental

RESOLUCIÓN DE COORDINACIÓN N° 770-2025-FCA/UNACH



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El que suscribe, docente asesor de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, **hace constar** que la tesis de investigación titulada **“Evaluación temporal de contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ) y su relación con variables meteorológicas e identificación de fuentes mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024–2025)”**; ejecutada por la **Bachiller Flor Nelida Perez Fernandez** de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, **asesorado por el Dr. Guillermo Alejandro Chavez Santacruz y el Mg. Leonel Alonso Paccosonco Sucapuca (coasesor)**, presenta un **ÍNDICE DE SIMILITUD DEL 2%**, sin incluir bibliografía; por lo tanto, cumple con el criterio de evaluación de originalidad establecido en el REGLAMENTO DE GRADOS Y TÍTULOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA aprobado mediante RESOLUCIÓN DE COMISIÓN ORGANIZADORA N° 770-2025- UNACH.

Se expide la presente, a petición de la parte interesada para los fines que estime conveniente.

Chota, 11 de setiembre del 2026.

Atentamente

.....  
Dr. Guillermo A. Chávez Santa Cruz  
Docente UNACH – CIP 28030

# INFORME FINAL DE TESIS\_pdf

*por* Flor Nelida Perez Fernandez

ASESOR: DR. GUILLERMO ALEJANDRO CHÁVEZ SANTA CRUZ

COASESOR: MG. LEONEL ALONSO PACCOSONCO SUCAPUCA



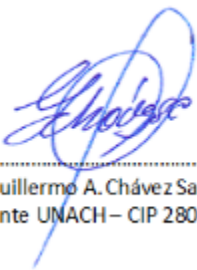
Dr. Guillermo A. Chávez Santa Cruz  
Docente UNACH – CIP 28030

# INFORME FINAL DE TESIS.pdf

## INFORME DE ORIGINALIDAD

|                     |                     |               |                         |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 2%                  | %                   | %             | 2%                      |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

## FUENTES PRIMARIAS

|    |                                                                                 |                                                                                                                                                        |      |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1  | Submitted to Universidad Católica de Santa María                                | <br>Dr. Guillermo A. Chávez Santa Cruz<br>Docente UNACH – CIP 28030 | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 2  | Submitted to D.A. de Ingeniería Civil                                           |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 3  | Submitted to Universidad Nacional de Ingeniería                                 |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 4  | Submitted to Universidad Cesar Vallejo                                          |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 5  | Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 6  | Submitted to Universidad Privada del Norte                                      |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 7  | Submitted to USIL-D.A. FAC. EDUCACION(C.VALDERRAMA)                             |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 8  | Submitted to Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra PUCMM              |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 9  | Submitted to Escuela Nacional Superior de Folklore "José María Arguedas"        |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 10 | Submitted to Universidad Internacional de la Rioja                              |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 11 | Submitted to Universidad de Manizales                                           |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 12 | Submitted to uncedu                                                             |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 13 | Submitted to Universidad Científica del Sur                                     |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 14 | Submitted to Universidad TecMilenio                                             |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |
| 15 | Submitted to Universidad de Guayaquil                                           |                                                                                                                                                        | <1 % |
|    | Trabajo del estudiante                                                          |                                                                                                                                                        |      |

Excluir citas

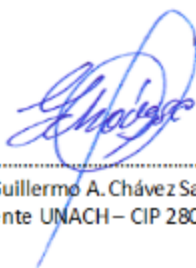
Activo

Excluir coincidencias

&lt; 20 words

Excluir bibliografía

Activo



Dr. Guillermo A. Chávez Santa Cruz  
Docente UNACH – CIP 28030



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

REG. N° 063-2026-FCA

El jurado evaluador designado con RESOLUCIÓN DE DECANATO N.° 067-2026-FCA/UNACH:

| Nombres y apellidos                    | Cargo      |
|----------------------------------------|------------|
| Dra. Mariela Núñez Figueroa            | Presidente |
| M. Sc. Roxana Mabel Sempertegui Rafael | Secretario |
| M. Sc. José Magno Quiroz Gonzales      | Vocal      |

De la tesis titulada:

"Evaluación temporal de contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>) y su relación con variables meteorológicas e identificación de fuentes mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024-2025)"

Que ha sustentado el(los) Bachiller (es):

| Nombres y apellidos         | DNI      |
|-----------------------------|----------|
| Flor Nelida Perez Fernandez | 73350316 |

Para obtener el título profesional de:

Ingeniero Forestal y Ambiental

Acuerdan por:

☒ Unanimidad ☐ Mayoría

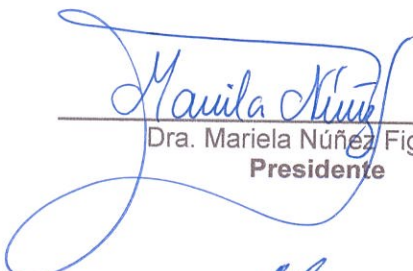
☒ Aprobar ☐ Desaprobar

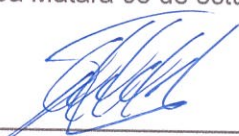
Otorgando la calificación de:

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <input type="checkbox"/>            | Aprobado  |
| <input type="checkbox"/>            | Excelente |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bueno     |
| <input type="checkbox"/>            | Regular   |

☐ Desaprobado

Colpa Matara 06 de octubre del 2026

  
Dra. Mariela Núñez Figueroa  
Presidente

  
M. Sc. Roxana Mabel Sempertegui  
Rafael  
Secretario

  
M. Sc. José Magno Quiroz Gonzales  
Vocal

  
Dr. Guillermo Alejandro Chávez  
Santacruz  
Asesor

  
Mg. Leonel Alonso Paccosonco Sucapuca

Coasesor

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Sabina y Gervacio y  
a mis adorados hermanos Luz, Elder,  
Celso, Rosa, Hodale, Milagros y Leyla  
que los amo infinitamente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Dios por guiarme siempre.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, amor y lealtad.

A la Universidad por permitirme una formación profesional, a mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental que acompañaron este camino profesional compartiendo experiencias y conocimientos.

A mis asesores Dr. Alejandro Chavez y Mg. Leonel Paccosonco por su orientación académica, aportes técnicos y acompañamiento para el desarrollo de la presente investigación.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al cumplimiento de este logro académico.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA.....                                 | ii   |
| AGRADECIMIENTOS .....                            | iii  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                           | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                           | x    |
| RESUMEN .....                                    | xv   |
| ABSTRACT.....                                    | xvi  |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....                   | 1    |
| 1.1 Planteamiento del Problema .....             | 1    |
| 1.2 Justificación de la Investigación .....      | 4    |
| 1.3 Formulación del Problema.....                | 5    |
| 1.4 Objetivos de la Investigación.....           | 5    |
| 1.4.1 Objetivo General.....                      | 5    |
| 1.4.2 Objetivos Específicos.....                 | 5    |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....                 | 7    |
| 2.1 Antecedentes del Estudio .....               | 7    |
| 2.1.1 Internacionales .....                      | 7    |
| 2.1.2 Nacionales.....                            | 9    |
| 2.1.3 Regionales y locales.....                  | 11   |
| 2.2 Bases Teóricas.....                          | 12   |
| 2.2.1 Contaminación Atmosférica.....             | 12   |
| 2.2.2 PM <sub>10</sub> .....                     | 13   |
| 2.2.3 PM <sub>2.5</sub> .....                    | 13   |
| 2.2.4 SO <sub>2</sub> .....                      | 13   |
| 2.2.5 H <sub>2</sub> S .....                     | 13   |
| 2.2.6 Fuentes de Contaminación Atmosférica ..... | 14   |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.7 Variables Meteorológicas y su Relación con los Contaminantes Atmosféricos ..... | 17 |
| 2.2.8 Condiciones Portuarias y la Relación de Contaminantes .....                     | 18 |
| 2.2.9 Contaminación Atmosférica y su Implicancia en la Salud .....                    | 18 |
| 2.2.10 Métodos de Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos.....                        | 19 |
| 2.2.11 CBPF .....                                                                     | 19 |
| 2.2.12 HYSPLIT .....                                                                  | 20 |
| 2.3 Definiciones Conceptuales.....                                                    | 21 |
| 2.4 Marco Legal.....                                                                  | 21 |
| 2.4.1 Comparación de Estándares Internacionales y Nacionales de Calidad del Aire..... | 22 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....                                                       | 23 |
| 3.1 Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación.....                               | 23 |
| 3.1.1 Tipo y Nivel de Investigación .....                                             | 23 |
| 3.1.2 Diseño y Enfoque de Investigación .....                                         | 23 |
| 3.2 Ubicación, Población, Muestra y Muestreo .....                                    | 23 |
| 3.2.1 Ubicación Geográfica .....                                                      | 23 |
| 3.2.2 Población.....                                                                  | 25 |
| 3.2.3 Muestra .....                                                                   | 25 |
| 3.2.4 Muestreo .....                                                                  | 26 |
| 3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                             | 26 |
| 3.3.1 Técnicas de Recolección de Datos.....                                           | 26 |
| 3.3.2 Instrumentos de Recolección de Datos .....                                      | 27 |
| 3.4 Hipótesis .....                                                                   | 28 |
| 3.5 Operacionalización de Variables .....                                             | 28 |
| 3.6 Procedimiento de Recolección de Datos.....                                        | 29 |
| 3.7 Procedimiento de Análisis de Datos .....                                          | 31 |
| 3.7.1 Análisis descriptivo.....                                                       | 31 |
| 3.7.2 Análisis de la variación temporal.....                                          | 32 |

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.3 Análisis de correlación.....                                                                                                                                                                                          | 32 |
| 3.7.4 Análisis de fuentes mediante CBPF .....                                                                                                                                                                               | 35 |
| 3.7.5 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire (HYSPLIT) .....                                                                                                                                                        | 35 |
| 3.8 Materiales y Equipos.....                                                                                                                                                                                               | 36 |
| 3.8.1 Equipos de cómputo:.....                                                                                                                                                                                              | 36 |
| 3.8.2 Software .....                                                                                                                                                                                                        | 36 |
| 3.8.3 Fuentes de datos .....                                                                                                                                                                                                | 37 |
| 3.8.4 Normativa técnica .....                                                                                                                                                                                               | 37 |
| 3.9 Aspectos Éticos .....                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....                                                                                                                                                                                               | 39 |
| 4.1 Determinación de la concentración de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S durante el periodo 2024 y 2025.....                                                                      | 39 |
| 4.1.1 Concentraciones trimestrales y estacionales de contaminantes atmosféricos para el año 2024.....                                                                                                                       | 39 |
| 4.1.2 Concentraciones trimestrales y estacionales de contaminantes atmosféricos para el año 2025.....                                                                                                                       | 53 |
| 4.2. Determinación de las características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) durante el periodo 2024-2025 .....                                                               | 66 |
| 4.2.1 Características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) para el año 2024.....                                                                                                | 67 |
| 4.2.2 Características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) para el año 2025 .....                                                                                               | 75 |
| 4.3 Prueba de hipótesis .....                                                                                                                                                                                               | 84 |
| 4.3.1 Relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2024..... | 84 |
| 4.3.2 Relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2025..... | 98 |

|                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.3 Relación de los contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) con las variables Meteorológicas en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash trimestral para el año 2024 y 2025..... | 113 |
| 4.3.4 Relación de los contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) con las variables Meteorológicas en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash estacional para el año 2024 y 2025..... | 124 |
| 4.4 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF.....                                                                                                                                          | 137 |
| 4.4.1 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2024.....                                                                             | 137 |
| 4.4.2 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2025.....                                                                             | 147 |
| 4.5 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el distrito de Chimbote, Santa, Áncash durante los años 2024-2025 .....                                                                                      | 159 |
| 4.5.1 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el año 2024.....                                                                                                                                           | 160 |
| 4.5.2 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el año 2025.....                                                                                                                                           | 169 |
| 4.6 Discusión.....                                                                                                                                                                                                                              | 180 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                                                                                | 190 |
| 5.1 Conclusiones .....                                                                                                                                                                                                                          | 190 |
| 5.2 Recomendaciones .....                                                                                                                                                                                                                       | 191 |
| REFERENCIAS.....                                                                                                                                                                                                                                | 193 |
| ANEXOS .....                                                                                                                                                                                                                                    | 1   |
| Anexo 1: Matriz de Consistencia.....                                                                                                                                                                                                            | 1   |
| Anexo 2: Procesamiento de datos en programa RStudio.....                                                                                                                                                                                        | 3   |
| Anexo 3: Modelamiento de datos en HYSPLIT .....                                                                                                                                                                                                 | 5   |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1:</b> Métodos de medición según ECA 2017 y Protocolo Nacional 2019 del Ministerio del Ambiente.....                                                                                                                                                                                                   | 19 |
| <b>Tabla 2:</b> Cuadro comparativo: Valores límite en estándares de calidad del aire.....                                                                                                                                                                                                                       | 22 |
| <b>Tabla 3:</b> Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad de aire en función de la población aledaña.....                                                                                                                                                                                             | 26 |
| <b>Tabla 4:</b> Operacionalización de Variables .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 28 |
| <b>Tabla 5:</b> Concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                                                   | 39 |
| <b>Tabla 6:</b> Concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                                                   | 44 |
| <b>Tabla 7:</b> Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y del cociente PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> en el distrito de Chimbote durante el año 2024.....                                                      | 51 |
| <b>Tabla 8:</b> Concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                                                   | 53 |
| <b>Tabla 9:</b> Concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                                                   | 58 |
| <b>Tabla 10:</b> Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y del cociente PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> en el distrito de Chimbote durante el año 2025.....                                                     | 65 |
| <b>Tabla 11:</b> Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2024....                                                                                                                 | 67 |
| <b>Tabla 12:</b> Comportamiento estacional de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2024....                                                                                                                 | 71 |
| <b>Tabla 13:</b> Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2025....                                                                                                                 | 76 |
| <b>Tabla 14:</b> Comportamiento estacional de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2025....                                                                                                                 | 80 |
| <b>Tabla 15:</b> Promedios mensuales de los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) y variables meteorológicas (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 ..... | 84 |
| <b>Tabla 16:</b> Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                                       | 85 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 17:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas mensuales en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                                                                                     | 86  |
| <b>Tabla 18:</b> Promedios mensuales de los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) y variables meteorológicas (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 ..... | 98  |
| <b>Tabla 19:</b> Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                                       | 99  |
| <b>Tabla 20:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas mensuales en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                                                                                     | 100 |
| <b>Tabla 21:</b> Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, durante los años 2024 y 2025.....                                                         | 113 |
| <b>Tabla 22:</b> Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) durante los años 2024-2025 de manera trimestral .....                                                                                                       | 115 |
| <b>Tabla 23:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2024.....                                                                                                                                                      | 116 |
| <b>Tabla 24:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2025.....                                                                                                                                                      | 121 |
| <b>Tabla 25:</b> Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, durante los años 2024 y 2025 de manera estacional.....                                    | 125 |
| <b>Tabla 26:</b> Prueba de Kolmogorov-Smirnov para las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) durante los años 2024 y 2025 de manera estacional .....                                                                                                                  | 126 |
| <b>Tabla 27:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2024.....                                                                                                                                                      | 128 |
| <b>Tabla 28:</b> Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2025 .....                                                                                                                                                     | 133 |
| <b>Tabla 29:</b> Parámetros utilizados para la ejecución del modelo HYSPLIT.....                                                                                                                                                                                                                                | 160 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Ubicación geográfica de la Estación de Vigilancia Ambiental “Inca Garcilaso de la Vega”, distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....                                                                                                      | 25 |
| <b>Figura 2:</b> Procedimiento de recolección de datos .....                                                                                                                                                                                             | 31 |
| <b>Figura 3:</b> Flujograma para las pruebas estadísticas de la idoneidad del modelo .....                                                                                                                                                               | 34 |
| <b>Figura 4:</b> Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                           | 41 |
| <b>Figura 5:</b> Variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                            | 43 |
| <b>Figura 6:</b> Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S diferenciada por estación en el distrito de Chimbote durante el año 2024.....  | 46 |
| <b>Figura 7:</b> Variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                            | 47 |
| <b>Figura 8:</b> Variación temporal de las concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                   | 48 |
| <b>Figura 9:</b> Variación temporal de las concentraciones de SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                                                     | 50 |
| <b>Figura 10:</b> Diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                                         | 52 |
| <b>Figura 11:</b> Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                          | 55 |
| <b>Figura 12:</b> Variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                           | 57 |
| <b>Figura 13:</b> Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S diferenciada por estación en el distrito de Chimbote durante el año 2025..... | 60 |
| <b>Figura 14:</b> Variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                           | 61 |
| <b>Figura 15:</b> Variación temporal de las concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                  | 62 |
| <b>Figura 16:</b> Variación temporal de las concentraciones de SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                    | 63 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 17:</b> Diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....    | 65 |
| <b>Figura 18:</b> Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....               | 69 |
| <b>Figura 19:</b> Rosas de viento trimestrales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                              | 70 |
| <b>Figura 20:</b> Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....               | 73 |
| <b>Figura 21:</b> Rosas de viento estacionales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....                              | 74 |
| <b>Figura 22:</b> Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....               | 77 |
| <b>Figura 23:</b> Rosas de viento trimestrales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                              | 79 |
| <b>Figura 24:</b> Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....               | 82 |
| <b>Figura 25:</b> Rosas de viento estacionales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                              | 83 |
| <b>Figura 26:</b> Gráficas polares de PM <sub>10</sub> versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....  | 90 |
| <b>Figura 27:</b> Gráficas polares de PM <sub>2.5</sub> versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 ..... | 93 |
| <b>Figura 28:</b> Gráficas polares de SO <sub>2</sub> versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....   | 95 |
| <b>Figura 29:</b> Gráficas polares de H <sub>2</sub> S versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024 .....  | 97 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 30:</b> Gráficas polares de $PM_{10}$ versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                  | 104 |
| <b>Figura 31:</b> Gráficas polares de $PM_{2.5}$ versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                 | 107 |
| <b>Figura 32:</b> Gráficas polares de $SO_2$ versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                     | 110 |
| <b>Figura 33:</b> Gráficas polares de $H_2S$ versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025 .....                                                                     | 112 |
| <b>Figura 34:</b> Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad) de manera trimestral durante el año 2024 .....          | 119 |
| <b>Figura 35:</b> Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral durante el año 2025 ..... | 123 |
| <b>Figura 36:</b> Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2024 ..... | 131 |
| <b>Figura 37:</b> Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2025 ..... | 136 |
| <b>Figura 38:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el primer trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash.....                                                                        | 138 |
| <b>Figura 39:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el segundo trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....                                                                      | 139 |
| <b>Figura 40:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el tercer trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....                                                                       | 140 |
| <b>Figura 41:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el cuarto trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....                                                                       | 141 |
| <b>Figura 42:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el verano de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash.....                                                                                  | 143 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 43:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el otoño de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....            | 144 |
| <b>Figura 44:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante la primavera de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....        | 146 |
| <b>Figura 45:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el primer trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash.....  | 148 |
| <b>Figura 46:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el segundo trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash..... | 149 |
| <b>Figura 47:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el tercer trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash ..... | 150 |
| <b>Figura 48:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el cuarto trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash ..... | 152 |
| <b>Figura 49:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el verano de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash.....            | 154 |
| <b>Figura 50:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el otoño de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....            | 155 |
| <b>Figura 51:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante el invierno de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....         | 156 |
| <b>Figura 52:</b> Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ durante la primavera de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash .....        | 158 |
| <b>Figura 53:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ registrado en el distrito de Chimbote .....                                               | 161 |
| <b>Figura 54:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $SO_2$ registrado en el distrito de Chimbote .....                                                               | 162 |
| <b>Figura 55:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $H_2S$ registrado en el distrito de Chimbote .....                                                               | 163 |
| <b>Figura 56:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2024, Chimbote .....                                                                                                | 165 |
| <b>Figura 57:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al Otoño de 2024, Chimbote .....                                                                                                 | 166 |
| <b>Figura 58:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al Invierno de 2024, Chimbote .....                                                                                              | 167 |
| <b>Figura 59:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la Primavera de 2024, Chimbote.....                                                                                            | 168 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 60:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ registrado en el distrito de Chimbote .....      | 170 |
| <b>Figura 61:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $SO_2$ registrado en el distrito de Chimbote .....                      | 171 |
| <b>Figura 62:</b> Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de $H_2S$ registrado el 31 de mayo de 2025 en el distrito de Chimbote..... | 172 |
| <b>Figura 63:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2025, Chimbote .....                                                       | 175 |
| <b>Figura 64:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al otoño de 2025, Chimbote .....                                                        | 176 |
| <b>Figura 65:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al invierno de 2025, Chimbote .....                                                     | 177 |
| <b>Figura 66:</b> Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la primavera de 2025, Chimbote.....                                                   | 178 |
| <b>Figura 67:</b> Manejo de procesamiento de datos para los contaminantes atmosféricos .....                                                                  | 3   |
| <b>Figura 68:</b> Manejo de procesamiento de datos para análisis trimestral mediante rosas de viento .....                                                    | 3   |
| <b>Figura 69:</b> R script desarrollados para el procesamiento de datos en RStudio.....                                                                       | 4   |
| <b>Figura 70:</b> Modelamiento de datos en HYSPLIT .....                                                                                                      | 5   |

## RESUMEN

El presente estudio ha tenido como objetivo evaluar la variabilidad temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , así como también su relación con las variables meteorológicas y las posibles fuentes de origen en el distrito de Chimbote, provincia de Santa, del departamento de Áncash, durante el periodo 2024-2025. Se emplearon registros sobre calidad del aire y variables meteorológicas de la estación Inca Garcilaso de la Vega. El análisis incluyó estadística descriptiva, correlación de Spearman, análisis polar mediante OpenAir, determinación de probables fuentes mediante la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) y el estudio de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT.

Los resultados mostraron concentraciones medias anuales de  $PM_{10}$  de  $20.57 \mu g/m^3$  en 2024 y  $13.62 \mu g/m^3$  en 2025;  $PM_{2.5}$  de  $15.60$  y  $11.64 \mu g/m^3$ ;  $SO_2$  de  $24.48$  y  $19.61 \mu g/m^3$ ; y  $H_2S$  de  $10.98$  y  $8.74 \mu g/m^3$ , respectivamente. En general, todos los contaminantes presentaron una disminución de sus concentraciones durante el segundo año de evaluación. Las concentraciones mayores de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se registraron principalmente en verano y otoño, mientras que el  $SO_2$  presentó la mayor variabilidad temporal, alcanzando concentraciones horarias máximas de  $861.69 \mu g/m^3$  en 2024 y  $525.96 \mu g/m^3$  en 2025. El  $H_2S$  registró mayores concentraciones durante verano y presentó una disminución progresiva hacia invierno y primavera.

Las variables meteorológicas se caracterizaron por temperaturas medias cercanas a  $20^\circ C$ , una humedad relativa superior al 80 % y vientos predominantemente flojos procedentes de los sectores sur y sur-sureste. El  $PM_{10}$  presentó correlaciones significativas con la temperatura, humedad relativa y dirección del viento durante 2024, mientras que el  $H_2S$  mostró asociaciones significativas con dichas variables durante 2025. Los análisis CBPF identificaron contribuciones recurrentes desde los sectores sur, sur-sureste, sureste, oeste-noroeste y este, mientras que las retrotrayectorias HYSPLIT evidenciaron una influencia predominante de masas de aire procedentes del sector sur y del sector sur-sureste para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $SO_2$ , mientras que el  $H_2S$  presentó una mayor influencia de los sectores este-noreste, este y sureste. En conclusión, en Chimbote la calidad del aire estuvo influenciada por fuentes locales como por procesos de transporte atmosférico regional, cuyos patrones de comportamiento, transporte atmosférico y contribución de fuentes variaron según el contaminante y la época del año.

**Palabras clave:** Calidad del aire; contaminantes atmosféricos; variables meteorológicas; CBPF; HYSPLIT.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the temporal variability of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>S concentrations, as well as their relationship with meteorological variables and potential emission sources in the district of Chimbote, Santa Province, Áncash Department, during the 2024-2025 period. Air quality records and meteorological data obtained from the Inca Garcilaso de la Vega monitoring station were used. The analysis included descriptive statistics, Spearman correlation analysis, polar plot analysis using OpenAir, identification of potential sources through the Conditional Bivariate Probability Function (CBPF), and backward air mass trajectory analysis using the HYSPLIT model.

The results showed annual mean concentrations of PM<sub>10</sub> of 20.57 µg/m<sup>3</sup> in 2024 and 13.62 µg/m<sup>3</sup> in 2025; PM<sub>2.5</sub> concentrations of 15.60 and 11.64 µg/m<sup>3</sup>; SO<sub>2</sub> concentrations of 24.48 and 19.61 µg/m<sup>3</sup>; and H<sub>2</sub>S concentrations of 10.98 and 8.74 µg/m<sup>3</sup>, respectively. Overall, all pollutants exhibited lower concentrations during the second year of evaluation. The highest PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations were mainly recorded during summer and autumn, whereas SO<sub>2</sub> showed the greatest temporal variability, reaching maximum hourly concentrations of 861.69 µg/m<sup>3</sup> in 2024 and 525.96 µg/m<sup>3</sup> in 2025. H<sub>2</sub>S concentrations were highest during summer and decreased progressively towards winter and spring.

Meteorological conditions were characterized by mean temperatures close to 20 °C, relative humidity levels above 80 %, and predominantly light winds originating from the south and south-southeast sectors. PM<sub>10</sub> showed significant correlations with temperature, relative humidity, and wind direction during 2024, whereas H<sub>2</sub>S exhibited significant associations with these variables during 2025. CBPF analyses identified recurrent source contributions from the south, south-southeast, southeast, west-northwest, and east sectors. Likewise, HYSPLIT backward trajectory analyses revealed a predominant influence of air masses originating from the south and south-southeast sectors for PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and SO<sub>2</sub>, whereas H<sub>2</sub>S showed a greater influence from the east-northeast, east, and southeast sectors.

In conclusion, air quality in Chimbote was influenced by both local emission sources and regional atmospheric transport processes, whose behavioral patterns, transport dynamics, and source contributions varied according to the pollutant and the season of the year.

**Keywords:** air quality; atmospheric pollutants; meteorological variables; CBPF; HYSPLIT.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del Problema

La contaminación del aire representa actualmente uno de los desafíos ambientales y sanitarios más relevantes a escala mundial. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a la contaminación atmosférica exterior ocasiona alrededor de 4.2 millones de fallecimientos prematuros cada año, principalmente debido al desarrollo o agravamiento de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otras afecciones vinculadas con la exposición continua a contaminantes presentes en la atmósfera. Asimismo, al considerar conjuntamente la contaminación del aire exterior y la contaminación del aire en espacios interiores, el número de muertes prematuras se aproxima a los 7 millones anuales. Además de los efectos que genera sobre la salud de la población, esta problemática también produce consecuencias económicas importantes, reflejadas en un incremento del gasto sanitario, pérdidas de productividad laboral y deterioro de los ecosistemas. En ese contexto, la protección y mejora de la calidad del aire se ha consolidado como un tema prioritario dentro de las políticas ambientales y de salud pública a nivel internacional (OMS, 2023).

La contaminación atmosférica se reconoce como un problema ambiental de creciente relevancia tanto a escala mundial como regional, debido a los efectos que genera sobre la salud de la población y sobre el funcionamiento de los ecosistemas (Hu y Ryuichiro, 2020). En respuesta a esta problemática, diversas iniciativas de prevención y control se han orientado hacia la regulación de contaminantes considerados prioritarios, entre ellos el material particulado fino y respirable ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) (Schraufnagel et al., 2018). Según McDonald (2012), las emisiones de estos contaminantes se encuentran asociadas principalmente al desarrollo de actividades antrópicas en entornos urbanos, además del transporte atmosférico de contaminantes provenientes de otras regiones. La interacción entre las fuentes de emisión y las condiciones meteorológicas predominantes influye en la dispersión y acumulación de los contaminantes en la atmósfera, constituyendo un elemento fundamental para el planteamiento de medidas destinadas a la protección de la salud pública.

Las fuentes principales de emisión de material particulado ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) se asocian principalmente al tránsito vehicular en vías pavimentadas y no pavimentadas, a las actividades propias del sector construcción, a labores agrícolas, a procesos de erosión eólica en terrenos agrícolas y no agrícolas, así como a la suspensión de polvo en zonas cercanas a áreas desérticas

(Luo et al., 2018). En ciudades costeras y portuarias, como Chimbote, las emisiones de material particulado también pueden estar relacionadas con las actividades pesqueras, industriales y portuarias, que incluyen el transporte de materias primas y otros productos a granel, su almacenamiento y manipulación. En el ámbito minero, las emisiones contaminantes se generan principalmente por la alteración mecánica del suelo durante actividades como el uso de explosivos, excavaciones, el desplazamiento de la maquinaria pesada que utilizan en sus actividades, así como el constante tránsito de numerosos vehículos y equipos especializados (Morozesk *et al.*, 2021). También las diferentes etapas propias del proceso de producción, las partículas metálicas en suspensión (PM) pueden dispersarse durante el almacenamiento y transporte del hierro, desde las zonas mineras hasta los centros de procesamiento y exportación. Este traslado, que se realiza mediante trenes de carga abiertos y sistemas de transporte industrial, contribuye significativamente al aumento del total de concentración en el aire de material particulado (Souza *et al.*, 2021).

Las observaciones realizadas mediante tecnología satelital han permitido identificar emisiones puntuales del contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que provienen principalmente de actividades industriales como la fundición de níquel y cobre, centrales termoeléctricas, así como también refinerías de gas y refinerías de petróleo, así como de fuentes naturales como los volcanes (Carn *et al.*, 2017). Una vez liberado a la atmósfera, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) puede depositarse sobre diversas superficies o transformarse mediante procesos químicos en aerosoles de sulfato, contribuyendo así a la formación de material particulado (Kharol *et al.*, 2020).

De acuerdo con Maldonado y Aguirre (2024), las emisiones de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en ciudades costeras están asociadas principalmente a actividades pesqueras, portuarias y al almacenamiento de residuos orgánicos en descomposición. En este contexto, las fábricas que procesan aceite de pescado y harina de pescado pueden generar emisiones de H<sub>2</sub>S durante la descomposición anaerobia de materia orgánica en tanques de almacenamiento, también en las áreas de disposición de residuos y en los respectivos sistemas donde se tratan los efluentes. Asimismo, las operaciones portuarias vinculadas a la manipulación y transporte de productos pesqueros pueden contribuir con el aumento del H<sub>2</sub>S en la atmósfera.

Nuestro país en los últimos años ha enfrentado el complejo reto de equilibrar un acelerado crecimiento económico impulsado por el desarrollo industrial, el aumento poblacional y la expansión del parque automotor, lo que es constante es la necesidad de que el

medio ambiente sea preservado, promoviendo un desarrollo sostenible. Tanto el Caribe como América Latina, actualmente son una región con mayor urbanización a nivel mundial, teniendo un porcentaje del 80 % del total de su población que residen en los cascos urbanos (CEPAL, 2017). Este fenómeno ha traído consigo una serie de desafíos socioambientales, especialmente en áreas urbanas e industriales en constante expansión. Entre los principales problemas emergentes se encuentra la continua contaminación del aire, fenómeno estrechamente vinculado con el constante cambio climático y a sus impactos sobre los ecosistemas naturales, convirtiéndose en una preocupación creciente tanto para la sociedad en general y de mayor responsabilidad para las autoridades (Rodriguez y Bustamante, 2013). En el contexto nacional, el Perú enfrenta importantes desafíos en materia de calidad del aire. Esto se ve demostrado en los resultados de la Encuesta Nacional de Programas Presupuestales de los años 2014-2017, que fue elaborada por el INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), donde indica que el 91.4 % del total de población que reside en la costa de las zonas urbanas indican percibir que en su entorno el aire está contaminado. Esta percepción ciudadana refleja una creciente preocupación debido a los impactos que genera la contaminación atmosférica tanto en el bienestar y salud de la población. Sin embargo, a pesar de que esta problemática no es reciente, el país aún no cuenta con un adecuado inventario regional que detalle las emisiones que generan los contaminantes atmosféricos y que contemple una adecuada desagregación espacial y temporal. Esta carencia limita la posibilidad de realizar modelamientos precisos y análisis técnicos que sirvan como una base de formulación de diferentes acciones de gobierno o políticas públicas eficaces que se orienten en específico a mejorar la calidad del aire.

Es así que, siendo el distrito de Chimbote una zona costera con presencia de un puerto industrial pesquero, una alta densidad poblacional y un crecimiento urbano acelerado, presenta diversas fuentes potenciales de emisión de contaminantes atmosféricos, entre las que destacan son fuentes móviles que se asocian con el parque automotor y fuentes fijas vinculadas con actividades pesqueras, industrias de harina y aceite de pescado, operaciones portuarias y otras actividades industriales. Además, la interacción de estas emisiones con las variables meteorológicas locales de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, y la velocidad y dirección del viento puede influir significativamente en que los contaminantes como el  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $H_2S$  y  $SO_2$  tenga mayor dispersión espacio-temporal. Sin embargo, se carece de estudios continuos y detallados que analicen esta relación y su identificación de fuentes en el contexto específico de Chimbote, lo cual es fundamental para comprender los patrones de calidad de

aire y sus posibles consecuencias que pueda llegar a tener sobre la salud y bienestar de la población expuesta.

## **1.2 Justificación de la Investigación**

A nivel mundial, uno de los problemas ambientales que compromete la calidad atmosférica y además tiene un impacto directo en el bienestar y salud de la población es la contaminación del aire. En este contexto, la OMS (Organización Mundial de la Salud) ha señalado que entre el 4 % y el 8 % de las muertes registradas globalmente están vinculadas a la exposición a contaminantes atmosféricos (López *et al.*, 2005), los factores que han contribuido con la degradación de la calidad de aire son el crecimiento urbano acelerado y la expansión de las ciudades. Este fenómeno afecta principalmente a la población residente, quienes se encuentran expuestos de manera constante a diversos contaminantes atmosféricos que pueden comprometer su salud y bienestar (Ebere *et al.*, 2020).

Un paso fundamental para comprender y gestionar de manera integral el total de contaminantes atmosféricos que existen en el distrito de Chimbote, es identificar y cuantificar los principales factores que influyen en su comportamiento de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>. Las emisiones de origen antropogénico, especialmente aquellas vinculadas a actividades industriales y al transporte, se reconocen como los principales generadores de material particulado. No obstante, las variables meteorológicas locales como son la temperatura, la presión atmosférica, la velocidad del viento y la humedad relativa, también desempeñan un papel determinante en lo que se denomina variabilidad temporal y espacial de estos contaminantes, afectando su dispersión como también su concentración a lo largo del tiempo.

En América del Sur, pero de modo particular en Perú, los esfuerzos institucionales suelen centrarse en realizar inventarios de los GEI, los denominados Gases de Efecto Invernadero, como parte de los compromisos asumidos en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Sin embargo, los registros que se tienen sobre emisiones distintas a los GEI se han enfocado puntualmente en grandes centros urbanos como Lima, dejando de lado otras regiones del país. Esta situación limita la comprensión integral de las interacciones entre la calidad de aire, las emisiones atmosféricas y sus efectos sobre la salud pública, especialmente en zonas con actividad industrial significativa como el distrito de Chimbote.

En el marco de las políticas ambientales nacionales, la Resolución Ministerial N° 339-2012-MINAM ha clasificado a la región Áncash como una Zona de Atención Prioritaria (ZAP)

para la vigilancia de la calidad del aire, debido a la presencia de actividades industriales relevantes y condiciones atmosféricas que pueden afectar la salud pública. Esta clasificación fue ratificada por el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, el cual instituye los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el aire, reforzando la necesidad de monitoreo en lugares como el distrito de Chimbote, Santa. Chimbote, al ser una zona costera con actividad portuaria e industrial pesquera, presenta emisiones atmosféricas significativas que requieren ser estudiadas en relación con las variables meteorológicas locales y sus probables fuentes. La falta de inventarios detallados y actualizados sobre estas emisiones limita la gestión de gobiernos locales para implementar estrategias efectivas de gestión ambiental. Por ello, resulta necesario desarrollar investigaciones que permitan comprender la evaluación temporal de contaminantes como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, y su interacción con factores meteorológicos, como identificar sus fuentes contribuyendo así a la protección de la salud de la población y al fortalecimiento de las políticas públicas ambientales.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿Cuál es la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), su relación con las variables meteorológicas y sus fuentes de origen mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024 – 2025)?

### **1.4 Objetivos de la Investigación**

#### ***1.4.1 Objetivo General***

- Evaluar la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), su relación con las variables meteorológicas y sus fuentes de origen mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024 – 2025).

#### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Determinar la concentración de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> en la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.
- Determinar las características meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento que presenta la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.
- Determinar la variabilidad temporal de la concentración de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> en la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.

- Evaluar la relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.
- Determinar las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) aplicando el método CBPF, y retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HISPLIT en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del Estudio

#### 2.1.1 Internacionales

Diversos estudios internacionales han demostrado que las condiciones meteorológicas tienen una influencia significativa en el proceso de dispersión y en el proceso de concentración de contaminantes atmosféricos.

López et al. (2024) en un estudio titulado “Relación entre factores meteorológicos y contaminantes criterio en La Habana” analizó cuál es la influencia que posee las condiciones meteorológicas en la concentración de los contaminantes atmosféricos como son el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), material particulado ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). La investigación empleó métodos estadísticos como el coeficiente de Spearman y pruebas no paramétricas para establecer correlaciones entre la velocidad del viento, precipitación y estos contaminantes, así como también las situaciones sinópticas. Los resultados evidenciaron que, en condiciones de baja precipitación y vientos débiles, el total de contaminantes superaban los límites establecidos por la normativa ambiental cubana, demostrando lo importante que es tener en cuenta la dinámica atmosférica en el análisis de la calidad del aire. Este estudio destaca la relevancia de integrar variables meteorológicas en el monitoreo ambiental, especialmente en contextos urbanos con alta carga de emisiones, y sirve como referencia para investigaciones similares en otras ciudades latinoamericanas como Chimbote, donde la actividad industrial y portuaria también puede generar impactos significativos en la calidad del aire.

Vongruang et al. (2024) realizó una investigación denominada "Desarrollo de criterios meteorológicos para clasificar el riesgo por  $\text{PM}_{2.5}$  en una provincia industrial costera de Tailandia" donde tuvieron como objetivo principal el desarrollar criterios meteorológicos para que se clasifique el riesgo por  $\text{PM}_{2.5}$  en una región industrial costera de Tailandia. El diseño fue cuantitativo, con datos de  $\text{PM}_{2.5}$  y variables meteorológicas durante dos años; se aplicaron análisis estadísticos y modelos predictivos para definir umbrales. Los resultados muestran que episodios de  $\text{PM}_{2.5}$  alto se asocian con vientos  $<2$  m/s y capas límite  $<500$  m, aumentando el riesgo en un 60 % en invierno seco. Se concluye que la meteorología es determinante en la acumulación de contaminantes, aportando criterios útiles para análisis temporal y correlacional en Chimbote.

En la ciudad de Cuenca, Ecuador, Zambrano et al., (2023) realizaron un estudio para analizar la relación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas por estacionalidad. Utilizando unas técnicas de minería de datos, concretamente árboles de decisión, se procesaron más de 39,000 registros de datos atmosféricos recolectados durante el año 2018. El objetivo fue validar reglas de asociación previamente establecidas entre contaminantes como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, y las condiciones de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. La metodología empleada permitió identificar patrones mensuales de comportamiento, evidenciando que ciertas combinaciones de variables meteorológicas influyen directamente en la concentración de contaminantes. Por ejemplo, se observó que niveles bajos de humedad relativa y velocidades de viento moderadas favorecen la acumulación de ozono (O<sub>3</sub>), mientras que la temperatura alta se asocia con mayores niveles de PM<sub>2.5</sub>. Los resultados obtenidos mostraron que más del 70 % de las reglas de asociación se cumplieron en los meses analizados, lo que demuestra la utilidad de los árboles de decisión como una herramienta fundamental para el análisis ambiental y la predicción de escenarios de contaminación atmosférica.

Nguyen et al. (2023) ejecutaron la investigación “Áreas fuente de PM<sub>2.5</sub> en la Ciudad Ho Chi Minh, Vietnam”, buscaron identificar áreas fuente de PM<sub>2.5</sub> en Ciudad Ho Chi Minh, Vietnam, integrando CBPF y análisis de trayectorias. El estudio fue correlacional, con datos horarios de PM<sub>2.5</sub> y meteorología durante un año; se aplicaron CBPF y PSCF/CWT para diferenciar fuentes locales y regionales. Los hallazgos indican que el tráfico urbano aportó más del 55 % del PM<sub>2.5</sub>, mientras que rutas marítimas y zonas industriales contribuyeron hasta un 30 % en episodios secos. Se concluye que la combinación CBPF y trayectorias es eficaz para atribuir fuentes en ciudades costeras.

Trošić y Filipčić, (2022), realizaron el estudio titulado “Análisis con el modelo HYSPLIT de un caso de brisa marina con concentración diaria extrema de PM<sub>10</sub> en Split, Croacia”, donde tuvieron como objetivo principal el análisis de la influencia de la brisa marina en episodios extremos de PM<sub>10</sub> en Split, Croacia, mediante el modelo HYSPLIT. El diseño fue descriptivo con enfoque de simulación, usando datos meteorológicos y de calidad del aire de una estación urbana; se aplicaron retrotrayectorias HYSPLIT y validación con observaciones locales. Los resultados mostraron que la recirculación de masas de aire por la brisa marina incrementó las concentraciones de PM<sub>10</sub> en más del 40 % respecto a días sin brisa. Se concluye que la dinámica costera y el transporte de contaminantes

condicionan episodios críticos, lo que respalda el uso de HYSPLIT en entornos portuarios similares a Chimbote.

En México, Ascanio et al. (2021) han desarrollado investigaciones sobre el “Desarrollo de un prototipo de monitoreo de variables climáticas con proyección online y adquisición de datos”, orientadas al monitoreo de las condiciones climáticas como la humedad relativa, la radiación solar, temperatura, y la velocidad del viento, con el objetivo principal de comprender su influencia en la producción y concentración de contaminantes atmosféricos, especialmente el ozono ( $O_3$ ) y sus precursores. Uno de los proyectos más destacados consistió en realizar el diseño de un sistema de adquisición de datos en tiempo real mediante sensores integrados a plataformas como Raspberry Pi y ESP8266, lo que permitió establecer modelos predictivos para que en zonas urbanas especialmente en las que se encuentran con una población densa exista la gestión de calidad de aire. El estudio dejó en evidencia que la variable climática de la temperatura y de la radiación solar tienen una correlación directa con la formación de ozono troposférico, mientras que las variables climáticas de la velocidad del viento y la humedad relativa influyen en su dispersión.

### **2.1.2 Nacionales**

Rojas et al. (2022) desarrollaron una investigación en Lima Metropolitana que aplicó simulaciones computacionales para realizar el análisis que existe en la relación entre la concentración de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) y las variables meteorológicas. El estudio utilizó el modelo numérico CCATT-BRAMS, desarrollado por el INPE/CPTEC de Brasil, en conjunto con datos observados del SENAMHI del Perú (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). Las simulaciones permitieron la evaluación de cómo las condiciones como la humedad relativa y la velocidad del viento tienen influencia en la dispersión de material particulado en diferentes estaciones del año. Los resultados mostraron que un incremento en los factores como la humedad relativa y la velocidad del viento contribuye a la disminución de las concentraciones de  $PM_{10}$ , tanto en verano como en invierno. Esta evidencia respalda la importancia de considerar las condiciones meteorológicas en el análisis de la calidad del aire, en específico en las zonas urbanas que presentan una elevada actividad vehicular así como también densidad poblacional.

Zapana (2021) en su investigación desarrollada en Pacocha-Ilo- Moquegua se orientó a analizar la relación entre las condiciones meteorológicas con la dispersión espacio-temporal de los contaminantes atmosféricos como  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $O_3$  durante los años 2019 y

2020. Para el presente estudio se utilizaron datos que se obtuvieron de algunas estaciones de monitoreo de calidad del aire, aplicando análisis estadísticos como correlaciones de Pearson y Spearman para la evaluación del comportamiento de los contaminantes en función de parámetros de humedad relativa, temperatura y también la velocidad y dirección del viento. Los resultados evidenciaron que las condiciones meteorológicas tienen una influencia significativa en la concentración y dispersión de los contaminantes. Por ejemplo, se observó que el parámetro de velocidad del viento y temperatura tienen una correlación directa con el PM10 y el SO<sub>2</sub>, mientras que la humedad relativa mostró una relación inversa con el PM2.5. Además, se identificaron patrones estacionales que han permitido una mejor comprensión sobre la dinámica de la contaminación atmosférica en zonas costeras con actividad industrial. Este estudio constituye un referente importante para investigaciones similares en otras regiones del país, como el distrito de Chimbote, donde también se presentan condiciones ambientales y fuentes emisoras comparables.

En el distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco, se desarrolló una investigación que evaluó la dispersión de PM2.5, PM10 en relación con las condiciones meteorológicas tales como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura. El estudio, realizado por Picoy (2022) se centró en el centro poblado de Champamarca, una zona afectada por actividades mineras y condiciones climáticas extremas debido a su altitud de más de 4,300 msnm. Mediante un enfoque cuantitativo y el uso de técnicas estadísticas inferenciales, se identificó una correlación positiva tanto en la concentración de material particulado con la velocidad del viento y la, mientras que la humedad relativa mostró una relación inversa. Se emplearon rosas de viento como herramienta de análisis para determinar los patrones de dispersión, concluyendo que el tipo de viento predominante en la zona (ventolina) influye directamente en la propagación de partículas respirables.

En la ciudad de Ica, un estudio realizado por Córdoba, Barrios y Córdoba (2021) orientado a caracterizar la calidad del aire y analizar el comportamiento de contaminantes atmosféricos como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, considerando la influencia de factores ambientales asociados a actividades urbanas y condiciones meteorológicas locales. Los resultados evidenciaron que el material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) presentó concentraciones superiores a los estándares nacionales en determinadas estaciones de monitoreo, mientras que gases como SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> mostraron variaciones vinculadas a las condiciones atmosféricas predominantes. El estudio resalta la importancia de evaluar conjuntamente los contaminantes y las variables meteorológicas para comprender la dinámica de la contaminación del aire en

zonas urbanísticas, proporcionando un marco de referencia pertinente para investigaciones en distritos costeros e industriales como Chimbote.

En Perú, se realizó una revisión sistemática sobre el uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, el principal objetivo fue analizar su aplicación para el estudio principalmente de la calidad del aire en distintos contextos urbanos e industriales. El estudio, desarrollado por investigadores de la Universidad Ricardo Palma, también de la Universidad Nacional Federico Villarreal y la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja, recopiló y analizó 63 artículos originales que fueron publicados durante últimos diez años, para esto se utilizó ciertas bases de datos como ScienceDirect, Scielo, PubMed y Redalyc. Los resultados evidenciaron que los modelos más utilizados para estimar la dispersión de contaminantes como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> son los modelos gaussianos y lagrangianos, debido a su capacidad para simular el transporte y la concentración de partículas en función de los parámetros meteorológicos tales como la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento, y la temperatura. Además, se destacó la importancia de incluir parámetros adecuados en los modelos para lograr estimaciones confiables, especialmente en zonas con alta carga de emisiones (Rangel et al., 2022).

### ***2.1.3 Regionales y locales***

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2022) desarrolló una evaluación ambiental de seguimiento de la calidad del aire, esta evaluación lo ejecutó en la zona industrial denominada Gran Trapecio que pertenece al distrito de Chimbote; los meses de esta evaluación fueron durante enero a octubre del año 2022, área caracterizada por una importante actividad pesquera e industrial. El estudio incluyó el monitoreo de contaminantes atmosféricos como el material particulado, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y también el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), así como el análisis de su comportamiento temporal bajo las condiciones ambientales predominantes del área. Los resultados indicaron que las concentraciones promedio de 24 horas de los contaminantes evaluados no superaron los Estándares de Calidad Ambiental para aire; no obstante, se evidenció una variabilidad asociada a factores meteorológicos y operativos, lo que resalta la existencia la influencia que tienen las condiciones atmosféricas en los procesos de dispersión de contaminantes. Este antecedente constituye un referente regional pertinente para posteriores estudios que desarrollen evaluaciones de la relación existente entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas en el distrito de Chimbote.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Contaminación Atmosférica

Sposob (2025) precisa a la contaminación atmosférica como la presencia en el aire de sustancias o partículas que pueden ser perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas y el clima. Estas sustancias pueden tener origen natural (como erupciones volcánicas) o ser producto de actividades humanas, como la industria, el transporte o la quema de combustibles fósiles. Este fenómeno altera el equilibrio químico de la atmósfera y puede generar efectos locales, regionales o incluso mayores como efectos globales, tales como la lluvia ácida o el smog, el cambio climático; Reyes (2025) lo define como la existencia de sustancias químicas, partículas en el aire o también como formas de energía que, de existir en concentraciones mayores a los niveles naturales, generan efectos negativos sobre la salud humana, incluso efectos negativos en los ecosistemas y también los materiales. Estas sustancias pueden ser de origen antropogénico como las emisiones industriales, el transporte vehicular, la quema de residuos o también naturales, tales como las posibles erupciones volcánicas o también los incendios forestales

Desde una perspectiva peruana, Moretti et al. (2023) señalan que la contaminación del aire implica una modificación del equilibrio de la atmósfera, ya sea por cambios en la proporción de sus componentes o por la introducción de elementos nocivos. En Lima, por ejemplo, el uso de combustibles fósiles ha sido identificado como una de las fuentes principales de emisión de CO<sub>2</sub>, esto se ve reflejado en una tendencia que también puede observarse en otras ciudades costeras con actividad industrial como Chimbote.

Además, Murriel y Eschenhagen (2025) proponen un enfoque multidimensional para abordar la contaminación atmosférica, considerando aparte de su dimensión física, sus implicancias políticas e incluso sociales. En su revisión del aporte de universidades peruanas, concluyen que aún existe una brecha significativa en la generación de conocimiento aplicado a la gestión ambiental local.

Por su parte, el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA, 2018) del Perú lo define como cualquier sustancia que se encuentra presente en el aire en cantidades superiores a su nivel normal, capaz de producir efectos medibles en personas, animales, vegetación o materiales. Esta definición técnica es clave para establecer criterios de evaluación en estudios como el tuyo, que busca analizar la dispersión espacio-temporal de contaminantes en función de variables meteorológicas.

### **2.2.2 $PM_{10}$**

Son las partículas sólidas o también líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, las cuales tienen un diámetro aerodinámico menor o igual a 10  $\mu\text{m}$ , las cuales son generadas por procesos industriales, emisiones vehiculares y resuspensión de polvo. Su inhalación puede causar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (US EPA, 2025).

### **2.2.3 $PM_{2.5}$**

Son partículas finas con diámetro menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$ , capaces de penetrar profundamente en los pulmones y llegar al torrente sanguíneo. Se originan principalmente en la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales. Representan un riesgo elevado para la salud humana (OMS, 2023).

El origen de  $PM_{2.5}$  incluye emisiones antropogénicas (combustión de combustibles, tráfico, industrias) además de procesos secundarios de formación como reacciones de gas-precursor (Óxidos de nitrógeno,  $\text{SO}_2$ ) en la atmósfera (Pen, 2025).

### **2.2.4 $\text{SO}_2$**

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es uno de los principales gases incoloros que es muy altamente reactivo, considerado uno de los principales precursores de material particulado y lluvia ácida. Químicamente, tiene la fórmula  $\text{SO}_2$  y es generado tanto por fuentes naturales (como volcanes y descomposición biológica) como antropogénicas, destacando principalmente los procesos industriales como fundiciones y la industria pesquera y portuaria de Chimbote así como también la quema de los combustibles fósiles (carbón, fuel oil) y. Una vez emitido, el  $\text{SO}_2$  puede oxidarse en la atmósfera para formar sulfatos secundarios, que contribuyen al material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ). Este proceso se intensifica bajo alta humedad relativa, temperatura elevada y baja dispersión térmica (Institute for Environmental Research and Education, 2025).

### **2.2.5 $\text{H}_2\text{S}$**

El sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) es uno de los gases incoloros que se caracteriza principalmente por ser inflamable, también es muy característico por su olor a huevo podrido. Se genera de forma natural en procesos anaeróbicos (como descomposición orgánica en suelos o cuerpos de agua) y es emitido por actividades industriales como refinerías, plantas de harina de pescado, vertederos y sistemas de aguas residuales (Batterman et al., 2023). En Chimbote,

las industrias pesqueras, plantas de tratamiento y tráfico marítimo representan fuentes potenciales de H<sub>2</sub>S, que se ven intensificadas con condiciones de baja ventilación y de estabilidad atmosférica.

## ***2.2.6 Fuentes de Contaminación Atmosférica***

### **1.1.1.1 Natural**

Emiten contaminantes sin la participación directa del ser humano, como resultado de procesos físicos, químicos o biológicos propios del medio ambiente. Estas emisiones contribuyen significativamente a la composición del aire y pueden afectar la calidad atmosférica local, regional y global (SINIA, 2018; US EPA, 2025).

#### ***1.1.1.1.1 Fuentes de Contaminación Natural***

##### **a) Volcanes**

Las erupciones volcánicas liberan grandes cantidades de gases como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y partículas finas que pueden dispersarse a nivel regional y global. Estas emisiones contribuyen a la formación de aerosoles sulfatados y lluvia ácida. A nivel global, las emisiones volcánicas de SO<sub>2</sub> alcanzan aproximadamente  $23 \pm 2$  Tg/año (Dozzo et al., 2025).

##### **b) Quemas naturales**

Los incendios forestales, originados por rayos o procesos naturales, emiten grandes cantidades de material particulado (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), también compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono (CO) y. Estos eventos son más frecuentes en temporadas secas y pueden llegar a tener afectación en la calidad del aire a cientos de kilómetros (Reyes Y. , 2025).

##### **c) Aerosoles marinos**

El oleaje y la evaporación generan partículas salinas (cloruro de sodio, magnesio, calcio) que forman parte del material particulado grueso (PM<sub>10</sub>) y fino (PM<sub>2.5</sub>). En zonas costeras, estas sales pueden representar entre el 6 % y el 40 % del PM<sub>2.5</sub> total (Xiaorui et al., 2024).

##### **d) Tormentas de arena**

En regiones áridas y semiáridas, el viento levanta polvo mineral que contiene sílice, metales y sales, contribuyendo al PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Estudios en Perú indican que el polvo del

desierto de Sechura representa entre el 13 % y el 26 % del sulfato en  $PM_{2.5}$  (Jianghanyang et al., 2021).

#### ***1.1.1.1.2 Origen Natural de los Contaminantes Atmosféricos***

##### **a) $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$**

El  $PM_{10}$  en zonas costeras peruanas se origina en parte por el levantamiento de polvo de suelo seco y desértico. Jianghanyang et al. (2021) identificaron que el polvo mineral del desierto de Sechura y áreas áridas adyacentes representa entre el 13 % y el 26 % del sulfato ( $PM_{2.5}$ ) en Arequipa, evidenciando los efectos que tiene en la calidad del aire a nivel regional.

Los aerosoles marinos son otra fuente natural clave. El spray marino generado por oleaje produce  $PM_{10}$  al transportar cloruro de sodio, magnesio y calcio; este efecto es más relevante en zonas costeras secas. Xiaorui et al. (2024) estimaron que estas sales pueden representar entre 6 % y 40 % del  $PM_{2.5}$  en regiones costeras peruanas y afectadas por la niebla (fenómeno frecuente en Chimbote por la corriente de Humboldt).

##### **b) $SO_2$**

El dióxido de azufre ( $SO_2$ ) es uno de los gases considerados incoloros, el cual se libera principalmente por procesos naturales como erupciones volcánicas y emanaciones geotérmicas. En la región andina del Perú, volcanes activos como Ubinas y Sabancaya son fuentes importantes de  $SO_2$ , que puede ser transportado por corrientes atmosféricas hacia zonas costeras bajo condiciones específicas de viento y estabilidad térmica. Según Dozzo et al. (2025), las emisiones volcánicas globales de  $SO_2$  alcanzan aproximadamente  $23 \pm 2$  Tg/año, y los volcanes peruanos contribuyen de manera significativa a este inventario.

##### **c) $NO_2$**

El dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) puede generarse de manera natural a través de distintos procesos atmosféricos y biogénicos. Durante tormentas eléctricas, los rayos producen óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) por la reacción entre nitrógeno y oxígeno a altas temperaturas, que posteriormente se transforman en  $NO_2$  (Opacka et al., 2025). Los suelos agrícolas y naturales liberan  $NO_x$  por descomposición de la materia orgánica y también por actividad microbiana, mientras que en zonas costeras la interacción entre materia orgánica y humedad también contribuye a su formación (Gao et al., 2025). En la atmósfera, el  $NO_2$  puede originarse mediante

reacciones fotoquímicas que involucran compuestos naturales como amoníaco y ozono, especialmente bajo condiciones de alta radiación solar.

### **1.1.1.2 Antropogénico**

Las fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica son aquellas originadas por actividades humanas que liberan contaminantes al aire, alterando su composición natural y afectando la calidad ambiental. Estas emisiones provienen principalmente de procesos industriales, transporte, generación de energía, agricultura y manejo inadecuado de residuos. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2025), los contaminantes más comunes contienen principalmente  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  y también los compuestos orgánicos volátiles (COV) e incluso los GEI (gases de efecto invernadero) como  $CO_2$  (US EPA, 2025; SINIA, 2018).

#### ***1.1.1.2.1 Origen Antropogénico de los Contaminantes Atmosféricos***

##### **a) $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$**

La presencia de vías sin pavimentar, operación de camiones, y movimiento de carga en puertos eleva la resuspensión de  $PM_{10}$ . Investigaciones en ciudades peruanas han reportado que la resuspensión contribuye entre 20 % y 35 % del  $PM_{10}$  urbano y las plantas pesqueras, fábricas de harina de pescado y terminales portuarias generan partículas gruesas y finas por procesos de secado, manejo de carga, spray marino mezclado con emisiones industriales, llegando a 25 %-30 % de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en áreas portuarias. La ignición de diésel y de la gasolina en los vehículos pesados, o de transporte público o incluso de maquinaria portuaria emite partículas ultrafinas ( $PM_{2.5}$ ) y grit, además del desgaste de frenos y neumáticos que genera  $PM_{10}$ . Estudios en Lima aplicando modelos PMF han identificado estas emisiones como el principal contribuyente (30 %-40 %) a partículas en suspensión (Ilizarbe et al., 2020).

##### **b) $SO_2$**

El dióxido de azufre ( $SO_2$ ) se emite mayormente por actividades humanas vinculadas al uso de combustibles fósiles y procesos de refinación. Las plantas termoeléctricas que utilizan carbón o petróleo y las fundiciones de metales, especialmente de cobre, son emisores notables de azufre. Además, la operación portuaria (incluyendo embarcaciones con diésel pesado y procesos de manipulación de combustibles) incrementa las emisiones de  $SO_2$ . Las plantas pesqueras, al emplear calderas con combustibles residuales, también contribuyen considerablemente. En estudios recientes con imágenes satelitales (Sentinel-5P) de ciudades

mineras como Abancay y La Oroya entre 2020 y 2023, se identificaron picos de  $\text{SO}_2$  de hasta  $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , principalmente asociados a fuentes industriales y tráfico pesado (Huacani et al., 2025).

**c)  $\text{NO}_2$**

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) se produce debido a la combustión de los combustibles fósiles en motores de los vehículos, embarcaciones y maquinaria pesada que operan en el puerto y en ciudad. En el proceso de combustión, el nitrógeno que se encuentra en el aire tiene una reacción con el oxígeno cuando se encuentra a elevadas temperaturas formando así los denominados óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los cuales posteriormente se convierten en  $\text{NO}_2$ . Las calderas industriales en plantas pesqueras también son una fuente importante, y el tráfico marítimo contribuye significativamente debido al uso de diésel pesado (Gudelj et al., 2023).

**2.2.7 Variables Meteorológicas y su Relación con los Contaminantes Atmosféricos**

Incluyen temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y radiación solar. Estas variables influyen en la dispersión y concentración de contaminantes.

**a) Temperatura**

Las elevadas temperaturas tiene efectos en la formación secundaria de contaminantes como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , y puede incrementar la volatilización de compuestos como  $\text{H}_2\text{S}$ . Sin embargo, temperaturas altas también generan mayor convección, reduciendo la acumulación de  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  (Pereira et al., 2022).

**b) Humedad Relativa**

Altos niveles de humedad facilitan la transformación química del  $\text{SO}_2$  en sulfatos y del  $\text{NO}_2$  en nitratos, aumentando la fracción fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ). También favorece la persistencia del  $\text{H}_2\text{S}$  en el aire. Por otro lado, la humedad puede reducir  $\text{PM}_{10}$  por deposición húmeda (Traven et al., 2023).

**c) Velocidad y Dirección del Viento**

Vientos fuertes dispersan  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , reduciendo su concentración local. En cambio, vientos débiles y direcciones constantes pueden acumular contaminantes en áreas urbanas cercanas al puerto (Arkian & Morey, 2024).

#### **d) Presión Atmosférica**

Alta presión genera estabilidad atmosférica, limitando la mezcla vertical y favoreciendo la acumulación de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y gases como SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Vongruang et al., 2024).

#### **e) Radiación Solar**

Incrementa las reacciones fotoquímicas, potenciando que se forme ozono y aerosoles secundarios esto en base de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. En días soleados y con baja ventilación, la concentración de PM<sub>2.5</sub> puede aumentar por procesos fotoquímicos (Xiao et al., 2025).

### ***2.2.8 Condiciones Portuarias y la Relación de Contaminantes***

Las condiciones portuarias, caracterizadas por operaciones de carga y descarga, tráfico marítimo y terrestre, uso de combustibles pesados y almacenamiento de insumos, son componentes importantes en el proceso de emisión de contaminantes atmosféricos. En áreas portuarias, el uso de diésel marino y combustibles residuales incrementa las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, mientras que la manipulación de carga y tránsito vehicular favorecen la generación y resuspensión de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Asimismo, la descomposición de materia orgánica en instalaciones pesqueras puede liberar H<sub>2</sub>S, especialmente en condiciones de baja ventilación. Estudios en puertos latinoamericanos han demostrado que estas actividades pueden elevar las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub> hasta en un 50 % respecto a zonas urbanas adyacentes, afectando la salud pública y la calidad del aire (Gurgatz et al., 2025; Nguyen et al., 2023).

### ***2.2.9 Contaminación Atmosférica y su Influencia en la Salud***

La salud humana se encuentra expuesta a riesgos ambientales como la contaminación atmosférica que es uno de los riesgos principales. La exposición prolongada a partículas como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> se asocia con enfermedades respiratorias crónicas, bronquitis, asma y aumento de la mortalidad cardiovascular. El PM<sub>2.5</sub>, por su particular diámetro muy fino, fácilmente puede llegar a ingresar en los pulmones y causando incluso que llegue a la sangre de las personas y terminar causando efectos sistémicos. Por su parte, gases como SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S provocan irritación ocular y respiratoria, exacerbación de enfermedades pulmonares y, en concentraciones elevadas, alteraciones neurológicas. Según la OMS, en el mundo anualmente se da más de 4 millones de muertes prematuras debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, datos en los que tiene influencia la contaminación del aire (OMS, 2023; Schraufnagel et al., 2018).

### 2.2.10 Métodos de Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos

La aplicación de métodos de monitoreo estandarizados es esencial para garantizar la confiabilidad y comparabilidad de los datos de calidad del aire, de acuerdo con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM y el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (DS N.º 010-2019-MINAM) establecen procedimientos específicos para cada contaminante, asegurando que las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S se determinen con precisión mediante técnicas como gravimetría y fluorescencia ultravioleta; en la tabla 1 se detalla estos métodos de acuerdo con los contaminantes atmosféricos que se está evaluando en el presente proyecto. Estos métodos permiten evaluar el cumplimiento de los estándares ambientales y analizar la relación entre variables meteorológicas y la dispersión de contaminantes, objetivo central de esta investigación.

**Tabla 1:** Métodos de medición según ECA 2017 y Protocolo Nacional 2019 del Ministerio del Ambiente

| Contaminante      | Método de medición (ECA 2017 / Protocolo 2019) | Unidad / Tiempo de muestreo | Tipo de muestreo             | Referencia normativa                          |
|-------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
| PM <sub>10</sub>  | Gravimétrico (alto volumen)                    | µg/m³ / 24 h                | Manual o automático continuo | DS N.º 003-2017-MINAM / DS N.º 010-2019-MINAM |
| PM <sub>2.5</sub> | Gravimétrico (bajo volumen)                    | µg/m³ / 24 h                | Manual o automático continuo |                                               |
| SO <sub>2</sub>   | Fluorescencia ultravioleta (UV)                | ppm / 1 h                   | Automático continuo          |                                               |
| H <sub>2</sub> S  | Potenciométrico colorimétrico                  | / ppm / 1 h                 | Automático portátil          |                                               |

*Nota: Elaboración propia con base al DS N.º 003-2017-MINAM y DS N.º 010-2019-MINAM.*

### 2.2.11 CBPF

La CPF o la denominada función de probabilidad condicional se empleó para estimar la probabilidad de que concentraciones elevadas de SO<sub>2</sub> provengan de direcciones específicas del viento. Este enfoque permite asociar la ocurrencia de concentraciones superiores a un umbral con intervalos de dirección de viento definidos ( $\Delta\theta$ ), facilitando la identificación de posibles fuentes dominantes (Begum et al., 2010; Carslaw y Ropkins, 2013; Uria-Tellaetxe y Carslaw, 2014). El CPF se define como:

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta} | C \geq x}{n_{\Delta\theta}}$$

donde  $m_{\Delta\theta}$  representa la cantidad de observaciones dentro del sector de viento  $\Delta\theta$ , cuya concentración  $C$  supera o iguala el valor umbral  $x$ , mientras que  $n_{\Delta\theta}$  corresponde al número total de mediciones registradas en ese mismo intervalo direccional. Posteriormente, se aplicó la probabilidad condicional bivariada de fuente (CBPF, Conditional Bivariate Probability Function), que incorpora simultáneamente la dirección y la velocidad del viento. Este método permite distinguir entre fuentes locales y regionales, al ponderar la probabilidad de superar el umbral de concentración en función de ambos parámetros meteorológicos (Carslaw *et al.*, 2013; Althuwaynee *et al.*, 2021; Masiol *et al.*, 2019). La CBPF se define como:

$$CBPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta, \Delta\mu} | C \geq x}{n_{\Delta\theta, \Delta\mu}}$$

donde  $m_{\Delta\theta, \Delta\mu}$  indica el número de observaciones dentro del sector de viento  $\Delta\theta$  y del intervalo de velocidad  $\Delta\mu$  en las que la concentración  $C$  excede el valor de referencia  $x$ , mientras que  $n_{\Delta\theta, \Delta\mu}$  representa el total de mediciones registradas en ese mismo rango de velocidad y dirección del viento. La CBPF se implementó mediante la función `polarPlot` del paquete `openair` en R (versión 4.3.2), empleando la opción estadística "`cpf`". Esta herramienta proporciona una visualización integrada de la distribución direccional y de intensidad del viento, mejorando la identificación espacial de las fuentes predominantes de  $SO_2$  en las ciudades evaluadas (Carslaw, 2021).

### 2.2.12 HYSPLIT

El modelo Hybrid Langrangian Single Particle Integrated Trajectory (Hysplit) (Stein *et al.*, 2015), del servicio Air Resources Laboratory (ARL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), es ampliamente usado para poder identificar trayectorias de vientos hacia adelante y hacia atrás desde un punto geográfico, estas trayectorias pueden calcularse cada 6 horas y a diversas alturas como 10, 500, 1000 m.s.n.m (Alvarez y Suarez, 2020; Yassin *et al.*, 2018), sobre la ubicación de cada estación (Salvador, 2005). El cálculo de las posiciones de una masa de aire en un intervalo de tiempo  $(t + \Delta t)$  se realiza por la advección media del viento, la cual determina la trayectoria que seguirá una partícula, lo que quiere decir que se calcula el vector de posición ( $P_{mean}$ ) a lo largo del tiempo empleando los promedios de los vectores de velocidad de forma tridimensional ( $V$ ) en las posiciones originales y de primera aproximación. La ecuación base para el cálculo de trayectorias se expresa en la ecuación (5) (Stein *et al.*, 2015), considerando el componente de advección.

$$\vec{P}_{mean}(t + \Delta t) =$$

$$\vec{P}_{mean}(t) + \frac{1}{2} \{ \vec{V}(\vec{P}_{mean}, t) + \vec{V}[(\vec{P}_{mean}(t) + (\vec{V}(\vec{P}_{mean}, t)\Delta t)), t + \Delta t] \} \Delta t \quad (5)$$

La base de archivos de datos para correr el modelo es de la Global NOAA-NCEP/NCAR y GDAS (Yassin *et al.*, 2018; Morera y Yasser, 2018).

### 2.3 Definiciones Conceptuales

- **HYSPLIT:** Modelo híbrido lagrangiano desarrollado por NOAA para simular trayectorias y dispersión de contaminantes atmosféricos.
- **CBPF:** Identifica fuentes probables de contaminación al estimar la probabilidad de excedencia de un contaminante en función conjunta de velocidad y dirección del viento, permitiendo distinguir aportes locales vs. regionales y visualizarse en gráficos polares.
- **PM<sub>10</sub>:** Partículas con diámetro  $\leq 10 \mu\text{m}$ , generadas por procesos industriales y transporte.
- **PM<sub>2.5</sub>:** Partículas finas  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ , asociadas a combustión y procesos industriales.
- **SO<sub>2</sub>:** Gas tóxico proveniente de combustión fósil y procesos industriales.
- **NO<sub>2</sub>:** Gas contaminante derivado de emisiones vehiculares e industriales.
- **Aerosoles:** Suspensión de partículas que podrían ser líquidas o incluso sólidas en el aire.
- **Aerosoles marinos:** Partículas generadas por la acción del oleaje y evaporación en zonas costeras.
- **Emisiones volcánicas:** Liberación de gases y partículas por actividad volcánica.
- **Smog:** Mezcla de contaminantes y niebla que reduce la visibilidad.
- **Nivel local:** Impacto de contaminantes en áreas reducidas.
- **Nivel urbano:** Efectos en ciudades con alta densidad poblacional.
- **Nivel regional:** Influencia en áreas amplias que abarcan varias ciudades.
- **Nivel transfronterizo:** Transporte de contaminantes entre países por corrientes atmosféricas.

### 2.4 Marco Legal

- Estándares de Calidad Ambiental – ECA Aire (DS N.º 003-2017-MINAM)
- Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Aire – 2019 (DS N.º 010-2019-MINAM).
- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM) – Derogado por DS N.º 003-2017-MINAM

- Guías de Calidad del Aire – Organización Mundial de la Salud (OMS) (Actualización 2021).

#### 2.4.1 Comparación de Estándares Internacionales y Nacionales de Calidad del Aire

La comparación de los valores límite establecidos por diferentes normativas internacionales permite contextualizar los estándares aplicados en Perú frente a referencias globales y regionales. El Estándar de Calidad Ambiental para Aire (DS N.º 003-2017-MINAM) define los niveles máximos permisibles para contaminantes como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, orientados a la protección de la salud pública. Por su parte, las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) recomiendan valores más estrictos basados en evidencia epidemiológica reciente. Asimismo, países como Chile y Brasil han establecido sus propios límites mediante normativas específicas, reflejando diferencias en criterios regulatorios y capacidades de gestión ambiental. La tabla 2 presenta un cuadro comparativo con los valores oficiales vigentes en cada normativa, lo que permite evaluar el grado de alineación y las brechas existentes entre estándares nacionales e internacionales.

**Tabla 2:** Cuadro comparativo: Valores límite en estándares de calidad del aire

| Contaminante      | Periodo  | Perú (DS N.º 003-2017-MINAM) | OMS (2021)     | Chile          | Brasil         |
|-------------------|----------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| PM <sub>2.5</sub> | 24 horas | 50 µg/m³                     | 15 µg/m³       | 50 µg/m³       | 60 µg/m³       |
| PM <sub>2.5</sub> | Anual    | 25 µg/m³                     | 5 µg/m³        | 20 µg/m³       | 20 µg/m³       |
| PM <sub>10</sub>  | 24 horas | 100 µg/m³                    | 45 µg/m³       | 150 µg/m³      | 120 µg/m³      |
| PM <sub>10</sub>  | Anual    | 50 µg/m³                     | 15 µg/m³       | 50 µg/m³       | 40 µg/m³       |
| SO <sub>2</sub>   | 24 horas | 250 µg/m³                    | 40 µg/m³       | 250 µg/m³      | 125 µg/m³      |
| H <sub>2</sub> S  | 24 horas | No establecido               | No establecido | No establecido | No establecido |

*Nota: Elaboración propia con base en el D.S. N.º 003-2017-MINAM (Perú), Directrices Mundiales sobre la Calidad del Aire de la OMS (2021), D.S. N.º 12/2011 y D.S. N.º 59/1998 (Chile), y Resolução CONAMA N.º 491/2018 (Brasil).*

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación

#### 3.1.1 Tipo y Nivel de Investigación

Según (Hernández et al., 2023), el tipo de investigación se clasifica en cuatro modalidades: exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa. El presente estudio fue de tipo correlacional, dado que evaluó la relación existente entre las concentraciones de contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas. Asimismo, el nivel de investigación fue descriptivo correlacional, debido a que se describieron las características y la variabilidad temporal de las variables meteorológicas y también de los contaminantes atmosféricos, así como la relación existente entre dichas variables sin manipulación experimental.

#### 3.1.2 Diseño y Enfoque de Investigación

Hernández *et al.* (2023) establecen que, en una investigación cuantitativa, un diseño puede clasificarse por el control de variables y el factor tiempo. El presente estudio se inscribe dentro de los diseños no experimentales correlacionales longitudinales:

- **No experimental:** no existió ningún tipo de manipulación en las variables; debido a que se evaluaron en su contexto natural.
- **Correlacional:** debido a que se buscó establecer correlaciones entre variables meteorológicas y contaminantes, sin establecer causalidad.
- **Longitudinal:** se recopilaron datos a lo largo del tiempo (2024–2025), que permitió analizar cambios estacionales y temporales.

### 3.2 Ubicación, Población, Muestra y Muestreo

#### 3.2.1 Ubicación Geográfica

La presente investigación se ha ejecutado en base a los datos de la estación de vigilancia ambiental de calidad de aire, denominada “Inca Garcilaso de la Vega”, que se encuentra ubicada en el distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Áncash, estación que pertenece a la red de monitoreo de calidad de aire del Perú, administrada por el OEFA (Organismo Evaluador y Fiscalizador Ambiental).

- **Ubicación Geográfica:**

**Ubicación del distrito de Chimbote**

---

|                 |            |                  |             |                 |            |
|-----------------|------------|------------------|-------------|-----------------|------------|
| <b>Latitud:</b> | 9°04'28" S | <b>Longitud:</b> | 78°35'37" O | <b>Altitud:</b> | 5 m.s.n.m. |
|-----------------|------------|------------------|-------------|-----------------|------------|

---

**Ubicación de la estación: “Inca Garcilaso de la Vega”**

---

|                 |            |                  |             |                 |            |                  |     |
|-----------------|------------|------------------|-------------|-----------------|------------|------------------|-----|
| <b>Latitud:</b> | 9°6'10.45" | <b>Longitud:</b> | 78°33'54.5" | <b>Altitud:</b> | 5 m.s.n.m. | <b>Código</b>    | CA- |
|                 | S          |                  | O           |                 |            | <b>de</b>        | CH- |
|                 |            |                  |             |                 |            | <b>Estación:</b> | 05  |

---

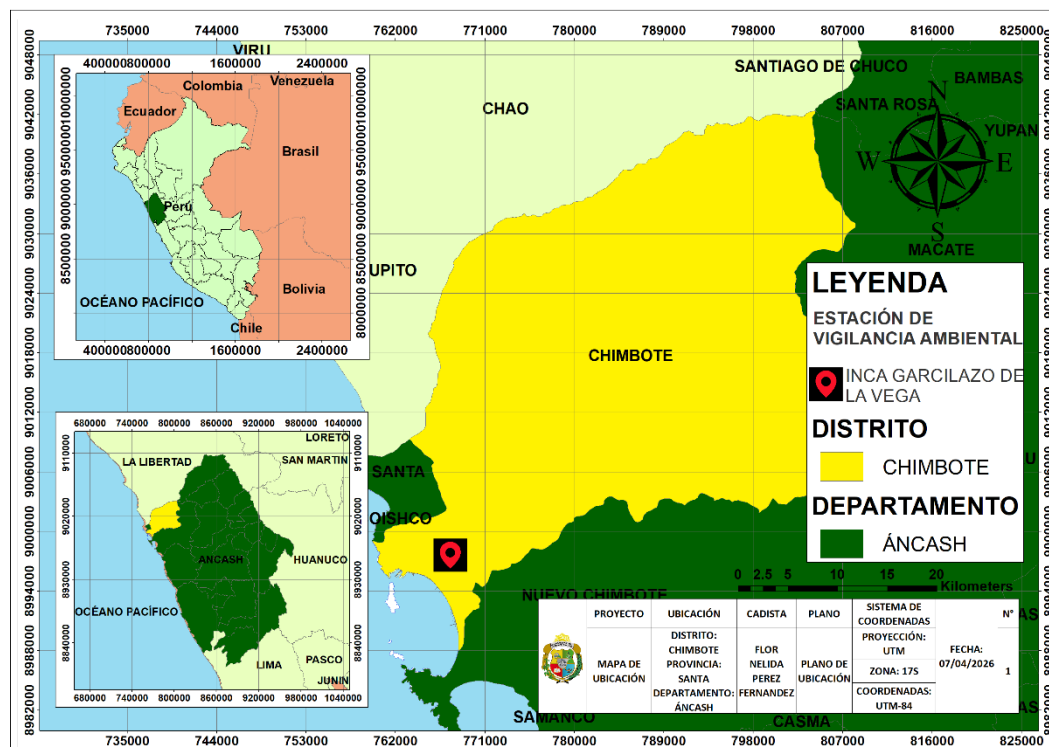
- **Ubicación Política:**

**Región:** Áncash

**Provincia:** Santa

**Distrito:** Chimbote

**Figura 1:** Ubicación geográfica de la Estación de Vigilancia Ambiental “Inca Garcilaso de la Vega”, distrito de Chimbote, Santa, Áncash



### 3.2.2 Población

La población estuvo constituida por las 40 Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire dentro de la Red Nacional de Vigilancia de la Calidad del Aire, información que se encuentra en el Portal Interactivo de Fiscalización Ambiental (PIFA), administradas por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). Estas estaciones forman parte del sistema nacional de monitoreo y permiten obtener datos continuos de variables meteorológicas y calidad del aire.

### 3.2.3 Muestra

Se ha tomado como criterio el protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de aire aprobado por el Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, el cual señala el número mínimo de estaciones de monitoreo de acuerdo a la población aledaña. Para el caso de Chimbote, en el último censo del año 2017 registra una población de 245,768 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática por lo que le corresponde tener una estación como mínimo (Tabla 3). La muestra estuvo constituida por la Estación de Monitoreo de Calidad del Aire denominada “Inca Garcilaso de la Vega”, ubicada en Chimbote, Santa, Áncash, de la cual se extrajeron los datos correspondientes a los años 2024 y 2025. La muestra fue seleccionada

mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la disponibilidad de información validada para el periodo de estudio. Asimismo, la elección de esta estación se sustenta en la importancia ambiental del distrito de Chimbote, debido a que concentra actividades industriales, pesqueras, portuarias y urbanas que la convierten en una zona prioritaria para el monitoreo y evaluación de la calidad del aire.

**Tabla 3:** Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad de aire en función de la población aledaña

| Población (miles de habitantes) | Número mínimo de estaciones de monitoreo |
|---------------------------------|------------------------------------------|
| 0 – 249                         | 1                                        |
| 250 – 749                       | 2                                        |
| 750 – 999                       | 3                                        |
| 1000 – 1499                     | 4                                        |
| 1500 – 1999                     | 5                                        |
| 2000 – 2749                     | 6                                        |
| 2750 – 3749                     | 7                                        |
| 3750 – 4749                     | 8                                        |
| 4750 – 5999                     | 9                                        |
| ≥ 6000                          | 10                                       |

*Nota: Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM. Directiva 2008/50/CE de la Comunidad Europea*

### 3.2.4 Muestreo

Hernández *et al.* (2023) indica que el muestreo se clasifica en probabilístico y no probabilístico. Para la ejecución del presente trabajo de investigación se aplicó un tipo de muestreo denominado no probabilístico por conveniencia, debido a que la selección de la estación responde a criterios específicos como la ubicación de la zona que cuenta con la influencia principalmente del puerto industrial de Chimbote, acceso a datos continuos y pertinencia para los objetivos del estudio.

## 3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

### 3.3.1 Técnicas de Recolección de Datos

Para la presente investigación se empleó como técnica la revisión documental, basada en el análisis de registros históricos de calidad del aire y variables meteorológicas.

Asimismo, se utilizó la técnica de extracción de datos provenientes del Portal Interactivo de Fiscalización Ambiental del Organismo de Evaluación y Fiscalización

Ambiental (OEFA), correspondientes a la estación de monitoreo de calidad del aire “Inca Garcilaso de la Vega”, ubicada en el distrito de Chimbote, para el periodo 2024–2025.

Adicionalmente, se emplearon datos meteorológicos del sistema de Reanalysis desarrollados por la NOAA Air Resources Laboratory, utilizados para el análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT.

Finalmente, se aplicó la técnica de validación de datos, mediante la verificación de consistencia, identificación de valores atípicos (outliers) y detección de posibles errores de medición, siguiendo criterios establecidos en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire.

### ***3.3.2 Instrumentos de Recolección de Datos***

De acuerdo con el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM), la estación de monitoreo “Inca Garcilaso de la Vega”, ubicada en el distrito de Chimbote, cumple con los criterios técnicos establecidos para garantizar la calidad, representatividad y comparabilidad de los datos.

La estación cuenta con los siguientes equipos e instrumentos:

- **Caseta meteorológica:** estructura diseñada para proteger los equipos de medición frente a condiciones ambientales externas, como la radiación solar directa y precipitaciones, instalada en terreno nivelado y libre de obstrucciones.
- **Sensores meteorológicos:**
  - Termo-higrómetro, que se encuentra instalado a 1.2 m por encima del nivel del suelo, para la medición de T° y humedad relativa.
  - Anemómetro y veleta, instalados a 10 m de altura, que se encarga de medir tanto la dirección como la velocidad del viento.
  - Sensor de radiación solar, instalado en un área sin interferencias de sombra.
- **Analizadores automáticos de contaminantes atmosféricos:**
  - PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>: mediante métodos gravimétricos y sistemas de medición continua.
  - SO<sub>2</sub>: mediante el método de fluorescencia ultravioleta.
  - H<sub>2</sub>S: mediante sensores electroquímicos.

- **Sistemas de calibración y mantenimiento:** los equipos son calibrados anualmente, utilizando gases patrón certificados con una precisión de  $\pm 2$  %. Los datos obtenidos son transmitidos y almacenados en el portal del OEFA para su acceso y análisis.

### 3.4 Hipótesis

**Ha1:** Existe una relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, así como patrones de origen local y regional identificados mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.

**Ho1:** No existe relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, ni se identifican patrones de origen mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.

### 3.5 Operacionalización de Variables

Este proceso de operacionalización permite definir de manera precisa la forma en que serán medidos los indicadores de cada variable del estudio, facilitando su análisis cuantitativo. En la Tabla 4 se presentan las variables dependientes así como también las independientes, y sus adecuados indicadores, unidades de medida e instrumentos de medición utilizados, garantizando la validez y confiabilidad de la información.

**Tabla 4:** Operacionalización de Variables

| Variables      | Dimensiones          | Indicador                                           | Unidad de medida | Técnicas e instrumentos       |
|----------------|----------------------|-----------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Independientes | Temperatura          | - Temperaturas máximas                              | °C               | Sensor de temperatura         |
|                |                      | - Temperaturas mínimas                              |                  |                               |
|                | Humedad              | - Humedad relativa máxima                           | %                | Sensor de humedad             |
|                |                      | - Humedad relativa mínima                           |                  |                               |
|                | Velocidad del viento | - Calma (< 1.39m/s).                                | m/s              | Sensor de velocidad de viento |
|                |                      | - Flojo (1.7-5.6m/s).<br>- Moderados (5.8-11.1m/s). |                  |                               |

|               |                                                                                                                         |                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                   |                                           |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|
|               |                                                                                                                         |                                               | - Fuertes (11.4-19.4m/s).<br>- Muy fuertes (19.7-33.3m/s).<br>- Huracanados (>33.3m/s)                                                                                                                                                                                    |                   |                                           |
|               |                                                                                                                         |                                               | - Norte (N de 337.5°-22.5 °).<br>- Noreste (NE de 22.5°-67.5°).<br>- Este (E de 67.5°-112.5°)<br>- Sureste (SE de 112.5°-157.5°).<br>- Sur (S de 157.5°-202.5°).<br>- Suroeste (SW de 202.5°-247.5°).<br>- Oeste (W de 247.5°-292.5°)<br>- Noroeste (NW de 292.5°-337.5°) | Grados (°)        | Sensor de dirección de viento             |
| Dependientes: | Concentración de Contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) | PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub>          | Concentraciones máximas y mínimas                                                                                                                                                                                                                                         | µg/m <sup>3</sup> | Analizador automático de partículas       |
|               |                                                                                                                         | H <sub>2</sub> S                              | Concentraciones máximas y mínimas                                                                                                                                                                                                                                         | µg/m <sup>3</sup> | Analizador automático de H <sub>2</sub> S |
|               |                                                                                                                         | SO <sub>2</sub>                               | Concentraciones máximas y mínimas                                                                                                                                                                                                                                         | µg/m <sup>3</sup> | Analizador automático de SO <sub>2</sub>  |
|               |                                                                                                                         | Altura: 10 m<br>Horas: 48 h<br>Intervalo: 6 h | Trayectorias de masas de aire                                                                                                                                                                                                                                             | % clusteres       | HYSPLIT, openair                          |
|               | Origen de fuente                                                                                                        | Porcentaje (%)                                | Probabilidad de origen                                                                                                                                                                                                                                                    | Adimensional      | CBPF, openair                             |

### 3.6 Procedimiento de Recolección de Datos

Para la recolección de datos se siguió un procedimiento sistemático que permitió garantizar la trazabilidad, calidad y consistencia de la información utilizada en la investigación.

En primer lugar, se accedió al Portal Interactivo de Fiscalización Ambiental – PIFA (<https://pifa.oefa.gob.pe/VigilanciaAmbiental/>) del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), donde se ubica la estación de monitoreo de calidad del aire “Inca Garcilaso de la Vega”, localizada en el distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Áncash.

Posteriormente, se realizó la descarga de los datos históricos correspondientes a los años 2024 y 2025, seleccionando las variables de interés: PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, con frecuencia horaria.

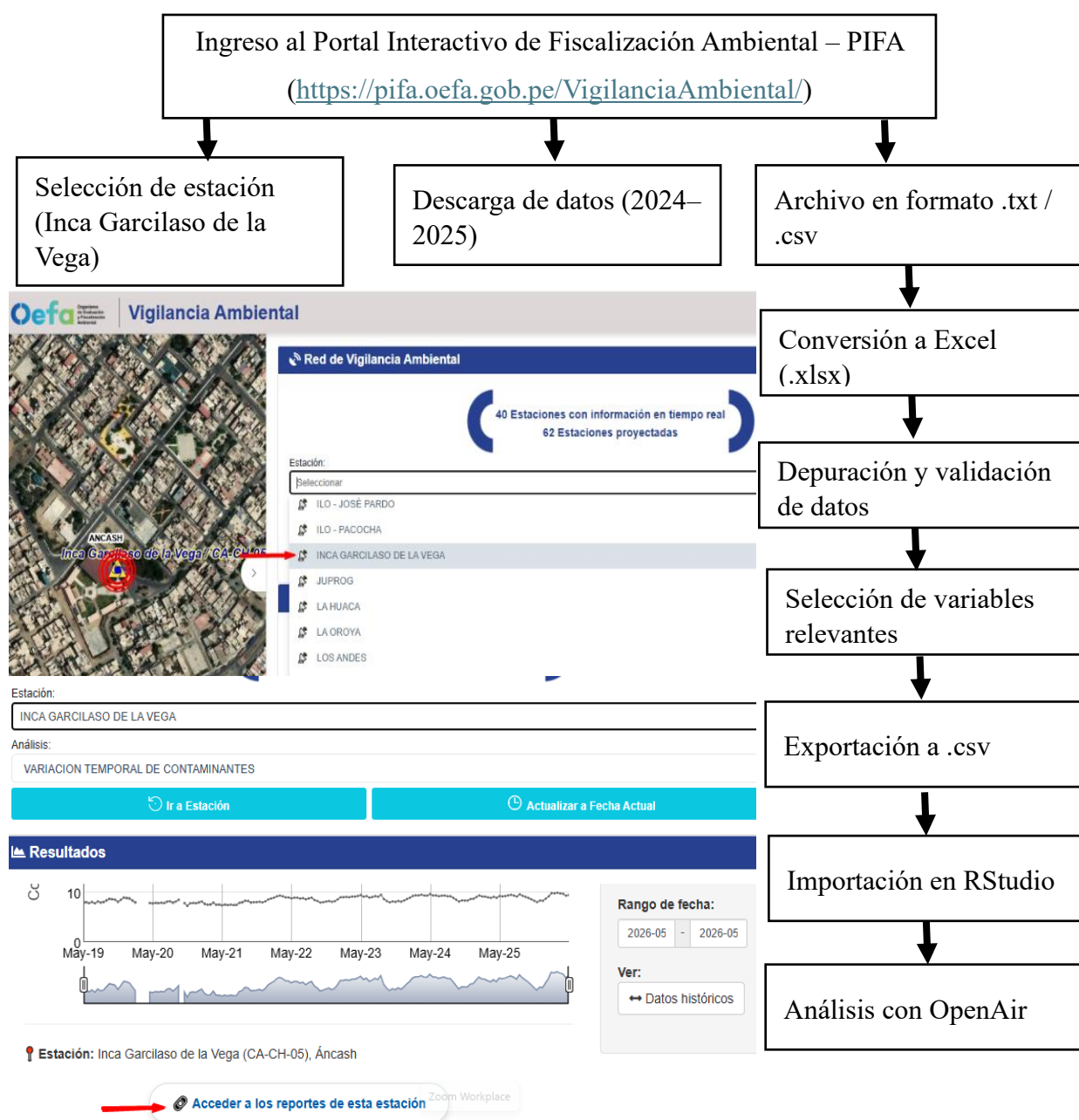
Los datos descargados inicialmente en formato texto fueron organizados y convertidos a formato de hoja de cálculo (Excel), para facilitar su revisión y procesamiento. Durante esta etapa se llevó a cabo la depuración de la base de datos, corrigiendo formatos de fecha y verificando la consistencia de las variables.

Asimismo, se realizó la validación de los datos mediante la identificación de valores atípicos (outliers) y posibles errores de medición, siguiendo los lineamientos establecidos en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (D.S. N.º 010-2019-MINAM).

Finalmente, la base de datos depurada fue exportada en formato CSV e importada al software RStudio, donde se desarrollaron los análisis estadísticos y gráficos mediante el paquete OpenAir.

El procedimiento completo de obtención y procesamiento de datos se presenta de manera esquemática en la figura 2.

**Figura 2: Procedimiento de recolección de datos**



### 3.7 Procedimiento de Análisis de Datos

Este procedimiento de análisis se hizo mediante el software RStudio, utilizando el paquete especializado OpenAir, el cual permite el procesamiento, análisis y visualización de datos tanto de la calidad del aire como también de las condiciones meteorológicas.

#### 3.7.1 Análisis descriptivo

Se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa,

velocidad y dirección del viento). Para ello, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, tales como media, mediana, valores mínimos, máximos y desviación estándar.

Asimismo, se elaboraron histogramas y diagramas de caja con el propósito de identificar cómo se distribuyen los datos y también identificar si existe valores atípicos, para posteriormente realizar la comparación descriptiva del PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S con la normativa nacional e internacional.

### ***3.7.2 Análisis de la variación temporal***

La variación temporal de contaminantes atmosféricos tales como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S fue evaluada mediante herramientas gráficas del paquete OpenAir en RStudio, utilizando las funciones timePlot y timeVariation. Este análisis permitió examinar el comportamiento de las concentraciones en diferentes patrones temporales tales como horarios, mensuales y semanales de los contaminantes, complementándose el análisis estacional mediante estadísticas descriptivas y gráficos comparativos por estación.

Adicionalmente, se generaron rosas de viento mediante la función windRose, lo que permitió caracterizar el comportamiento tanto de la dirección y también de la velocidad del viento en el área de estudio.

### ***3.7.3 Análisis de correlación***

Para este análisis se procesaron los datos en Microsoft Excel. Estos datos se guardaron en formato CSV y se cargaron en el software RStudio. Posteriormente, se empleó el paquete openair y sus extensiones complementarias (lattice, latticeExtra, RColorBrewer) para conocer la relación de correlación, así mismo se generó gráficos que permiten visualizar la relación que existe entre los contaminantes y las condiciones meteorológicas.

**Paso 1:** En primer lugar, la normalidad fue evaluada mediante la prueba de Shapiro-Wilk para muestras pequeñas ( $n < 50$ ) y mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov para muestras grandes ( $n \geq 50$ ) utilizando el software RStudio. Para ello se considerará dos grupos de variables: (a) variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura) y (b) contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S). Las hipótesis fueron:

Variable 1: Para variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, humedad y temperatura):

- **H<sub>0</sub> (hipótesis nula o de contrastación)**

Los datos analizados con relación a las variables meteorológicas siguen una distribución normal.

- **H<sub>1</sub> (hipótesis alternativa)**

Los datos analizados con relación a las variables meteorológicas no siguen una distribución normal.

Variable 2: Para contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S):

- **H<sub>0</sub> (hipótesis nula o de contrastación)**

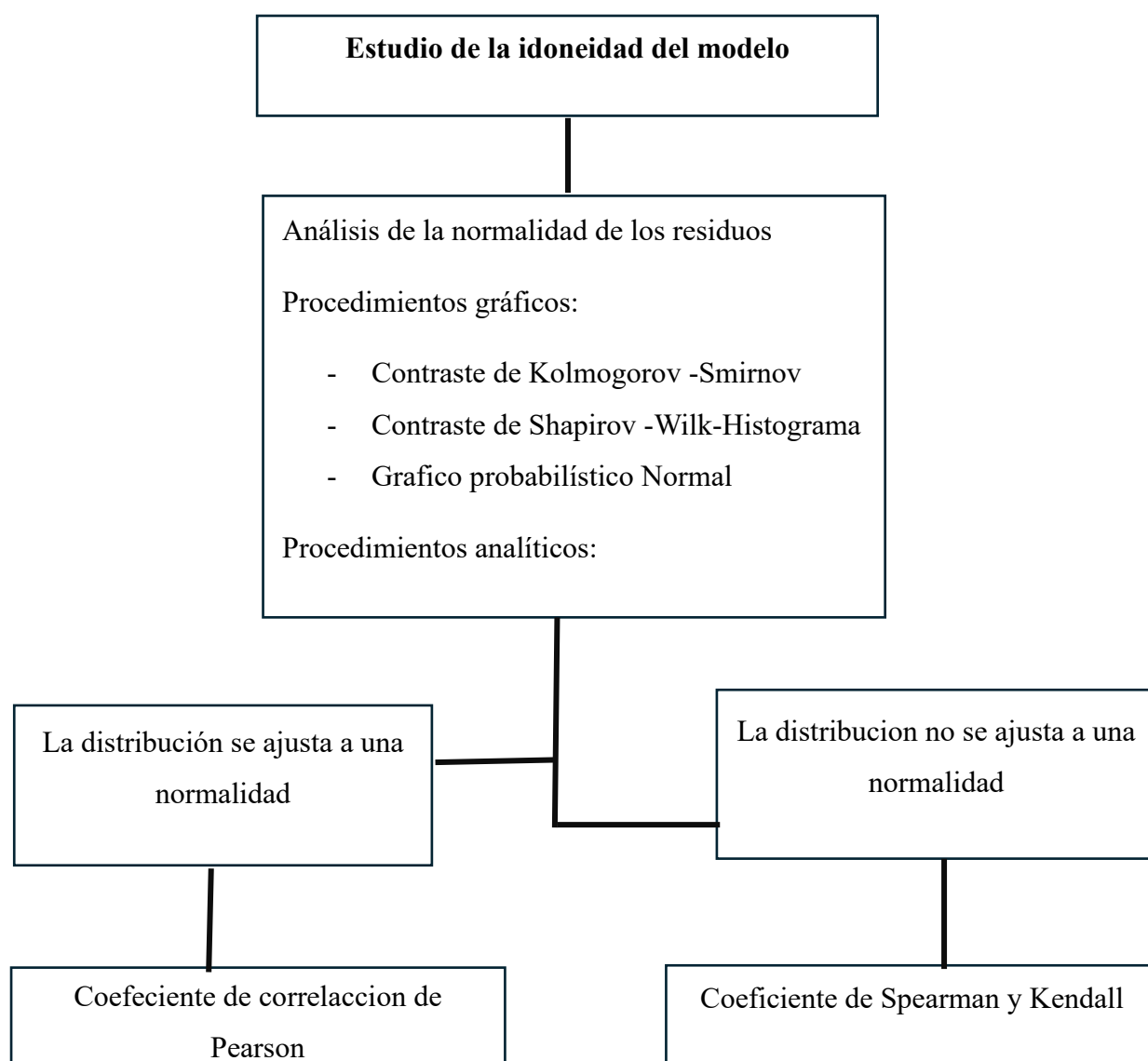
Los datos analizados con relación a los contaminantes atmosféricos siguen una distribución normal.

- **H<sub>1</sub> (hipótesis alternativa)**

Los datos analizados con relación a los contaminantes atmosféricos no siguen una distribución normal.

**Paso 2:** Si los datos cumplieran el supuesto de normalidad, se consideraría el coeficiente de correlación de Pearson. Sin embargo, se empleó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman para evaluar la relación entre las variables, siguiendo la secuencia metodológica representada en el flujograma. Este procedimiento permitió garantizar la validez estadística en la evaluación de la relación entre las variables.

**Figura 3:** Flujograma para las pruebas estadísticas de la idoneidad del modelo



**Paso 3: Para el análisis de la relación de la variable 1 y 2 (diseño estadístico).** Se evaluó la normalidad de los datos y no se ajustaron a una distribución normal, por lo tanto se aplicó pruebas estadísticas no paramétricas, rechazando la hipótesis nula. Se utilizaron los coeficientes de rangos ordenados de Spearman para el análisis correlacional y la generación de gráficos mediante el software RStudio. Una vez obtenido el coeficiente de correlación, se procedió a comprobar la hipótesis bajo los siguientes supuestos:

**H<sub>0</sub> (hipótesis nula o de contrastación)**

No existe relación de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos

(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, así como patrones de origen local y regional identificados mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.

### **H<sub>1</sub> (hipótesis alternativa o de investigación)**

Existe relación de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, así como patrones de origen local y regional identificados mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.

La significancia estadística se estableció en p:

- Se rechazará la hipótesis nula si  $p < 0.05$ .
- Se aceptará la hipótesis nula si  $p \geq 0.05$ .

El valor del coeficiente de correlación se interpretó según el rango:

- +1 = Perfecta positiva
- -1 = Perfecta negativa
- 0 = Correlación nula
- $R = \pm 0.01$  a  $\pm 0.19$ : Muy baja
- $\pm 0.20$  a  $\pm 0.39$ : Baja
- $\pm 0.40$  a  $\pm 0.69$ : Moderada
- $\pm 0.70$  a  $\pm 0.89$ : Alta
- $\pm 0.90$  a  $\pm 0.99$ : Muy alta

### **3.7.4 Análisis de fuentes mediante CBPF**

Para el proceso de identificación de posibles fuentes locales que emiten contaminantes, se aplicó el modelo Conditional Bivariate Probability Function (CBPF), utilizando la función *polarPlot* del paquete OpenAir. Se consideró el percentil 75 de las concentraciones, lo cual permitió la evaluación de la existencia de alguna probabilidad de ocurrencia de niveles elevados en función de la velocidad y dirección del viento. Para analizar de forma local y geográfica como los contaminantes se distribuyeron y dispersaron en relación a la dirección y la velocidad del viento, con los siguientes criterios, probabilidad muy baja (0 a 0.2), probabilidad baja (0.2 a 0.4), probabilidad moderada (0.4 – 0.6), probabilidad alta (0.6 a 0.8) y probabilidad muy alta (0.8 a 1) (Squizzato, 2017).

### **3.7.5 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire (HYSPLIT)**

Se empleó el Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – HYSPLIT), desarrollado por la NOAA Air Resources Laboratory, el cual combina enfoques Lagrangiano (seguimiento de partículas) y Euleriano (cálculo en grillas) para simular el transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos. El análisis se realizó utilizando datos meteorológicos archivados del conjunto REANALYSIS (Global 1948–present) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) y del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), con una resolución espacial de 1°. Se generaron retrotrayectorias para 48 horas (2 días hacia atrás), a intervalos de 6 horas y a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL), tomando como punto de inicio las coordenadas de la estación “Inca Garcilaso de la Vega” en Chimbote. El procedimiento incluyó la selección de episodios críticos con concentraciones máximas de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, la generación de retrotrayectorias mediante la interfaz web de HYSPLIT, para la elaboración gráfica de retrotrayectorias de masas de aire, buscando fuentes regionales que aportan a la concentración de los contaminantes. Las retrotrayectorias fueron interpretadas de manera descriptiva para identificar las principales direcciones de procedencia y los posibles corredores de transporte atmosférico asociados a los episodios críticos y periodos estacionales evaluados.

### **3.8 Materiales y Equipos**

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon los siguientes materiales, equipos y herramientas tecnológicas:

#### **3.8.1 Equipos de cómputo:**

- **Computadora portátil (laptop):** se utilizó para el almacén, proceso de datos, ejecución de análisis estadísticos y redacción del documento de investigación.

#### **3.8.2 Software**

- **RStudio:** software empleado para realizar análisis estadístico y también el modelamiento de datos de la calidad del aire.
- **Paquete OpenAir (R):** se utilizó para analizar, procesar y visualizar datos meteorológicos y de contaminantes atmosféricos.
- **Microsoft Excel:** herramienta utilizada para la organización, depuración y verificación preliminar de los datos.

- **HYSPLIT** (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory): modelo empleado para la generación de retrotrayectorias y el análisis del transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos.

### **3.8.3 Fuentes de datos**

- **Portal Interactivo de Fiscalización Ambiental (OEFA)**: plataforma oficial utilizada para la obtención de los datos detallados de las condiciones meteorológicas y los datos de calidad del aire y correspondientes a la estación “Inca Garcilaso de la Vega”.

### **3.8.4 Normativa técnica**

- **Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (D.S. N.º 010-2019-MINAM)**: documento utilizado como referencia para la validación y aseguramiento de la calidad de los datos.

## **3.9 Aspectos Éticos**

El presente trabajo de investigación fue desarrollado de acuerdo con los principios de integridad científica, transparencia y responsabilidad en el uso de la información, conforme a la normativa ambiental que se encuentra vigente.

Se garantizó el uso adecuado de la información provenientes de la estación “Inca Garcilaso de la Vega”, los cuales fueron empleados exclusivamente con fines académicos, sin manipulación ni alteración que pudiera comprometer su veracidad o confiabilidad. Asimismo, se aseguró la trazabilidad del estudio mediante la documentación detallada de cada periodo del proceso, iniciando en la recolección llegando hasta el análisis de los datos.

Se respetaron las fuentes de información utilizadas, citando correctamente la normativa aplicable, como el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM) y el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM), garantizando el reconocimiento de los marcos regulatorios.

La investigación se basó exclusivamente en el análisis de información secundaria, por lo que no implicó intervención directa en la estación de monitoreo ni afectación al entorno. Asimismo, los resultados fueron presentados de manera objetiva, evitando sesgos o interpretaciones no sustentadas.

Finalmente, se promovió el cumplimiento de los principios de ética académica, evitando prácticas como el plagio, la falsificación o la manipulación de datos, asegurando que

los resultados contribuyan de manera responsable al conocimiento científico y a la mejora de la gestión ambiental así como también una adecuada defensa de la salud pública.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Determinación de la concentración de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S durante el periodo 2024 y 2025

#### 4.1.1 Concentraciones trimestrales y estacionales de contaminantes atmosféricos para el año 2024

##### a) Trimestrales

En la tabla 5 se presentan las concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

**Tabla 5:** Concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Parámetro                            | Unidad            | Media | Desv. Est. | Máx.   | Mín. | Mediana |
|--------------------------------------|-------------------|-------|------------|--------|------|---------|
| <b>Enero-Marzo</b>                   |                   |       |            |        |      |         |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 25.82 | 23.30      | 299.87 | 7.22 | 20.75   |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 17.70 | 21.93      | 289.35 | 6.13 | 13.31   |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 8.77  | 1.75       | 30.18  | 6.18 | 8.59    |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 11.04 | 7.62       | 68.25  | 4.64 | 8.34    |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.67  | 0.12       | 0.98   | 0.29 | 0.69    |
| <b>Abril-Junio</b>                   |                   |       |            |        |      |         |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 20.04 | 10.01      | 100.97 | 4.42 | 17.81   |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 15.31 | 7.00       | 66.56  | 3.53 | 13.96   |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 37.73 | 66.60      | 571.42 | 6.03 | 12.83   |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 13.85 | 10.75      | 118.61 | 3.86 | 10.11   |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.79  | 0.11       | 1.00   | 0.30 | 0.79    |
| <b>Julio-Setiembre</b>               |                   |       |            |        |      |         |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 19.37 | 8.09       | 91.03  | 4.61 | 17.75   |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 15.32 | 5.99       | 46.77  | 3.58 | 14.22   |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 6.58  | 1.29       | 15.82  | 5.14 | 6.10    |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 7.13  | 3.42       | 39.55  | 4.23 | 6.34    |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.80  | 0.09       | 0.97   | 0.25 | 0.80    |
| <b>Octubre-Diciembre</b>             |                   |       |            |        |      |         |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 18.16 | 7.57       | 144.11 | 5.62 | 16.87   |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 15.02 | 6.50       | 140.66 | 4.72 | 13.93   |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 42.43 | 80.33      | 861.69 | 4.82 | 11.87   |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 11.82 | 9.03       | 72.64  | 3.82 | 8.52    |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.84  | 0.09       | 0.99   | 0.44 | 0.85    |

Se observa que el PM<sub>10</sub> presenta su mayor concentración en el periodo enero–marzo (25.82 µg/m<sup>3</sup>), evidenciando una disminución progresiva hacia los trimestres posteriores, lo que sugiere la influencia de condiciones ambientales variables y posibles fuentes de emisión durante el inicio del año. Asimismo, se registran valores máximos elevados, alcanzando hasta 299.87 µg/m<sup>3</sup>, lo cual indica la ocurrencia de episodios críticos de material particulado.

En el caso del PM<sub>2.5</sub>, se observa un comportamiento relativamente estable, teniendo concentraciones promedio que van desde los 15.02 y 17.70 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, los altos valores máximos y la desviación estándar registrada en el primer trimestre evidencian la presencia de eventos puntuales de contaminación.

Por su parte, el SO<sub>2</sub> presenta una alta variabilidad temporal, con incrementos significativos en los periodos abril–junio (37.73 µg/m<sup>3</sup>) y octubre–diciembre (42.43 µg/m<sup>3</sup>), alcanzando valores máximos de hasta 861.69 µg/m<sup>3</sup>. Este comportamiento evidencia la ocurrencia de episodios puntuales de contaminación atmosférica asociados a fuentes emisoras específicas que se encuentran en la zona de estudio.

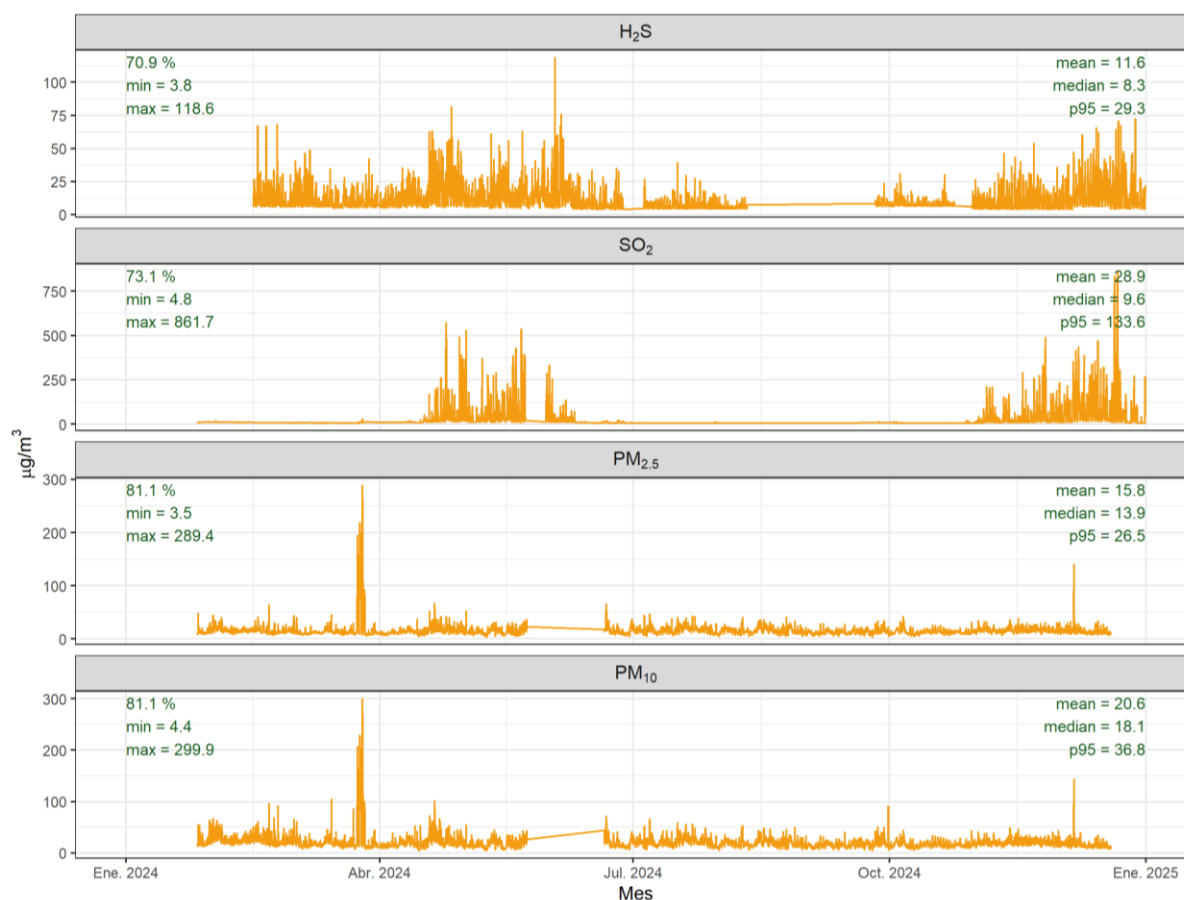
En relación al H<sub>2</sub>S, se observan concentraciones moderadas, con mayor presencia en el segundo trimestre (13.85 µg/m<sup>3</sup>) y disminución en el tercer trimestre. Este comportamiento podría estar asociado a la presencia de fuentes emisoras locales y a las condiciones ambientales predominantes durante el segundo trimestre.

Finalmente, el análisis del cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> muestra un incremento progresivo de 0.67 a 0.84 a lo largo del año, lo que indica mayor cantidad de material particulado fino, asociado a procesos de combustión y fuentes antrópicas en el área de estudio.

En la figura 4 la serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en Chimbote en el año 2024.

Se observa que las concentraciones de los contaminantes presentan un comportamiento altamente variable a lo largo del tiempo, evidenciándose la presencia de episodios de incremento en determinados periodos del año.

**Figura 4:** Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024



En el caso del  $SO_2$ , se identifica un comportamiento marcadamente irregular caracterizado por periodos prolongados de bajas concentraciones interrumpidos por episodios de incremento abrupto, con valores cercanos a niveles bajos durante gran parte del año, pero con la presencia de picos extremos que superan ampliamente los valores promedio. Este patrón sugiere la ocurrencia de eventos puntuales de emisión, posiblemente asociados a actividades industriales específicas en la zona de estudio.

En relación con el  $PM_{2.5}$ , se observa una tendencia relativamente estable en comparación con el  $SO_2$ , aunque se evidencian incrementos significativos en ciertos periodos, indicando que existe episodios de contaminación asociados a procesos de combustión o acumulación de partículas finas bajo determinadas condiciones atmosféricas.

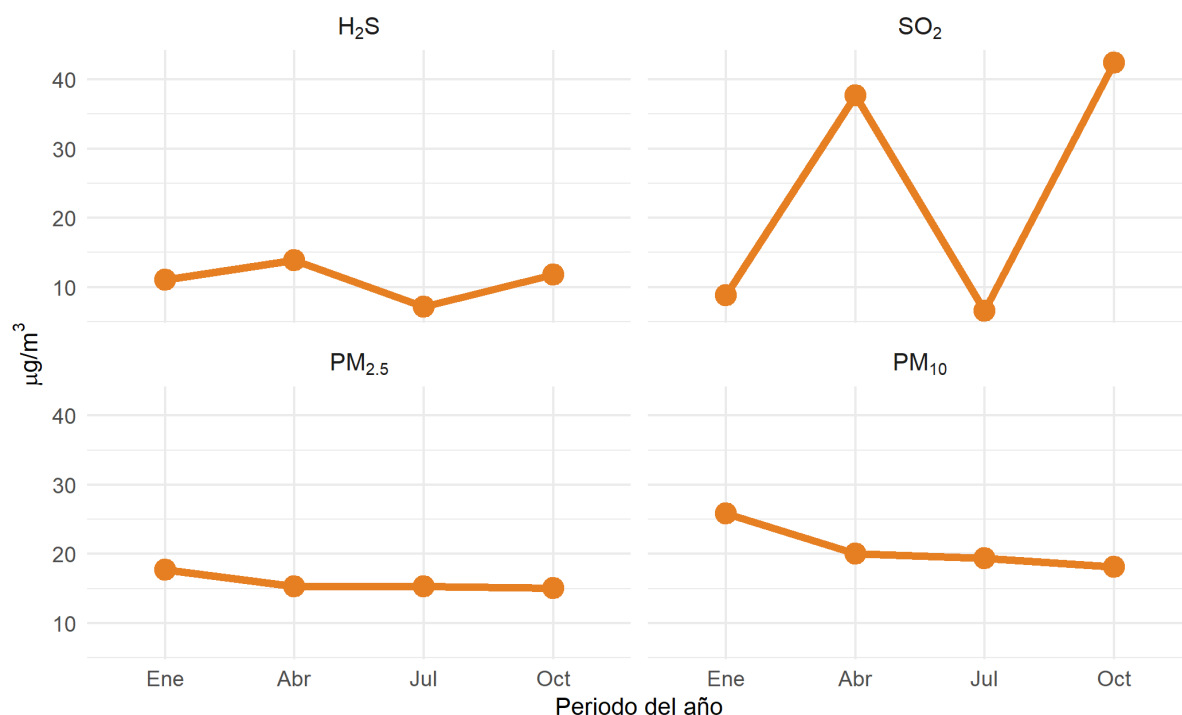
Por su parte, el  $PM_{10}$  presenta una mayor variabilidad y concentraciones superiores al  $PM_{2.5}$ , lo que indica la presencia de material particulado grueso, asociado a procesos de resuspensión de polvo, actividades industriales o fuentes antrópicas locales.

En cuanto al  $\text{H}_2\text{S}$ , se observa una variabilidad moderada con incrementos en determinados periodos del año, lo que sugiere la influencia de fuentes locales de carácter orgánico o industrial.

En conjunto, los resultados evidencian que la calidad del aire en el distrito de Chimbote durante el año 2024 se caracteriza por una alta variabilidad temporal, influenciada tanto por fuentes emisoras como por condiciones ambientales que favorecen la acumulación o dispersión de los contaminantes.

La variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos se detalla en la figura 5. Se observa que el  $\text{PM}_{10}$  presenta una disminución progresiva de las concentraciones medias trimestrales, pasando de  $25.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en enero-marzo a  $18.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en octubre-diciembre, mientras que el  $\text{PM}_{2.5}$  mantiene un comportamiento relativamente estable. Por su parte, el  $\text{SO}_2$  muestra importantes incrementos en los periodos abril-junio y octubre-diciembre, lo que sugiere la ocurrencia de emisiones puntuales de origen industrial. En tanto, el  $\text{H}_2\text{S}$  presenta variaciones moderadas con una disminución en el tercer trimestre. En conjunto, los resultados evidencian variaciones temporales entre los contaminantes, asociadas a modificaciones en las condiciones ambientales y en las fuentes emisoras.

**Figura 5:** Variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024



## b) Estacionales

Las concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2024, se ven reflejados en la tabla 6.

Se observa que las concentraciones de los contaminantes presentan variaciones a lo largo de las estaciones del año. En el caso del  $PM_{10}$ , se identifican mayores concentraciones durante verano (22.57  $\mu g/m^3$ ) y otoño (22.16  $\mu g/m^3$ ), disminuyendo progresivamente hacia invierno y primavera, lo que evidencia una disminución gradual de las concentraciones medias a lo largo del año y una posible influencia de factores meteorológicos y fuentes emisoras con comportamiento estacional.

**Tabla 6:** Concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Parámetro           | Unidad      | Media | Desv. Est. | Máx.   | Mín. | Mediana |
|---------------------|-------------|-------|------------|--------|------|---------|
| <b>Verano</b>       |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 22.57 | 11.03      | 144.11 | 7.64 | 20.31   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 15.44 | 7.43       | 140.66 | 6.82 | 13.97   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 42.07 | 86.04      | 861.69 | 4.82 | 10.56   |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 14.81 | 11.33      | 72.64  | 3.95 | 10.92   |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.72  | 0.16       | 0.99   | 0.30 | 0.70    |
| <b>Otoño</b>        |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 22.16 | 21.29      | 299.87 | 4.42 | 17.72   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 16.86 | 19.79      | 289.35 | 3.53 | 13.01   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 34.78 | 65.94      | 571.42 | 6.18 | 10.38   |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 13.28 | 9.36       | 81.77  | 4.64 | 9.76    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.76  | 0.12       | 1.00   | 0.29 | 0.76    |
| <b>Invierno</b>     |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 20.63 | 8.60       | 71.42  | 5.03 | 18.97   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 16.38 | 6.75       | 65.25  | 3.96 | 14.93   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 11.78 | 18.99      | 254.74 | 5.14 | 6.92    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 8.97  | 8.32       | 118.61 | 3.86 | 6.59    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.80  | 0.08       | 0.97   | 0.41 | 0.80    |
| <b>Primavera</b>    |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 17.98 | 6.63       | 91.03  | 4.61 | 16.88   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 14.43 | 4.90       | 42.12  | 3.58 | 13.67   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 21.89 | 42.67      | 488.53 | 5.61 | 7.91    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 9.44  | 5.52       | 53.88  | 3.82 | 7.77    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.81  | 0.09       | 0.99   | 0.25 | 0.83    |

Por su parte, el  $PM_{2.5}$  muestra un comportamiento relativamente estable entre las estaciones, con valores ligeramente mayores en otoño ( $16.86 \mu g/m^3$ ) e invierno ( $16.38 \mu g/m^3$ ), lo que indicaría la presencia de contaminación de fondo asociada a partículas finas, lo que evidenciaría la presencia de una fracción fina del material particulado con variaciones relativamente reducidas entre estaciones.

En cuanto al  $SO_2$ , se evidencia una alta variabilidad estacional, registrándose las mayores concentraciones en verano ( $42.07 \mu g/m^3$ ) y otoño ( $34.78 \mu g/m^3$ ), con valores máximos extremadamente elevados que alcanzan hasta  $861.69 \mu g/m^3$ . Este comportamiento sugiere la presencia de la ocurrencia de episodios puntuales asociados a fuentes emisoras específicas que se encuentran en el área que se estudia.

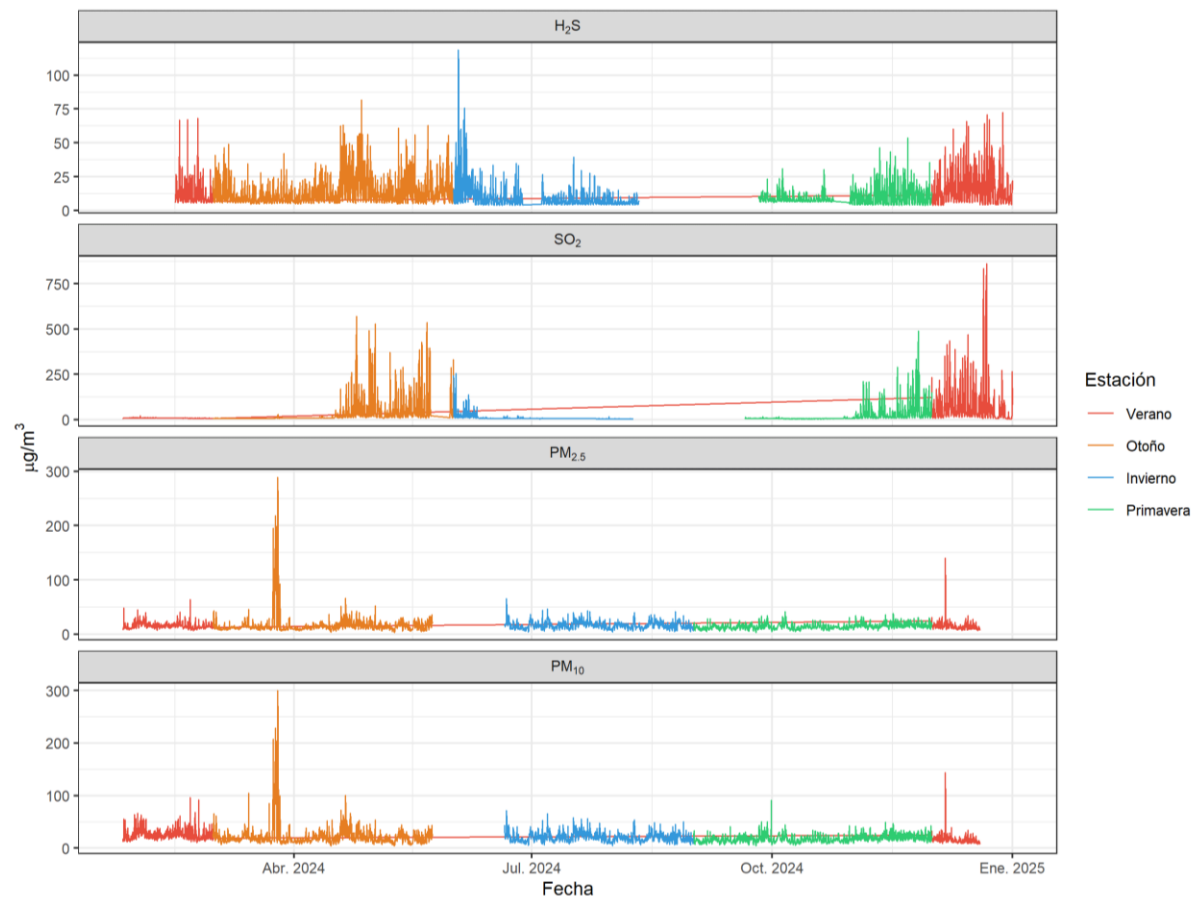
En relación al  $\text{H}_2\text{S}$ , se observan concentraciones moderadas con mayores valores en verano ( $14.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y una disminución en invierno ( $8.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo que podría estar asociado a la variabilidad de la influencia de fuentes emisoras locales y de condiciones ambientales variables entre estaciones.

Asimismo, el cociente  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  presenta un incremento progresivo desde verano (0.72) hasta primavera (0.81), lo que indica una mayor proporción de partículas finas en las estaciones finales del año, sugiriendo cambios en las fuentes emisoras o en las condiciones atmosféricas que favorecen la permanencia de partículas más pequeñas.

De manera general, se muestran en los resultados que la calidad del aire en el distrito de Chimbote se encuentra influenciada por factores estacionales, los cuales determinan la dinámica de emisión, dispersión y acumulación de los diferentes contaminantes a nivel de la atmósfera.

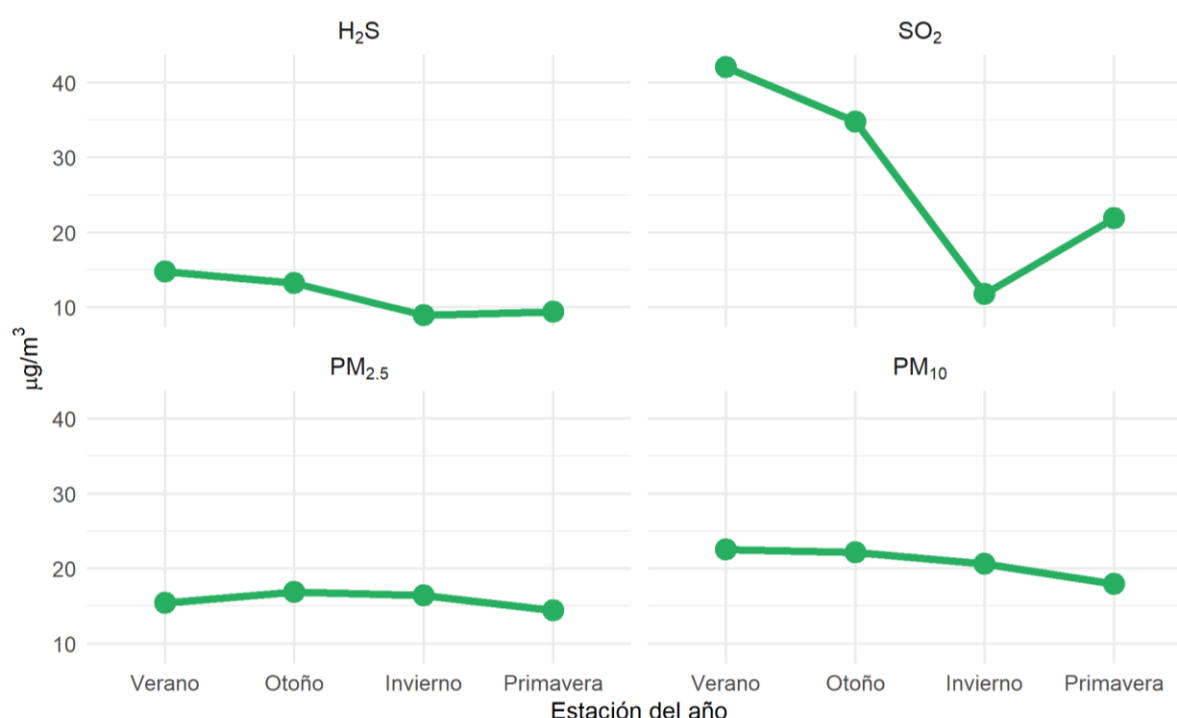
En la figura 6 se presenta la serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos diferenciada por estaciones en el distrito de Chimbote durante el año 2024. Se observa que la variabilidad de los contaminantes presenta patrones diferenciados según la estación, evidenciándose mayores niveles y episodios críticos principalmente durante verano, otoño y primavera, especialmente para el  $\text{SO}_2$ . En particular, el  $\text{SO}_2$  registra picos extremos en estas estaciones, lo que sugiere la presencia de episodios puntuales asociados a fuentes emisoras específicas. Por su parte, el  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  muestran incrementos asociados a eventos específicos, con mayor intensidad en otoño, mientras que durante invierno se observa una menor variabilidad en la mayoría de los contaminantes. En tanto, el  $\text{H}_2\text{S}$  presenta mayores concentraciones en verano y una disminución durante invierno. En conjunto, los resultados evidencian que las condiciones estacionales tienen influencia significativa en la dinámica temporal de la calidad del aire en la zona de estudio.

**Figura 6:** Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  diferenciada por estación en el distrito de Chimbote durante el año 2024



En la figura 7 se presenta la variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2024. El  $PM_{10}$  presenta una tendencia decreciente desde verano hacia primavera, mientras que el  $PM_{2.5}$  mantiene un comportamiento relativamente estable con ligeras variaciones. Por su parte, el  $SO_2$  muestra una marcada variabilidad estacional, con valores elevados en verano y otoño y una disminución significativa en invierno, lo que sugiere la presencia de emisiones puntuales de origen industrial. En tanto, el  $H_2S$  presenta mayores concentraciones en verano y una reducción hacia invierno, evidenciando la influencia de fuentes locales. En conjunto, los resultados reflejan la influencia de las condiciones estacionales en la dinámica de los contaminantes atmosféricos.

**Figura 7:** Variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024



### c) Variaciones de las concentraciones promedio de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ ( $\mu g / m^3$ ) en diferentes escalas de tiempo para el año 2024

En la figura 8 se presenta la variación temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

A nivel horario, se observa que ambos contaminantes presentan un patrón bien definido a lo largo del día, con incrementos en las iniciales horas de la mañana y en la noche, mientras que se registra una disminución hacia el mediodía. Este comportamiento sugiere la influencia de actividades antropogénicas y a la vez también condiciones atmosféricas que ayudan a la dispersión de los contaminantes durante las horas centrales del día.

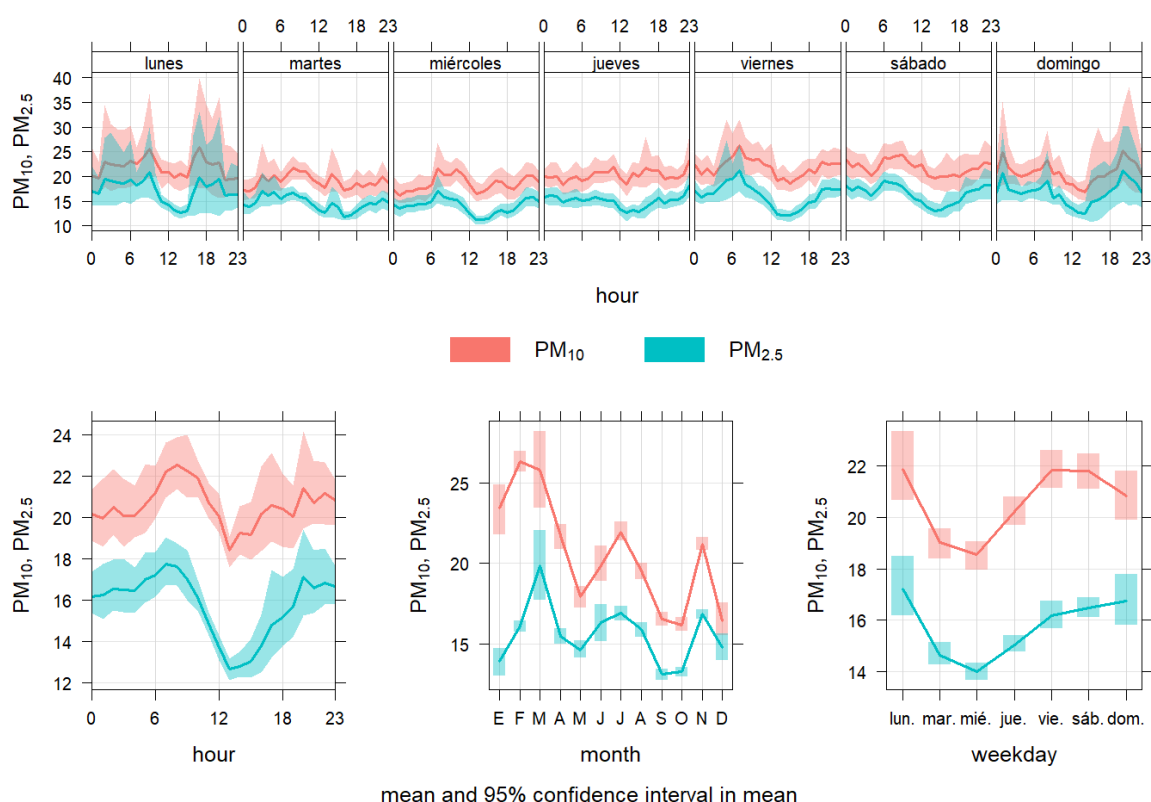
Asimismo, al analizar la variación por días de la semana, se observan diferencias moderadas entre los distintos días, registrándose concentraciones ligeramente mayores durante algunos días laborables y hacia el final de la semana, lo que podría reflejar cambios temporales en las actividades desarrolladas en la zona de estudio.

En cuanto a la variación mensual, se identifican fluctuaciones a lo largo del año, con mayores concentraciones en los primeros meses y una disminución hacia los meses

intermedios, lo que muestra la influencia que tiene los factores estacionales y condiciones meteorológicas en la dinámica de los contaminantes.

En todos los casos, se observa que el  $PM_{10}$  presenta concentraciones superiores al  $PM_{2.5}$ ; sin embargo, ambos contaminantes muestran patrones temporales similares, lo que evidencia un comportamiento temporal similar entre ambos contaminantes.

**Figura 8:** Variación temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024



En conjunto, estos resultados evidencian que la variabilidad temporal de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el distrito de Chimbote se encuentra influenciada por patrones horarios, semanales y mensuales, reflejando la interacción que existe entre las actividades desarrolladas en el área de estudio y las condiciones meteorológicas que favorecen su dispersión o acumulación en la atmósfera.

#### **d) Variaciones de las concentraciones promedio de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (µg / m<sup>3</sup> ) en diferentes escalas de tiempo para el año 2024**

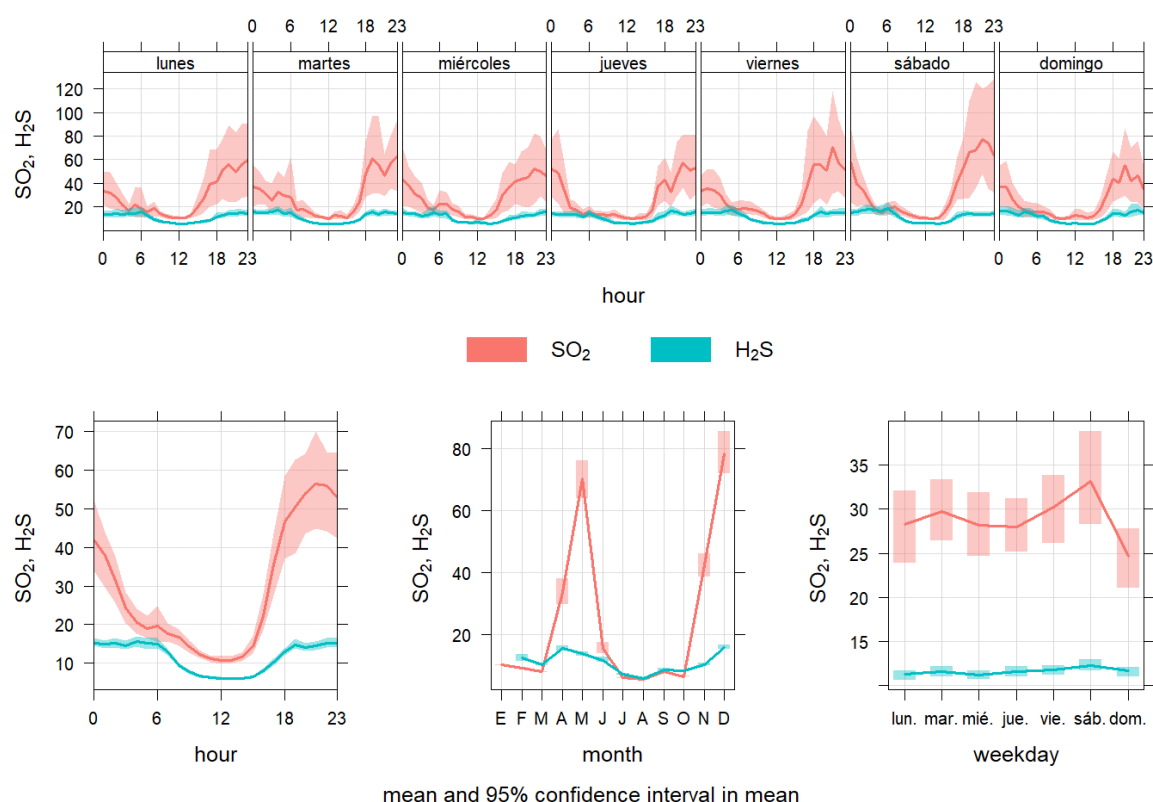
En la figura 9 se presenta la variación temporal de las concentraciones de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

A nivel horario, el SO<sub>2</sub> muestra incrementos pronunciados durante determinadas horas del día, especialmente en la tarde y noche, evidenciando picos de concentración que varían entre los días de la semana. Este comportamiento sugiere la presencia de emisiones puntuales asociadas a fuentes emisoras específicas que se encuentran en la zona de estudio. En contraste, el H<sub>2</sub>S muestra un comportamiento más estable a lo largo del día, con variaciones moderadas y una ligera disminución hacia las horas centrales, indicando la influencia de fuentes de emisión más continuas.

En la variación mensual, el SO<sub>2</sub> presenta una alta variabilidad, con incrementos marcados en determinados meses, lo que refuerza su carácter episódico. Por su parte, el H<sub>2</sub>S mantiene una tendencia más uniforme a lo largo del año, con variaciones menos abruptas.

En cuanto a la variación semanal, ambos contaminantes presentan diferencias relativamente moderadas entre los distintos días. El SO<sub>2</sub> registra valores ligeramente superiores hacia el final de la semana, mientras que el H<sub>2</sub>S mantiene un comportamiento relativamente estable durante todo el periodo analizado.

**Figura 9:** Variación temporal de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2024



Los resultados evidencian que los contaminantes gaseosos presentan un comportamiento diferente al del material particulado, destacando el carácter altamente variable y episódico del  $\text{SO}_2$  frente al comportamiento más estable del  $\text{H}_2\text{S}$ , lo que sugiere la influencia de distintas fuentes emisoras y condiciones ambientales.

#### e) Variaciones de las concentraciones promedio anual de $\text{PM}_{10}$ , $\text{PM}_{2.5}$ , $\text{SO}_2$ y $\text{H}_2\text{S}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en diferentes escalas de tiempo para el año 2024

En la tabla 7 se presenta la estadística descriptiva de las concentraciones anuales de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , así como del cociente  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024. Se observa que el  $\text{PM}_{10}$  registró una concentración media de  $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el  $\text{PM}_{2.5}$  alcanzó una media de  $15.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ambos contaminantes presentan valores de media y mediana similares, lo que evidencia una variabilidad moderada de las concentraciones promedio registradas durante el periodo de estudio.

El  $\text{SO}_2$  mostró la mayor variabilidad entre los contaminantes evaluados, registrando una desviación estándar de  $26.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y valores comprendidos entre  $5.49$  y  $78.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

reflejando la ocurrencia de episodios de concentraciones elevadas en determinados meses. En contraste, el H<sub>2</sub>S mostró una distribución más estable, con una media de 10.98 µg/m<sup>3</sup> y una desviación estándar de 3.30 µg/m<sup>3</sup>.

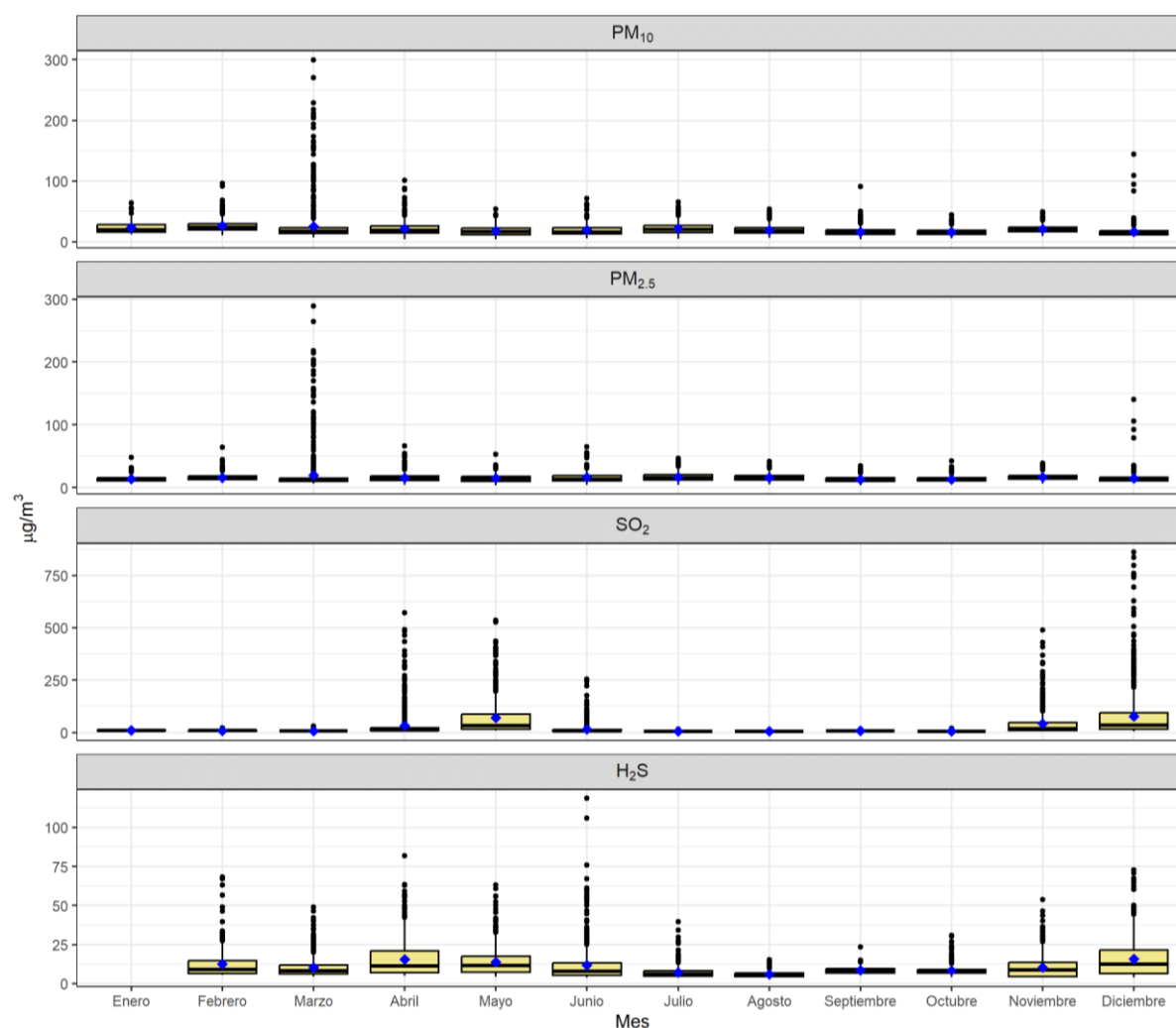
Asimismo, el cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> presentó una media anual de 0.77, indicando que aproximadamente el 77 % del material particulado respirable estuvo constituido por partículas finas. Este resultado evidencia una contribución importante del PM<sub>2.5</sub> al material particulado total registrado durante el año 2024.

**Tabla 7:** Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y del cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Parámetro                            | Unidad            | Media | Desv.Est. | Mín.  | Q1    | Mediana | Q3    | Máx   |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 20.57 | 3.48      | 16.18 | 17.57 | 20.54   | 22.31 | 26.3  |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 15.60 | 1.87      | 13.12 | 14.46 | 15.68   | 16.45 | 19.87 |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 24.48 | 26.03     | 5.49  | 7.63  | 9.79    | 35.84 | 78.18 |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 10.98 | 3.3       | 5.95  | 8.56  | 10.38   | 13.17 | 15.91 |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.77  | 0.09      | 0.59  | 0.76  | 0.79    | 0.82  | 0.9   |

Con el propósito de evaluar la distribución mensual de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2024, se elaboraron diagramas de caja y bigotes para PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

**Figura 10:** Diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2024



En la figura 10 se muestran los diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de dichos contaminantes, los cuales permiten evaluar su distribución, variabilidad y presencia de valores atípicos a lo largo del periodo de estudio.

El  $PM_{10}$  y el  $PM_{2.5}$  presentan una distribución relativamente homogénea durante la mayor parte del año, con medianas y rangos intercuartílicos de amplitud moderada. Sin embargo, ambos contaminantes muestran una mayor dispersión y presencia de valores atípicos durante marzo, evidenciando la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones. En general, el  $PM_{10}$  registra valores superiores al  $PM_{2.5}$ , aunque ambos mantienen un comportamiento temporal similar.

En el caso del  $SO_2$ , se identifica la mayor variabilidad entre los contaminantes evaluados, observándose amplios rangos intercuartílicos y numerosos valores atípicos,

especialmente durante abril, mayo, noviembre y diciembre. Estos resultados coinciden con la elevada desviación estándar obtenida en la tabla 7 y reflejan la ocurrencia de episodios de altas concentraciones reflejando la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones durante determinados periodos del año

Por su parte, el H<sub>2</sub>S presenta una distribución más uniforme y una menor dispersión en comparación con el SO<sub>2</sub>, aunque se observan incrementos y valores atípicos en meses como abril, junio y diciembre. Este comportamiento sugiere la influencia de fuentes de emisión relativamente constantes, con episodios ocasionales de aumento en la concentración.

En conjunto, los diagramas de caja y bigotes corroboran las diferencias en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos evaluados, destacando la estabilidad relativa del material particulado y del H<sub>2</sub>S frente al comportamiento más variable y episódico del SO<sub>2</sub>, lo que permite comprender de manera integral la dinámica de la calidad del aire en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

#### **4.1.2 Concentraciones trimestrales y estacionales de contaminantes atmosféricos para el año 2025**

##### **a) Trimestrales**

En la tabla 8 se presentan las concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

**Tabla 8:** Concentraciones trimestrales de los contaminantes atmosféricos PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Unidad</b>     | <b>Media</b> | <b>Desv. Est.</b> | <b>Máx.</b> | <b>Mín.</b> | <b>Mediana</b> |
|--------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|----------------|
| <b>Enero-Marzo</b>                   |                   |              |                   |             |             |                |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 16.49        | 9.29              | 104.71      | 3.29        | 14.96          |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 12.97        | 7.27              | 102.74      | 2.78        | 11.36          |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 17.08        | 46.44             | 525.96      | 1.81        | 3.28           |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 14.00        | 10.89             | 75.30       | 4.02        | 10.09          |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.81         | 0.13              | 1.00        | 0.33        | 0.81           |
| <b>Abril-Junio</b>                   |                   |              |                   |             |             |                |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 13.09        | 5.29              | 98.65       | 2.35        | 12.44          |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 12.03        | 4.73              | 98.39       | 2.26        | 11.68          |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 27.08        | 50.82             | 402.07      | 1.86        | 8.98           |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 7.54         | 7.79              | 114.33      | 1.60        | 5.02           |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.93         | 0.09              | 1.00        | 0.53        | 0.97           |
| <b>Julio-Setiembre</b>               |                   |              |                   |             |             |                |

|                                      |                   |       |       |        |      |       |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------|--------|------|-------|
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 12.92 | 5.48  | 69.97  | 2.17 | 12.07 |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 11.40 | 4.64  | 66.47  | 1.88 | 10.69 |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 8.59  | 9.44  | 154.13 | 5.87 | 7.00  |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 5.20  | 4.88  | 75.87  | 1.83 | 3.98  |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.89  | 0.08  | 1.00   | 0.43 | 0.90  |
| <b>Octubre-Diciembre</b>             |                   |       |       |        |      |       |
| PM <sub>10</sub>                     | µg/m <sup>3</sup> | 13.31 | 6.22  | 100.70 | 3.08 | 12.57 |
| PM <sub>2.5</sub>                    | µg/m <sup>3</sup> | 11.37 | 5.43  | 96.62  | 2.84 | 10.75 |
| SO <sub>2</sub>                      | µg/m <sup>3</sup> | 22.41 | 43.08 | 491.98 | 6.73 | 8.31  |
| H <sub>2</sub> S                     | µg/m <sup>3</sup> | 7.86  | 7.23  | 105.93 | 2.81 | 5.33  |
| PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub> | ratio             | 0.87  | 0.09  | 1.00   | 0.33 | 0.89  |

Se observa que el PM<sub>10</sub> presenta su mayor concentración promedio durante el periodo enero–marzo (16.49 µg/m<sup>3</sup>), mostrando una disminución progresiva en los trimestres siguientes y una ligera recuperación durante octubre–diciembre (13.31 µg/m<sup>3</sup>). Asimismo, se registran valores máximos de hasta 104.71 µg/m<sup>3</sup> durante el primer trimestre, lo que evidencia la ocurrencia de episodios puntuales de incremento del material particulado.

En el caso del PM<sub>2.5</sub>, se observa un comportamiento relativamente estable a lo largo del año, con concentraciones promedio comprendidas entre 11.37 y 12.97 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, los valores máximos registrados durante los distintos trimestres, alcanzando hasta 102.74 µg/m<sup>3</sup> en enero–marzo, evidencian la presencia de eventos específicos de contaminación atmosférica.

Por su parte, el SO<sub>2</sub> presenta una marcada variabilidad temporal, registrando su mayor concentración promedio en el periodo abril–junio (27.08 µg/m<sup>3</sup>), seguido de octubre–diciembre (22.41 µg/m<sup>3</sup>). Asimismo, se observan valores máximos elevados que alcanzan hasta 525.96 µg/m<sup>3</sup> en el primer trimestre, lo que sugiere la ocurrencia de episodios asociados a fuentes de emisión puntuales, lo que evidencia la ocurrencia de episodios asociados a fuentes emisoras puntuales que se encuentran en el área de estudio.

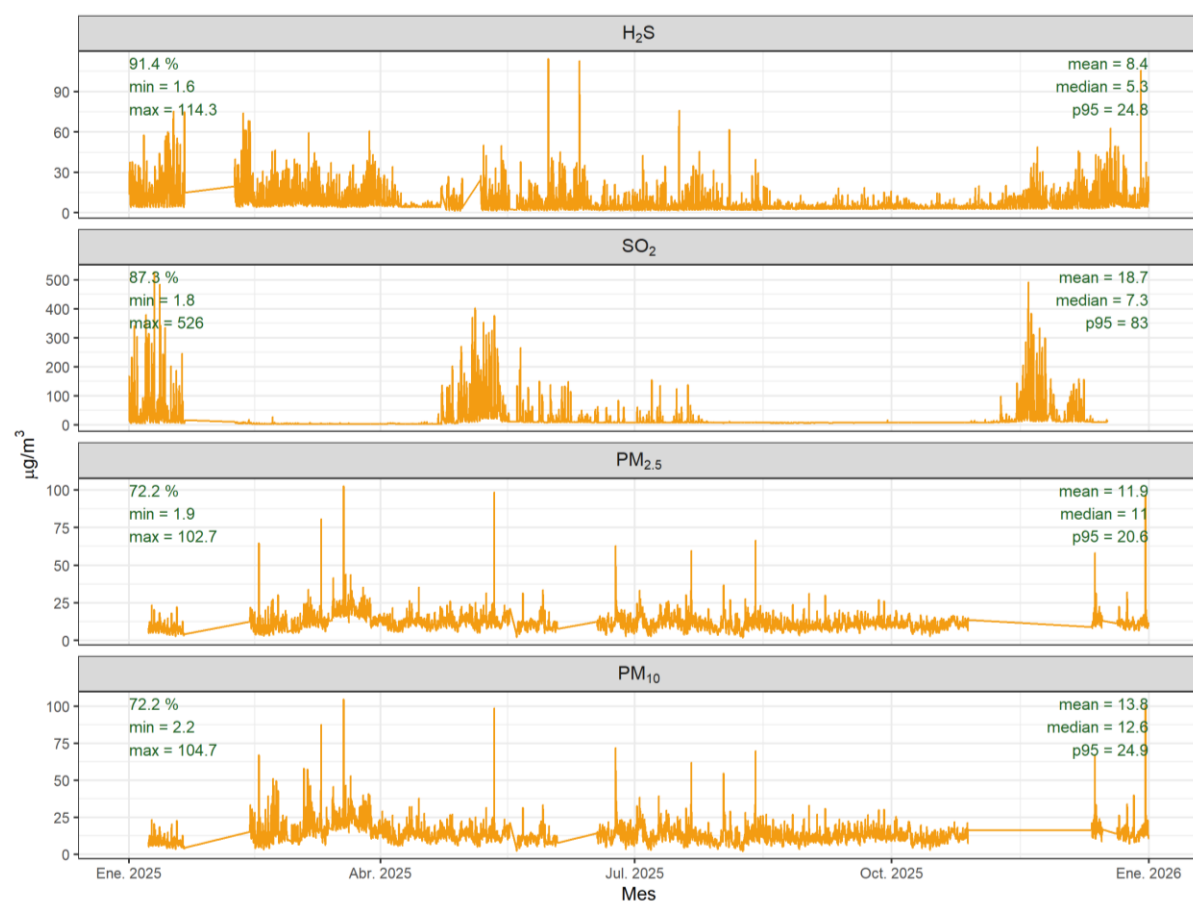
En relación con el H<sub>2</sub>S, se observan concentraciones moderadas durante la mayor parte del año, con valores promedio de 14.00 µg/m<sup>3</sup> durante enero–marzo y una disminución progresiva hasta alcanzar su menor concentración en julio–septiembre (5.20 µg/m<sup>3</sup>). Este comportamiento podría estar asociado a variaciones temporales asociadas a cambios estacionales y a las condiciones ambientales predominantes durante el periodo evaluado.

Finalmente, el análisis del cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> muestra valores elevados durante todos los trimestres, oscilando entre 0.81 y 0.93. Estos resultados indican que una proporción

importante del material particulado estuvo constituida por partículas finas, indicando que una proporción importante del material particulado estuvo constituida por partículas finas durante todo el año.

En la figura 11 se presenta la serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

**Figura 11:** Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote durante el año 2025



Se observa que las concentraciones de los contaminantes presentan una marcada variabilidad temporal a lo largo del año, evidenciándose episodios de incremento en determinados periodos y diferencias importantes entre los contaminantes evaluados.

En el caso del SO<sub>2</sub>, se identifica un comportamiento altamente irregular, caracterizado por largos periodos con concentraciones relativamente bajas y la presencia de picos extremos que alcanzan valores superiores a 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos eventos se registran principalmente durante los primeros meses del año, así como en determinados periodos intermedios y finales, lo que

sugiere la ocurrencia de emisiones puntuales asociadas a actividades específicas en la zona de estudio.

En relación con el  $PM_{2.5}$ , se observa un comportamiento relativamente estable durante la mayor parte del año, con concentraciones promedio moderadas y episodios ocasionales de incremento que alcanzan valores superiores a  $100 \mu g/m^3$ . Este comportamiento evidencia la ocurrencia de episodios ocasionales de incremento de partículas finas durante determinados periodos del año.

Por su parte, el  $PM_{10}$  presenta un patrón similar al observado para el  $PM_{2.5}$ , aunque registra concentraciones ligeramente superiores y una mayor dispersión de valores. Los incrementos observados en determinados periodos del año sugieren la influencia de procesos de evidencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones durante determinados periodos del año.

En cuanto al  $H_2S$ , se observa una variabilidad moderada a lo largo del periodo de estudio, con episodios de incremento que superan los  $100 \mu g/m^3$  en determinados momentos del año. Este comportamiento podría estar asociado a fuentes emisoras locales y condiciones meteorológicas favorables para su acumulación, así como a condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de este contaminante.

En conjunto, los resultados evidencian que la calidad del aire en el distrito de Chimbote durante el año 2025 estuvo influenciada por una alta variabilidad temporal, destacando el carácter episódico del  $SO_2$  y la mayor estabilidad relativa del material particulado y del  $H_2S$ . Estos patrones reflejan la influencia combinada de las fuentes de emisión y de las condiciones atmosféricas sobre la dinámica de los contaminantes evaluados.

En la figura 12 se presenta la variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

El  $PM_{10}$  presenta una tendencia decreciente desde el primer trimestre hasta el tercer trimestre, seguida de una ligera recuperación durante octubre–diciembre. De manera similar, el  $PM_{2.5}$  muestra un comportamiento relativamente estable a lo largo del año, con una disminución gradual de las concentraciones entre los distintos trimestres.

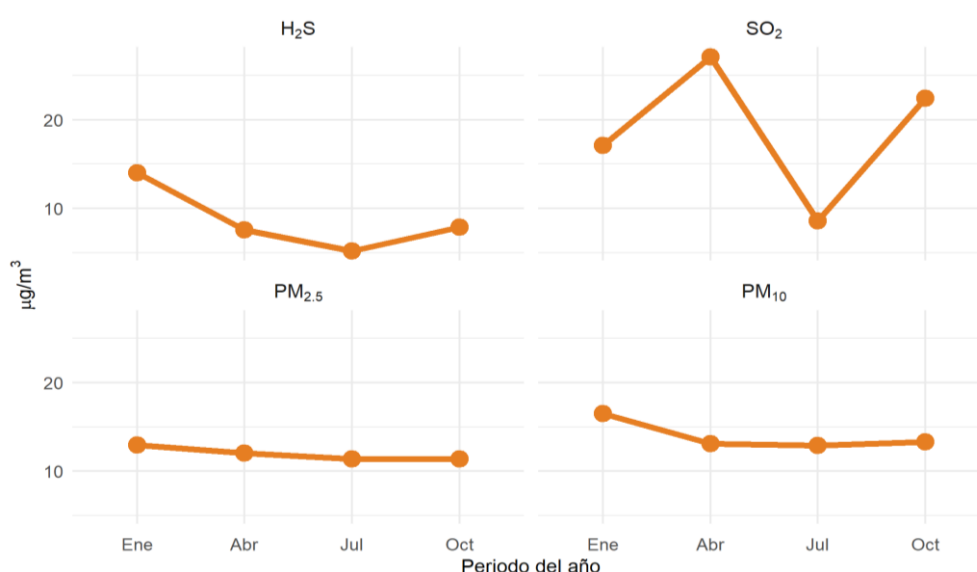
Por su parte, el  $SO_2$  presenta la mayor variabilidad temporal entre los contaminantes evaluados, registrando un incremento importante durante abril–junio, una disminución marcada en julio–septiembre y un nuevo aumento en octubre–diciembre. Este comportamiento

sugiere la ocurrencia de emisiones puntuales asociadas a actividades específicas desarrolladas en determinados periodos del año.

En cuanto al  $H_2S$ , se observa una disminución progresiva desde enero–marzo hasta julio–septiembre, alcanzando sus menores concentraciones durante el tercer trimestre, seguida de un ligero incremento en el último trimestre del año.

En conjunto, los resultados evidencian variaciones temporales en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025, destacando la estabilidad relativa del material particulado y la mayor variabilidad de los contaminantes gaseosos, particularmente del  $SO_2$ , lo que refleja la influencia combinada de las fuentes emisoras y las condiciones ambientales sobre la calidad del aire en el distrito de Chimbote.

**Figura 12:** Variación trimestral de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2025



## b) Estacionales

En la tabla 9 se presentan las concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

El  $PM_{10}$  presenta su mayor concentración promedio durante el otoño (15.70  $\mu g/m^3$ ), seguido del verano (13.20  $\mu g/m^3$ ), mientras que los valores más bajos se registran durante la primavera (12.45  $\mu g/m^3$ ). Asimismo, se observan valores máximos elevados que alcanzan hasta 104.71  $\mu g/m^3$  durante el otoño, evidenciando la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de material particulado.

**Tabla 9:** Concentraciones estacionales de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Parámetro           | Unidad      | Media | Desv. Est. | Máx.   | Mín. | Mediana |
|---------------------|-------------|-------|------------|--------|------|---------|
| <b>Verano</b>       |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 13.20 | 7.97       | 100.70 | 3.29 | 11.79   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 10.42 | 6.33       | 96.62  | 2.78 | 9.60    |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 26.08 | 52.04      | 525.96 | 1.94 | 9.17    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 13.45 | 11.44      | 105.93 | 2.92 | 9.26    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.82  | 0.14       | 1.00   | 0.33 | 0.83    |
| <b>Otoño</b>        |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 15.70 | 7.53       | 104.71 | 2.35 | 14.08   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 13.69 | 6.04       | 102.74 | 2.26 | 12.59   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 22.60 | 50.91      | 402.07 | 1.81 | 3.33    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 9.53  | 8.17       | 114.33 | 1.60 | 6.38    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.89  | 0.11       | 1.00   | 0.38 | 0.93    |
| <b>Invierno</b>     |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 13.02 | 6.17       | 71.94  | 2.17 | 12.00   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 11.54 | 5.19       | 66.47  | 1.88 | 10.78   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 11.35 | 14.12      | 154.13 | 5.97 | 7.34    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 6.09  | 6.82       | 112.80 | 1.82 | 4.06    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.90  | 0.08       | 1.00   | 0.43 | 0.92    |
| <b>Primavera</b>    |             |       |            |        |      |         |
| $PM_{10}$           | $\mu g/m^3$ | 12.45 | 3.84       | 32.95  | 3.08 | 12.02   |
| $PM_{2.5}$          | $\mu g/m^3$ | 10.82 | 3.17       | 31.28  | 2.84 | 10.49   |
| $SO_2$              | $\mu g/m^3$ | 17.41 | 38.99      | 491.98 | 5.87 | 7.23    |
| $H_2S$              | $\mu g/m^3$ | 5.59  | 3.90       | 48.76  | 2.67 | 4.48    |
| $PM_{2.5}/ PM_{10}$ | ratio       | 0.88  | 0.07       | 0.98   | 0.57 | 0.89    |

En el caso del  $PM_{2.5}$ , se registra una concentración promedio máxima durante el otoño ( $13.69 \mu g/m^3$ ) y valores relativamente menores durante el verano ( $10.42 \mu g/m^3$ ) y la primavera ( $10.82 \mu g/m^3$ ). Aunque este contaminante presenta un comportamiento relativamente estable, los valores máximos observados indican la presencia de episodios específicos de contaminación por partículas finas.

Por su parte, el  $SO_2$  presenta una marcada variabilidad estacional, registrando las mayores concentraciones promedio durante el verano ( $26.08 \mu g/m^3$ ) y el otoño ( $22.60 \mu g/m^3$ ), mientras que el invierno presenta los valores más bajos ( $11.35 \mu g/m^3$ ). Además, se registran valores máximos elevados que alcanzan hasta  $525.96 \mu g/m^3$  durante el verano, lo que sugiere

la ocurrencia de emisiones puntuales asociadas a fuentes emisoras puntuales que están en la zona de estudio.

En relación con el  $\text{H}_2\text{S}$ , se observa una disminución progresiva de las concentraciones desde el verano ( $13.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) hasta la primavera ( $5.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), registrándose las menores concentraciones durante el invierno y la primavera. Este comportamiento podría estar asociado a variaciones en las condiciones meteorológicas y a cambios estacionales y condiciones ambientales predominantes durante el periodo evaluado.

Finalmente, el análisis del cociente  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  muestra valores elevados durante todas las estaciones del año, oscilando entre 0.82 y 0.90. Los mayores valores se registran durante el invierno, lo que indica una mayor proporción de partículas finas dentro del material particulado total y indica una elevada proporción de partículas finas dentro del material particulado total durante todas las estaciones del año.

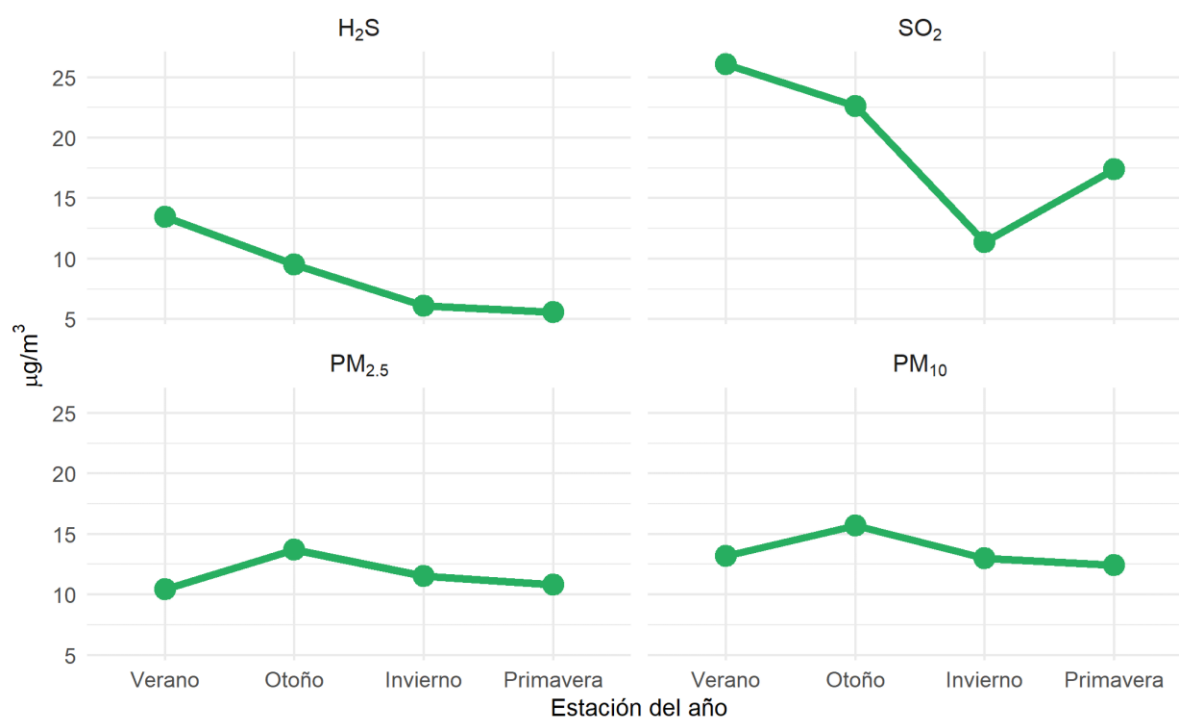
En la figura 13 se presenta la serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos diferenciada por estaciones en el distrito de Chimbote durante el año 2025. Se observa que la variabilidad de los contaminantes presenta patrones diferenciados según la estación, evidenciándose mayores concentraciones y episodios de aumento principalmente en verano y otoño. En particular, el  $\text{SO}_2$  registra los picos más elevados durante estas estaciones, lo que evidencia la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones. Por su parte, el  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  muestran incrementos en distintos periodos del año, con una mayor variabilidad durante otoño e invierno. En tanto, el  $\text{H}_2\text{S}$  presenta mayores concentraciones durante verano y una disminución progresiva hacia invierno y primavera. En conjunto, los resultados evidencian que las condiciones estacionales influyen en la dinámica temporal de los contaminantes atmosféricos en la zona de estudio durante el año 2025.

**Figura 13:** Serie temporal diaria de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  diferenciada por estación en el distrito de Chimbote durante el año 2025



En la figura 14 se presenta la variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025. El  $PM_{10}$  presenta mayores concentraciones durante el otoño y una disminución hacia invierno y primavera, mientras que el  $PM_{2.5}$  muestra una ligera variabilidad estacional con valores más elevados en otoño. Por su parte, el  $SO_2$  registra las mayores concentraciones durante verano y otoño, seguido de una disminución marcada en invierno y un incremento en primavera, lo que sugiere la influencia de emisiones puntuales. En tanto, el  $H_2S$  presenta mayores concentraciones durante verano y una reducción progresiva hacia invierno y primavera, evidenciando la influencia de fuentes locales y condiciones estacionales. En conjunto, los resultados reflejan la influencia de las condiciones estacionales en la dinámica de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025.

**Figura 14:** Variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2025



**c) Variaciones de las concentraciones promedio de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  ( $\mu g / m^3$ ) en diferentes escalas de tiempo para el año 2025**

En la figura 15 se presenta la variación temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

A nivel horario, se observa que ambos contaminantes presentan un patrón bien definido a lo largo del día, con mayores concentraciones durante las primeras horas de la mañana y una disminución hacia el mediodía, seguida de una recuperación progresiva durante la tarde y la noche. Este comportamiento evidencia la existencia de patrones horarios bien definidos que podrían estar influenciados por la dinámica de las actividades desarrolladas en la zona y por las condiciones atmosféricas predominantes durante el día.

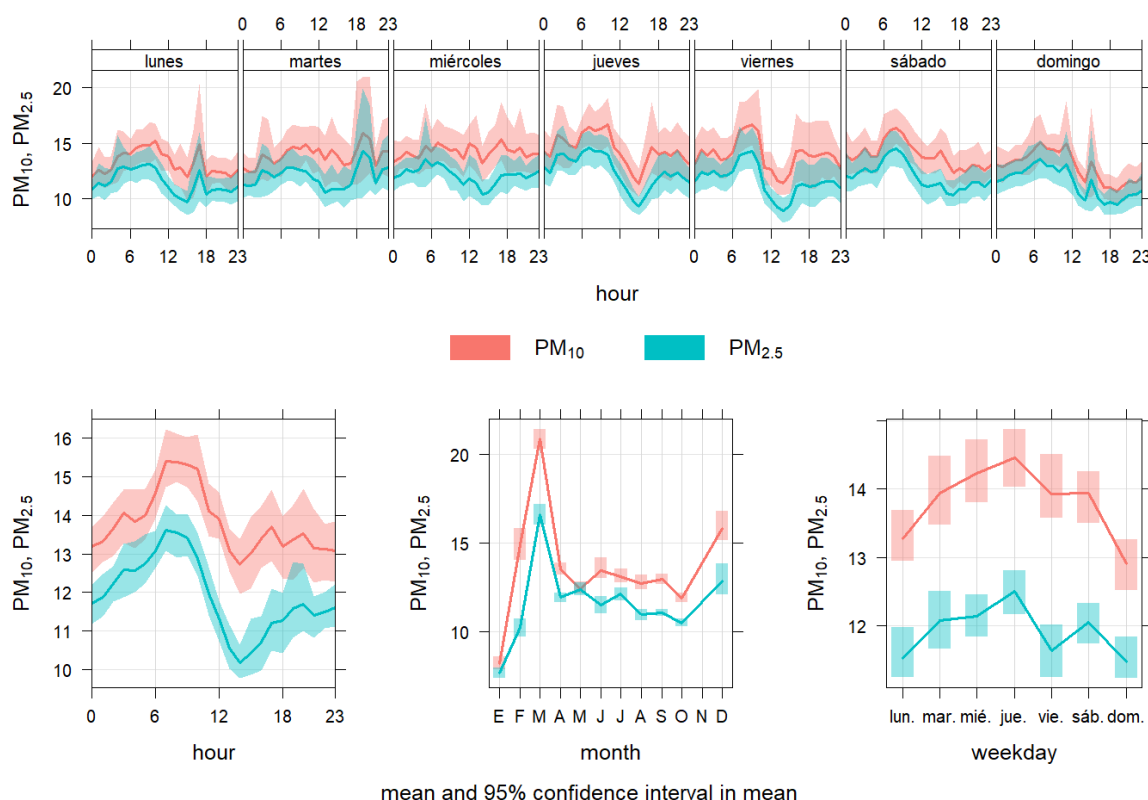
Asimismo, al analizar la variación por días de la semana, se observan diferencias moderadas entre los distintos días, registrándose concentraciones ligeramente mayores entre mediados y finales de la semana, y los valores más pequeños se presentan durante el domingo.

En cuanto a la variación mensual, se identifican mayores concentraciones durante febrero, seguidas de una disminución en los meses posteriores y una ligera recuperación hacia

el final del año. Este comportamiento refleja la influencia de factores estacionales y condiciones meteorológicas sobre la dinámica de los contaminantes atmosféricos.

En todos los casos, se observa que el  $PM_{10}$  presenta concentraciones superiores al  $PM_{2.5}$ ; sin embargo, ambos contaminantes muestran patrones temporales similares, lo que evidencia un comportamiento temporal similar entre ambos contaminantes a lo largo del año.

**Figura 15:** Variación temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025



En conjunto, los resultados evidencian que la variabilidad temporal de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  estuvo asociada a patrones horarios, semanales y mensuales claramente diferenciados, reflejando cambios temporales en las concentraciones registradas y la influencia de las condiciones ambientales predominantes durante el periodo de estudio.

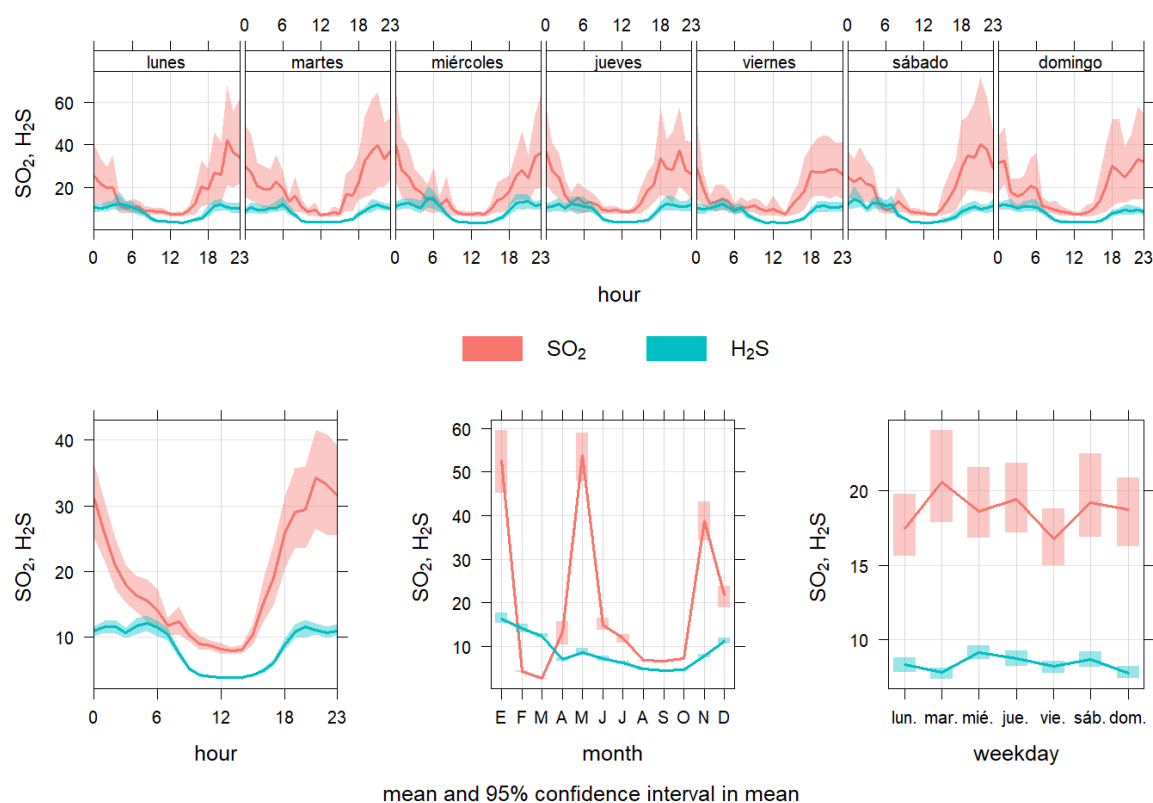
#### **d) Variaciones de las concentraciones promedio de $SO_2$ y $H_2S$ ( $\mu g / m^3$ ) en diferentes escalas de tiempo para el año 2025**

En la figura 16 se presenta la variación temporal de las concentraciones de  $SO_2$  y  $H_2S$  en diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

A nivel horario, el  $\text{SO}_2$  muestra incrementos pronunciados durante determinadas horas del día, especialmente durante la noche y las primeras horas de la madrugada, evidenciando picos de concentración que varían entre los distintos días de la semana. Este comportamiento evidencia la ocurrencia de incrementos temporales significativos en las concentraciones de  $\text{SO}_2$  durante determinados periodos del día. En contraste, el  $\text{H}_2\text{S}$  presenta un comportamiento más estable a lo largo del día, con variaciones moderadas y una disminución durante las horas centrales, lo que evidencia un comportamiento temporal más uniforme en comparación con el  $\text{SO}_2$ .

En la variación mensual, el  $\text{SO}_2$  presenta una marcada variabilidad, con concentraciones elevadas durante enero y abril, una disminución hacia los meses intermedios y un incremento nuevamente hacia noviembre, lo que refuerza su carácter episódico. Por su parte, el  $\text{H}_2\text{S}$  muestra una tendencia más uniforme a lo largo del año, aunque con mayores concentraciones durante los primeros y últimos meses.

**Figura 16:** Variación temporal de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  a diferentes escalas de tiempo en el distrito de Chimbote durante el año 2025



En cuanto a la variación semanal, el SO<sub>2</sub> evidencia fluctuaciones moderadas entre los días de la semana, mientras que el H<sub>2</sub>S mantiene un comportamiento relativamente estable, mostrando una menor variabilidad entre los distintos días de la semana.

En conjunto, los resultados evidencian que los contaminantes gaseosos presentan un comportamiento diferente al del material particulado, destacando el carácter altamente variable y episódico del SO<sub>2</sub> frente al comportamiento más estable del H<sub>2</sub>S. Estas diferencias reflejan patrones temporales distintos entre ambos contaminantes y evidencian una dinámica de concentración más irregular para el SO<sub>2</sub> durante el año 2025.

#### **e) Variaciones de las concentraciones promedio anual de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (µg/m<sup>3</sup>) en diferentes escalas de tiempo para el año 2025**

En la tabla 10 se presenta la estadística descriptiva de las concentraciones anuales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, así como del cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> en el distrito de Chimbote durante el año 2025. El PM<sub>10</sub> registró una concentración media de 13.62 µg/m<sup>3</sup>, mientras que el PM<sub>2.5</sub> alcanzó una media de 11.64 µg/m<sup>3</sup>. Ambos contaminantes presentan valores de media y mediana similares, evidenciando una variabilidad moderada de las concentraciones promedio registradas en el año.

Por su parte, el SO<sub>2</sub> presentó la mayor variabilidad entre los contaminantes evaluados, registrando una desviación estándar de 18.50 µg/m<sup>3</sup> y valores comprendidos entre 2.64 y 53.85 µg/m<sup>3</sup>, reflejando la ocurrencia de episodios de concentraciones elevadas en determinados meses. En contraste, el H<sub>2</sub>S mostró una distribución más estable, con una media de 8.74 µg/m<sup>3</sup> y una desviación estándar de 3.91 µg/m<sup>3</sup>.

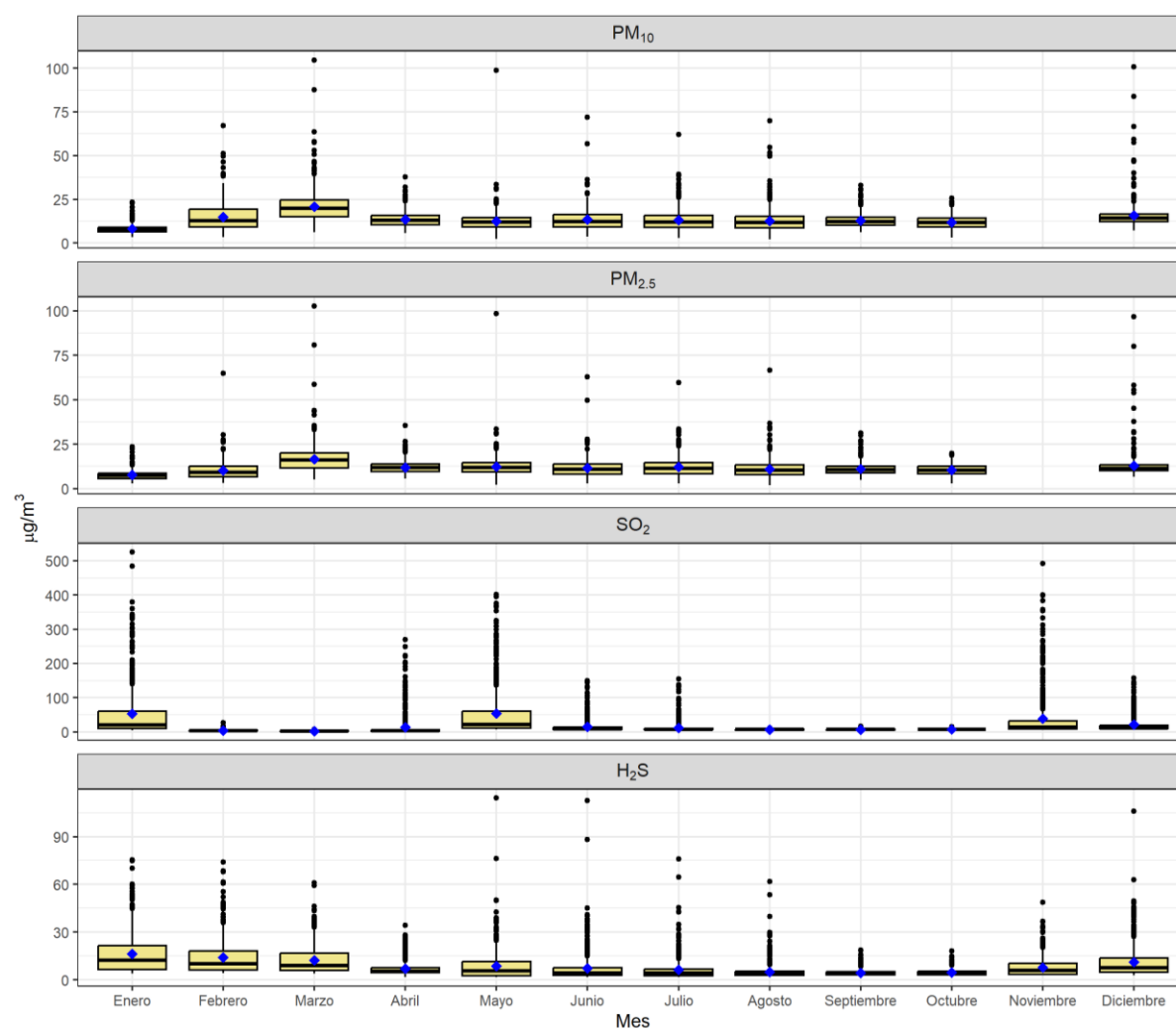
Asimismo, el cociente PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> presentó una media anual de 0.86, indicando que aproximadamente el 86 % del material particulado respirable estuvo constituido por partículas finas. Este resultado evidencia una contribución importante del PM<sub>2.5</sub> al material particulado total registrado durante el año 2025.

**Tabla 10:** Estadística descriptiva de las concentraciones anuales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  y del cociente  $PM_{2.5}/PM_{10}$  en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Parámetro          | Unidad      | Media | Desv.Est. | Mín. | Q1    | Mediana | Q3    | Máx   |
|--------------------|-------------|-------|-----------|------|-------|---------|-------|-------|
| $PM_{10}$          | $\mu g/m^3$ | 13.62 | 3.06      | 8.22 | 12.57 | 13.12   | 14.22 | 20.85 |
| $PM_{2.5}$         | $\mu g/m^3$ | 11.64 | 2.15      | 7.7  | 10.74 | 11.53   | 12.26 | 16.57 |
| $SO_2$             | $\mu g/m^3$ | 19.61 | 18.5      | 2.64 | 6.75  | 12.72   | 26.09 | 53.85 |
| $H_2S$             | $\mu g/m^3$ | 8.74  | 3.91      | 4.45 | 5.92  | 7.49    | 11.44 | 16.32 |
| $PM_{2.5}/PM_{10}$ | ratio       | 0.86  | 0.08      | 0.69 | 0.84  | 0.86    | 0.9   | 1     |

Con el propósito de evaluar la distribución mensual de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025, se elaboraron diagramas de caja y bigotes para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ .

**Figura 17:** Diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  en el distrito de Chimbote durante el año 2025



Los diagramas de caja y bigotes de las concentraciones mensuales de dichos contaminantes, los cuales permiten evaluar su distribución, variabilidad y presencia de valores atípicos durante el periodo de estudio, se muestran en la figura 17.

El  $PM_{10}$  y el  $PM_{2.5}$  presentan una distribución relativamente homogénea durante la mayor parte del año, con medianas y rangos intercuartílicos de amplitud moderada. Sin embargo, ambos contaminantes muestran una mayor dispersión y presencia de valores atípicos durante febrero, marzo y diciembre, evidenciando la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones. En general, el  $PM_{10}$  registra valores superiores al  $PM_{2.5}$ , aunque ambos mantienen un comportamiento temporal similar.

En el caso del  $SO_2$ , se identifica la mayor variabilidad entre los contaminantes evaluados, observándose amplios rangos intercuartílicos y numerosos valores atípicos, especialmente durante enero, mayo y noviembre. Estos resultados coinciden con la elevada desviación estándar obtenida en la tabla 10 y reflejan la ocurrencia de episodios de altas concentraciones reflejando la ocurrencia de episodios puntuales de incremento de las concentraciones durante determinados periodos del año.

Por su parte, el  $H_2S$  presenta una distribución más uniforme y una menor dispersión en comparación con el  $SO_2$ , aunque se observan incrementos y valores atípicos en meses como enero, mayo, junio y diciembre. Evidencia un comportamiento más uniforme y una menor variabilidad temporal en comparación con el  $SO_2$ .

Asimismo, el cociente  $PM_{2.5}/PM_{10}$  registró un valor medio anual de 0.86, indicando que aproximadamente el 86 % del material particulado estuvo constituido por partículas finas. Este resultado evidencia una importante contribución del  $PM_{2.5}$  al material particulado total y evidenciando una importante contribución de la fracción fina al material particulado total registrado durante el año 2025.

En conjunto, los diagramas de caja y bigotes corroboran las diferencias en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos evaluados, destacando la estabilidad relativa del material particulado y del  $H_2S$  frente al comportamiento más variable y episódico del  $SO_2$ , lo que permite comprender de manera integral la dinámica de la calidad del aire en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

#### **4.2. Determinación de las características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) durante el periodo 2024-2025**

#### 4.2.1 Características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) para el año 2024

##### a) Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas

En la tabla 11 se presenta el comportamiento trimestral de las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

Se observa que la humedad relativa presentó valores elevados durante todo el periodo de estudio, con promedios comprendidos entre 77.42 % y 83.18 %, registrándose los mayores valores durante el trimestre julio–septiembre. Este comportamiento evidencia condiciones atmosféricas relativamente húmedas a lo largo del año.

Por su parte, la temperatura mostró una marcada variación estacional, alcanzando su mayor promedio durante enero–marzo (23.98 °C) y disminuyendo progresivamente hasta registrar su valor mínimo durante julio–septiembre (17.38 °C), para posteriormente incrementarse durante el último trimestre del año.

En cuanto al viento, la dirección predominante presentó variaciones entre los distintos trimestres, con valores medios comprendidos entre 140.32° y 182.05°. Asimismo, la velocidad del viento presentó un comportamiento relativamente estable, con promedios entre 2.13 y 2.37 m/s, evidenciando una relativa estabilidad de las condiciones de viento durante el año de estudio.

**Tabla 11:** Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Parámetro              | Unidad | Promedio | Desv. Est. | Max   | Min  | Mediana |
|------------------------|--------|----------|------------|-------|------|---------|
| <b>Enero-Marzo</b>     |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa       | %      | 77.42    | 8.3        | 91.6  | 55.4 | 79.2    |
| Temperatura            | °C     | 23.98    | 2          | 29.8  | 19.9 | 23.8    |
| Dirección del viento   | °      | 182.05   | 44.43      | 340.1 | 0.2  | 181.45  |
| Velocidad del viento   | m/s    | 2.37     | 0.97       | 5.4   | 0.3  | 2.2     |
| <b>Abril-Junio</b>     |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa       | %      | 82.3     | 8.04       | 94.2  | 55.3 | 84.1    |
| Temperatura            | °C     | 19.82    | 2.4        | 26.8  | 15.5 | 19.6    |
| Dirección del viento   | °      | 162.31   | 92.27      | 359.7 | 0    | 156.9   |
| Velocidad del viento   | m/s    | 2.36     | 0.9        | 5.3   | 0.3  | 2.3     |
| <b>Julio-Setiembre</b> |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa       | %      | 83.18    | 6.11       | 92.8  | 65.4 | 85      |

|                          |     |        |       |       |      |       |
|--------------------------|-----|--------|-------|-------|------|-------|
| Temperatura              | °C  | 17.38  | 1.33  | 20.9  | 15.6 | 16.9  |
| Dirección del viento     | °   | 140.32 | 22.75 | 230.4 | 71.1 | 145.5 |
| Velocidad del viento     | m/s | 2.13   | 0.78  | 4.5   | 0.5  | 2     |
| <b>Octubre-Diciembre</b> |     |        |       |       |      |       |
| Humedad relativa         | %   | 80.91  | 7.98  | 94.7  | 58.9 | 82.9  |
| Temperatura              | °C  | 19.18  | 1.96  | 25.6  | 15.6 | 18.9  |
| Dirección del viento     | °   | 144.66 | 31.43 | 355   | 21.7 | 144.6 |
| Velocidad del viento     | m/s | 2.24   | 0.92  | 5.3   | 0.1  | 2.1   |

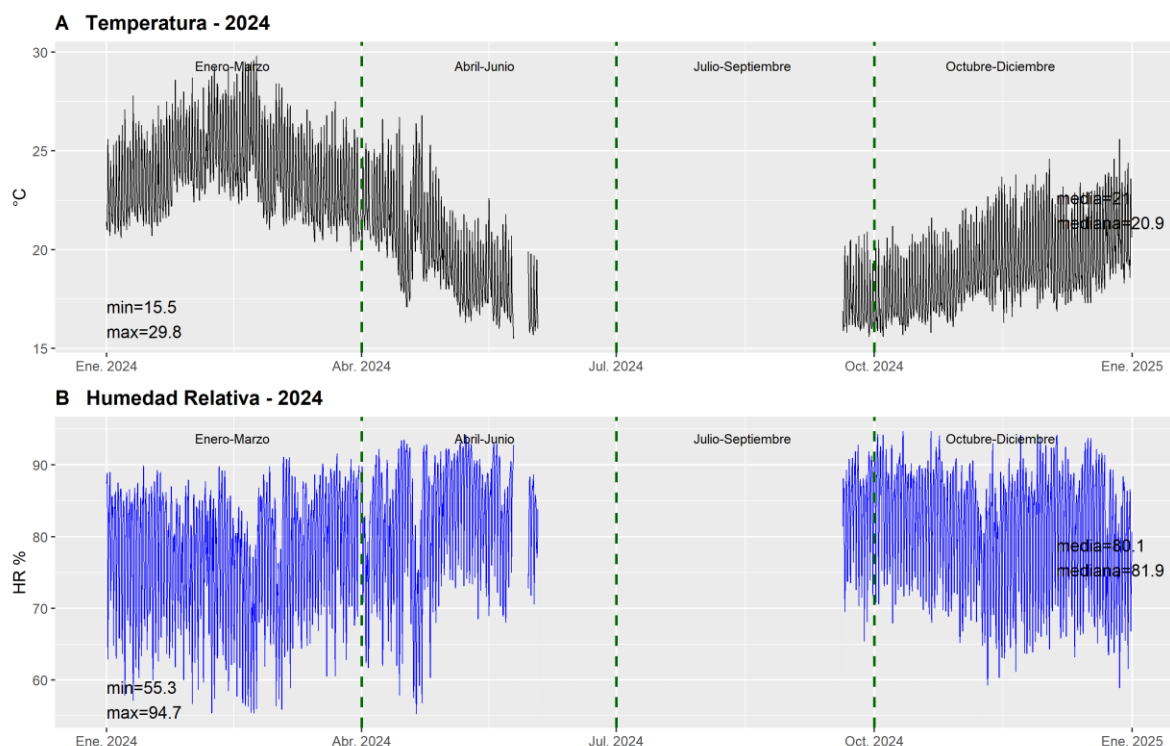
En conjunto, los resultados muestran variaciones temporales de las condiciones meteorológicas durante el año 2024, destacando la reducción de la temperatura y el aumento de la humedad relativa durante los meses de invierno, así como la relativa estabilidad de la velocidad del viento en el área de estudio.

En la figura 18 se presenta la distribución temporal de la temperatura y la humedad relativa registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024. Se observa que la temperatura presenta una marcada variación a lo largo del año, con valores más elevados durante el primer trimestre y una disminución progresiva hacia los meses de invierno, seguida de un incremento durante el último trimestre. Durante el periodo de estudio se notó una temperatura mínima de 15.5 °C y una máxima de 29.8 °C, con una media de 21.0 °C y una mediana de 20.9 °C.

Por su parte, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso al de la temperatura, teniendo valores más elevados durante los meses de menor temperatura y una ligera disminución durante los periodos más cálidos. Los valores oscilaron entre 55.3 % y 94.7 %, con una media de 80.1 % y una mediana de 81.9 %, evidenciando condiciones atmosféricas húmedas durante gran parte del año.

Asimismo, se observa una ausencia de registros de temperatura y humedad relativa durante parte del periodo comprendido entre junio y septiembre de 2024, por lo que las estadísticas descriptivas fueron calculadas utilizando únicamente los registros disponibles.

**Figura 18:** Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



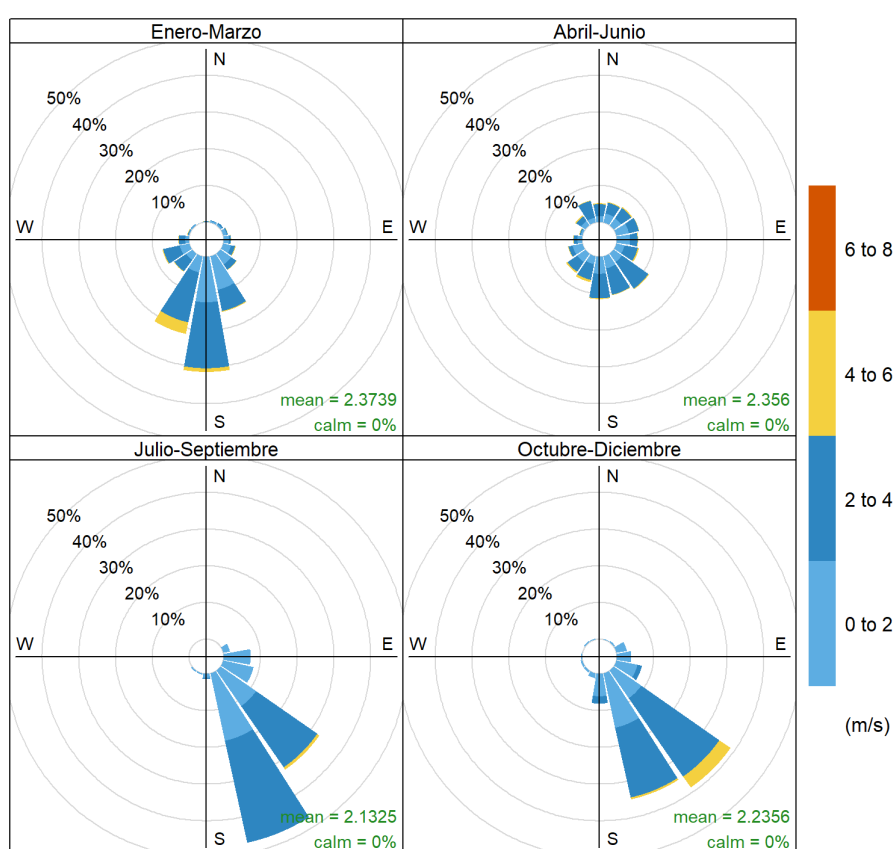
En conjunto, los resultados evidencian una variación temporal característica de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, destacando la relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa, así como la persistencia de elevados niveles de humedad atmosférica durante el año 2024.

En la figura 19 se presentan las rosas de viento trimestrales registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024, las cuales muestran la distribución de frecuencias de la dirección y velocidad del viento. Se observa que durante todos los trimestres predominan los vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, evidenciando un patrón relativamente constante de circulación atmosférica en el área de estudio.

Las mayores frecuencias de ocurrencia se registran principalmente para velocidades comprendidas entre 2 y 4 m/s, mientras que los eventos con velocidades entre 4 y 6 m/s presentan una menor frecuencia. De acuerdo con la clasificación establecida en la operacionalización de variables, predominan los vientos flojos, observándose escasa ocurrencia de velocidades correspondientes a categorías superiores.

Durante el trimestre enero-marzo se registra una velocidad media de 2.37 m/s, con predominio de vientos procedentes del sector sur. Por su parte, abril-junio presenta una distribución más dispersa de las direcciones del viento, manteniendo velocidades predominantes entre 2 y 4 m/s. En julio-septiembre se observa la dirección predominante más marcada del año, concentrada en el sector sur-sureste y asociada a una velocidad media de 2.13 m/s. Finalmente, durante octubre-diciembre se mantiene el predominio de vientos procedentes del sector sur-sureste, registrándose una velocidad media de 2.24 m/s.

**Figura 19:** Rosas de viento trimestrales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2024



Frequency of counts by wind direction (%)

*Nota:* La longitud de cada segmento representa la frecuencia relativa (%) de ocurrencia del viento según su dirección. Los colores indican intervalos de velocidad del viento expresados en m/s. Para la interpretación de la velocidad del viento se consideró la clasificación establecida en la operacionalización de variables: calma (<1.39 m/s), flojo (1.7–5.6 m/s), moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s).

En conjunto, los resultados evidencian que la circulación atmosférica en el distrito de Chimbote durante el año 2024 estuvo dominada por vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, asociados principalmente a velocidades clasificadas como flojas. Estas condiciones podrían influir en los procesos de transporte atmosférico observados en el área de estudio.

## b) Comportamiento estacional de las variables meteorológicas

En la tabla 12 se presenta el comportamiento estacional de las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024. Se observa que la humedad relativa mantuvo valores elevados durante todo el periodo de estudio, registrando promedios entre 77.73 % y 81.82 %, siendo el invierno la estación con mayor humedad atmosférica.

Por su parte, la temperatura presentó una marcada variación estacional, alcanzando su mayor promedio durante el verano (22.91 °C) y disminuyendo progresivamente hasta registrar el menor valor en invierno (17.14 °C). Posteriormente, se observa un ligero incremento durante la primavera (18.48 °C), reflejando el comportamiento climático característico de la zona costera donde se realiza el análisis.

En cuanto a la dirección del viento, se identificaron variaciones entre estaciones, con valores medios comprendidos entre 141.34° y 175.84°, evidenciando modificaciones en los patrones de circulación atmosférica durante el año. Asimismo, la velocidad del viento presentó su mayor promedio durante el verano (2.41 m/s) y el menor durante el invierno (1.62 m/s), indicando una disminución de la intensidad del viento durante la estación más fría.

**Tabla 12:** Comportamiento estacional de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Parámetro            | Unidad | Promedio | Desv. Est. | Max   | Min  | Mediana |
|----------------------|--------|----------|------------|-------|------|---------|
| <b>Verano</b>        |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa     | %      | 77.73    | 8.53       | 94.2  | 55.4 | 79.2    |
| Temperatura          | °C     | 22.91    | 2.78       | 29.8  | 16.9 | 23.1    |
| Dirección del viento | °      | 174.53   | 40.11      | 355   | 0.9  | 171     |
| Velocidad del viento | m/s    | 2.41     | 1.03       | 5.4   | 0.1  | 2.2     |
| <b>Otoño</b>         |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa     | %      | 81.29    | 8.24       | 94.2  | 55.3 | 83.1    |
| Temperatura          | °C     | 21.11    | 2.73       | 28.4  | 15.5 | 21.2    |
| Dirección del viento | °      | 165.67   | 80.47      | 359.7 | 0    | 169.9   |
| Velocidad del viento | m/s    | 2.36     | 0.91       | 5.3   | 0.3  | 2.3     |
| <b>Invierno</b>      |        |          |            |       |      |         |

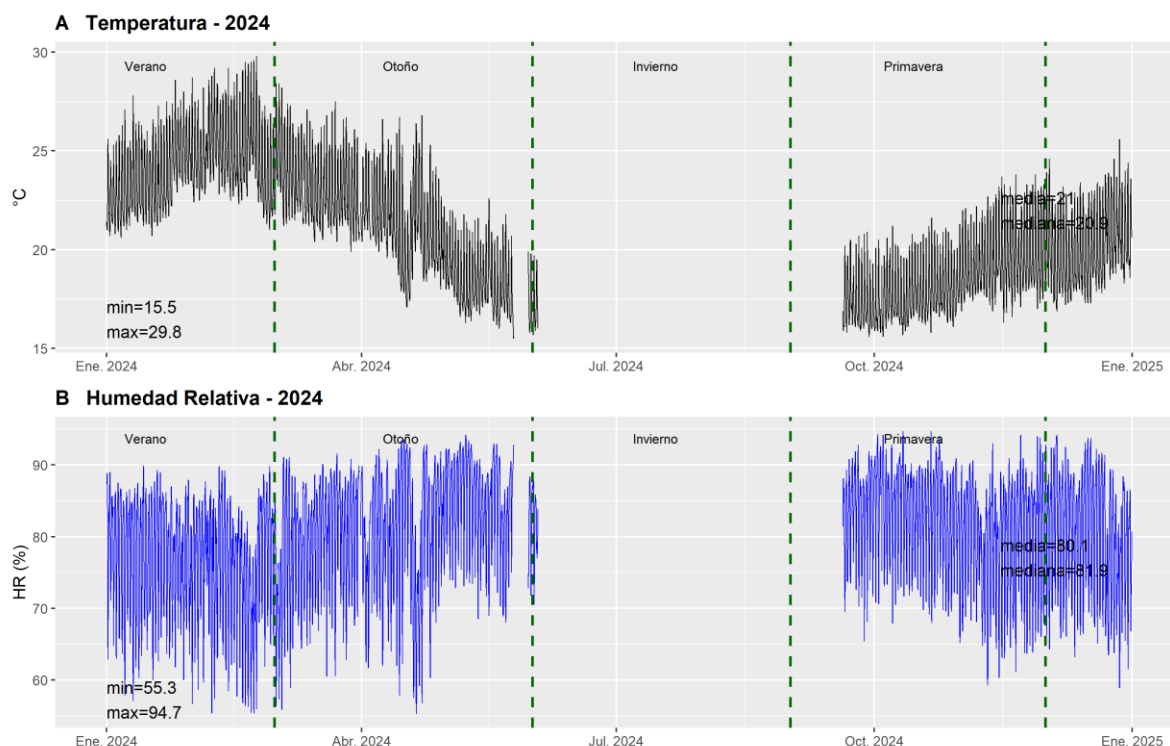
|                      |     |        |      |       |      |       |
|----------------------|-----|--------|------|-------|------|-------|
| Humedad relativa     | %   | 81.82  | 4.86 | 88.7  | 70.6 | 82.85 |
| Temperatura          | °C  | 17.14  | 1.25 | 19.7  | 15.7 | 16.6  |
| Dirección del viento | °   | 175.84 | 80.1 | 337.6 | 0.2  | 188   |
| Velocidad del viento | m/s | 1.62   | 0.52 | 2.8   | 0.7  | 1.55  |
| <b>Primavera</b>     |     |        |      |       |      |       |
| Humedad relativa     | %   | 81.54  | 7.48 | 94.7  | 59.3 | 83.4  |
| Temperatura          | °C  | 18.48  | 1.79 | 23.8  | 15.6 | 18.2  |
| Dirección del viento | °   | 141.34 | 31.5 | 334.9 | 21.7 | 143.4 |
| Velocidad del viento | m/s | 2.14   | 0.79 | 4.7   | 0.2  | 2.1   |

En conjunto, los resultados evidencian una marcada influencia estacional sobre la velocidad del viento y la temperatura, entretanto la humedad relativa mantuvo valores elevados y relativamente estables durante todo el año. Estas condiciones meteorológicas constituyen factores que pueden influir en los procesos de dispersión y transporte y también acumulación de contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote.

En la figura 20 se presenta la distribución temporal de la temperatura y la humedad relativa registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024, diferenciadas según las estaciones del año. Los resultados muestran que la temperatura presenta una marcada variación estacional, registrando los valores más elevados durante el verano y una disminución progresiva hacia el invierno, seguida de un incremento gradual durante la primavera. Durante el periodo de estudio se registró una temperatura mínima de 15.5 °C y una máxima de 29.8 °C, con una media de 21.0 °C y una mediana de 20.9 °C.

Por su parte, la humedad relativa en comparación con la temperatura ha demostrado un comportamiento inverso, ya que registró valores más elevados en las estaciones más frías y una disminución relativa durante el verano. Los valores oscilaron entre 55.3 % y 94.7 %, con una media de 80.1 % y una mediana de 81.9 %, evidenciando condiciones atmosféricas húmedas durante gran parte del año.

**Figura 20:** Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



En conjunto, los resultados evidencian un comportamiento estacional característico de las variables meteorológicas analizadas, destacando la relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa, así como la persistencia de elevados niveles de humedad atmosférica durante todo el año en el distrito de Chimbote.

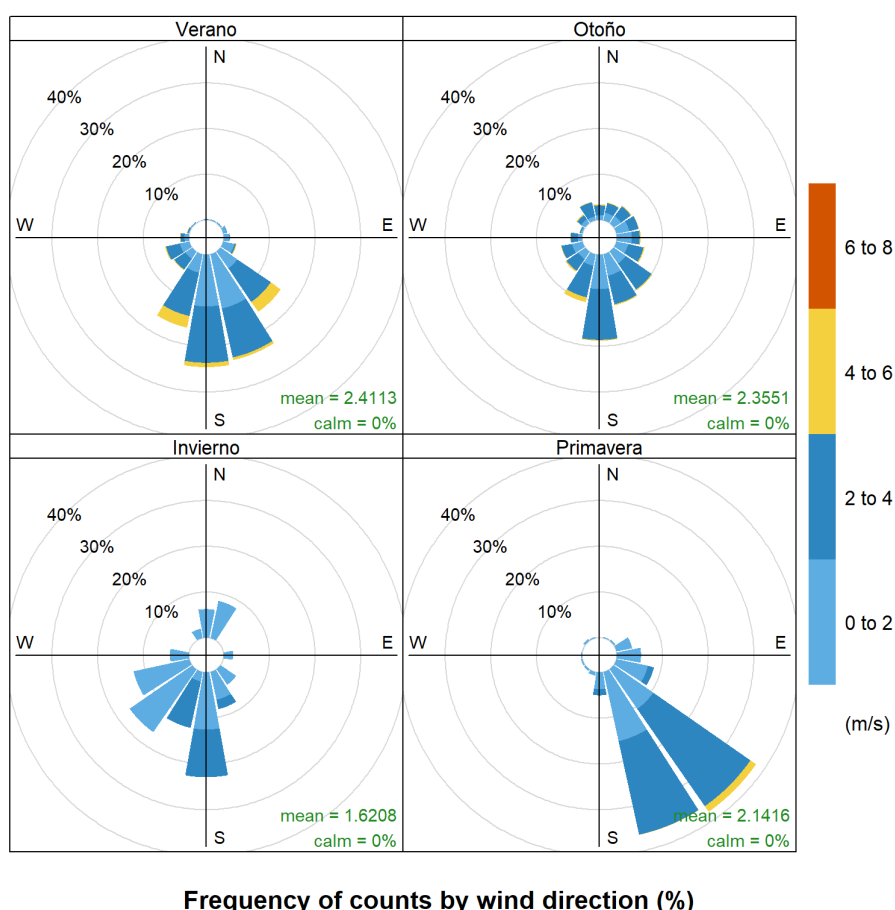
En la figura 21 se presentan las rosas de viento estacionales registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024, las cuales muestran la distribución de frecuencias de la dirección y velocidad para cada estación del año. Se observa que durante todas las estaciones predominan los vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, evidenciando un patrón relativamente constante de circulación atmosférica en la zona de estudio. Sin embargo, la frecuencia de ocurrencia y la dispersión de las direcciones del viento presentan variaciones estacionales.

Durante el verano se registran las mayores velocidades medias del viento (2.41 m/s), predominando los vientos procedentes de los sectores sur y sureste. En otoño se observa una distribución más homogénea de las direcciones del viento, manteniéndose una velocidad media de 2.36 m/s. Por su parte, el invierno presenta la menor velocidad media del año (1.62 m/s),

acompañado de una mayor dispersión direccional. Finalmente, durante la primavera se observa la dirección predominante más marcada del año, concentrada hacia el sector sur-sureste, con una velocidad media de 2.14 m/s.

De acuerdo con la clasificación de velocidad del viento establecida en la operacionalización de variables de la investigación, las mayores frecuencias corresponden a vientos de categoría flojo (1.7–5.6 m/s). Asimismo, se observa una limitada ocurrencia de vientos en calma (<1.39 m/s), mientras que las categorías moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s) no presentan una frecuencia significativa durante el periodo evaluado.

**Figura 21:** Rosas de viento estacionales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2024



*Nota:* La longitud de cada segmento representa la frecuencia relativa (%) de ocurrencia del viento según su dirección. Los colores indican intervalos de velocidad del viento expresados en m/s. Para la interpretación de la velocidad del viento se consideró la clasificación establecida en la operacionalización de variables: calma (<1.39 m/s), flojo (1.7–5.6 m/s),

*moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s).*

En conjunto, los resultados evidencian que la circulación atmosférica en el distrito de Chimbote durante el año 2024 estuvo dominada por vientos procedentes de los sectores sur y sur-sureste, asociados principalmente a velocidades clasificadas como flojas. Estas condiciones podrían influir en los procesos de transporte atmosférico observados en el área de estudio.

#### ***4.2.2 Características meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) para el año 2025***

##### **a) Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas**

En la tabla 13 se presenta el comportamiento trimestral de las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

Se observa que la humedad relativa presentó valores elevados durante todo el periodo de estudio, con promedios comprendidos entre 78.77 % y 82.49 %, registrándose los mayores valores durante el trimestre abril-junio. Este comportamiento evidencia condiciones atmosféricas relativamente húmedas a lo largo del año.

Por su parte, la temperatura mostró una marcada variación estacional, alcanzando su mayor promedio durante enero-marzo (22.78 °C) y disminuyendo progresivamente hasta registrar su valor mínimo durante julio-septiembre (17.99 °C), para posteriormente incrementarse durante el último trimestre del año.

En cuanto al viento, la dirección predominante presentó variaciones entre los distintos trimestres, con valores medios comprendidos entre 142.58° y 155.79°. Asimismo, la velocidad del viento presentó un comportamiento relativamente estable, con promedios entre 1.85 y 2.40 m/s, evidenciando una relativa estabilidad de las condiciones de viento durante el periodo evaluado.

**Tabla 13:** Comportamiento trimestral de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Parámetro                | Unidad | Promedio | Desv. Est. | Max   | Min  | Mediana |
|--------------------------|--------|----------|------------|-------|------|---------|
| <b>Enero-Marzo</b>       |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa         | %      | 78.77    | 8.73       | 94.2  | 52.9 | 80.5    |
| Temperatura              | °C     | 22.78    | 2.24       | 29.4  | 18   | 22.6    |
| Dirección del viento     | °      | 148.8    | 42.73      | 358.8 | 12.9 | 152.35  |
| Velocidad del viento     | m/s    | 1.85     | 0.92       | 5.6   | 0.1  | 1.6     |
| <b>Abril-Junio</b>       |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa         | %      | 82.49    | 6.19       | 93    | 63.7 | 84.2    |
| Temperatura              | °C     | 19.85    | 1.53       | 25.4  | 16.8 | 19.5    |
| Dirección del viento     | °      | 145.26   | 31.44      | 349.8 | 19.3 | 145.6   |
| Velocidad del viento     | m/s    | 2.04     | 0.87       | 5.1   | 0.2  | 2       |
| <b>Julio-Setiembre</b>   |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa         | %      | 81.59    | 5.89       | 92.5  | 66.4 | 83      |
| Temperatura              | °C     | 17.99    | 1.47       | 22.4  | 14.7 | 17.9    |
| Dirección del viento     | °      | 142.58   | 37.66      | 354.9 | 7.9  | 143.35  |
| Velocidad del viento     | m/s    | 1.88     | 0.81       | 4.5   | 0.1  | 1.8     |
| <b>Octubre-Diciembre</b> |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa         | %      | 80.48    | 8.33       | 95.1  | 60.5 | 83      |
| Temperatura              | °C     | 19.28    | 1.92       | 25    | 16   | 18.9    |
| Dirección del viento     | °      | 155.79   | 33.92      | 350.4 | 2.5  | 154.8   |
| Velocidad del viento     | m/s    | 2.4      | 0.95       | 5.7   | 0.2  | 2.3     |

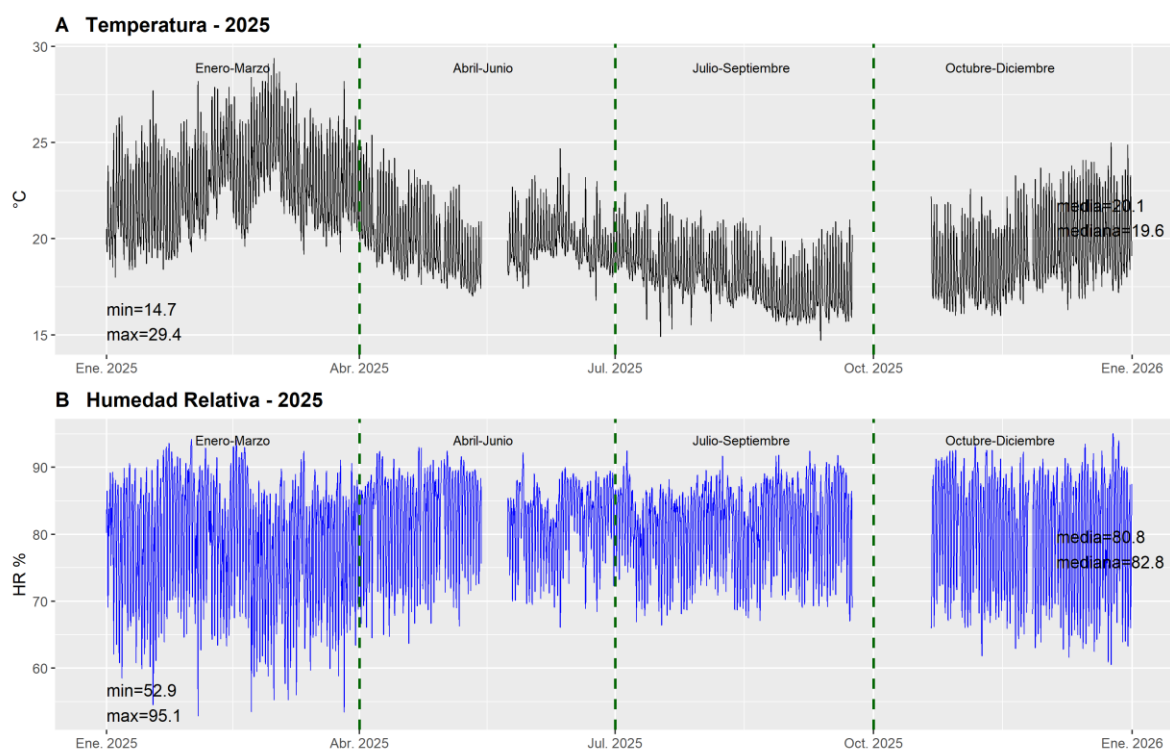
En conjunto, los resultados muestran variaciones temporales de las condiciones meteorológicas durante el año 2025, destacando el aumento de la humedad relativa y la reducción de la temperatura durante los meses más fríos, también la relativa estabilidad de la velocidad del viento en el área de estudio.

En la figura 22 se presenta la distribución temporal de la temperatura y la humedad relativa registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025. Se observa que la temperatura presenta una marcada variación a lo largo del año, con valores más elevados durante el primer trimestre y una disminución progresiva hacia los meses de invierno, seguida de un incremento durante el último trimestre. Durante el periodo de estudio se registró una temperatura mínima de 14.7 °C y una máxima de 29.4 °C, con una media de 20.1 °C y una mediana de 19.6 °C.

Por su parte, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso al de la temperatura, ya que registra valores más elevados en los meses de menor temperatura y una ligera disminución durante los periodos más cálidos. Los valores oscilaron entre 52.9 % y 95.1 %, con una media de 80.8 % y una mediana de 82.8 %, evidenciando condiciones atmosféricas húmedas durante gran parte del año.

Asimismo, la serie temporal muestra una distribución continua de los registros meteorológicos durante los diferentes trimestres del año, permitiendo identificar claramente las variaciones temporales de ambas variables a lo largo del periodo de estudio.

**Figura 22:** Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



En conjunto, los resultados evidencian una variación temporal característica de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, destacando la relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa, así como la persistencia de elevados niveles de humedad atmosférica durante el año 2025.

En la figura 23 se presentan las rosas de viento trimestrales registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025, las cuales muestran la distribución de frecuencias de la

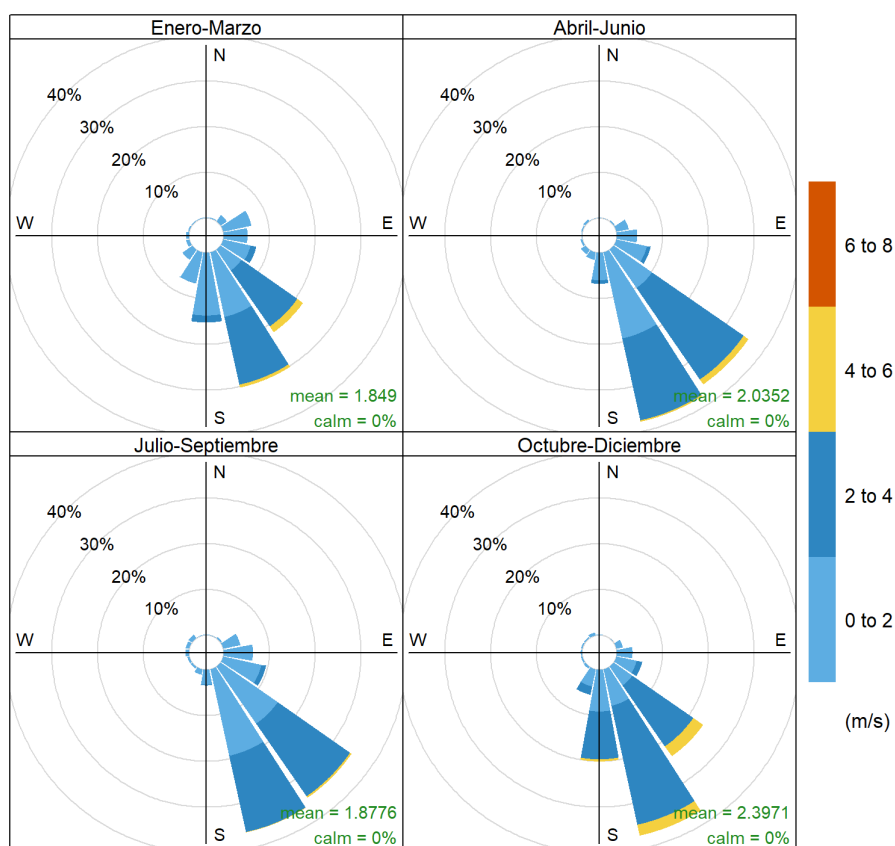
velocidad y dirección del viento. Se muestra que durante todos los trimestres predominan los vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, evidenciándose un patrón relativamente constante de circulación atmosférica en el área de estudio.

Las mayores frecuencias de ocurrencia se registran principalmente para vientos con velocidades comprendidas entre 2 y 4 m/s, mientras que los eventos con velocidades entre 4 y 6 m/s presentan una menor frecuencia. De acuerdo con la clasificación establecida en la operacionalización de variables, predominan los vientos flojos (1.7–5.6 m/s), observándose una ocurrencia reducida de velocidades correspondientes a categorías superiores.

Durante el trimestre enero-marzo se observa un predominio de vientos procedentes del sector sur-sureste, teniendo la velocidad media de 1.85 m/s. Por su parte, abril-junio presenta una dirección predominante similar, registrando una velocidad media de 2.04 m/s. En julio-septiembre se mantiene el predominio de vientos que provienen del sector sur-sureste, teniendo la velocidad media de 1.88 m/s y una mayor concentración de frecuencias en dicha dirección. Finalmente, durante octubre-diciembre se observa la mayor velocidad media del año (2.40 m/s), conservándose el predominio de vientos procedentes de los sectores sur y sur-sureste.

Asimismo, no se registra ocurrencia significativa de vientos correspondientes a las categorías moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) ni huracanado ( $>33.3$  m/s), predominando las velocidades clasificadas como flojas durante todo el periodo evaluado.

**Figura 23:** Rosas de viento trimestrales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2025



**Frequency of counts by wind direction (%)**

*Nota:* La longitud de cada segmento representa la frecuencia relativa (%) de ocurrencia del viento según su dirección. Los colores indican intervalos de velocidad del viento expresados en m/s. Para la interpretación de la velocidad del viento se consideró la clasificación establecida en la operacionalización de variables: calma (<1.39 m/s), flojo (1.7–5.6 m/s), moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s).

En conjunto, los resultados evidencian que la circulación atmosférica en el distrito de Chimbote durante el año 2025 estuvo dominada por vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, asociados principalmente a velocidades clasificadas como flojas. Estas condiciones podrían influir en los procesos de transporte atmosférico observados en la zona de estudio.

## **b) Comportamiento estacional de las variables meteorológicas**

En la tabla 14 se presenta el comportamiento estacional de las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025. Se observa que la humedad relativa

mantuvo valores elevados durante todo el periodo de estudio, registrando promedios entre 79.72 % y 81.67 %, siendo el invierno la estación con mayor humedad atmosférica.

Por su parte, la temperatura presentó una marcada variación estacional, alcanzando su mayor promedio durante el verano (21.72 °C) y registrando los valores más elevados durante el verano y una disminución progresiva hacia el invierno y la primavera. Asimismo, se observa una reducción gradual de la temperatura desde verano hacia las estaciones más frías del año, reflejando el comportamiento climático característico de la zona costera de estudio.

En cuanto a la dirección del viento, se identificaron variaciones entre estaciones, con valores medios comprendidos entre 143.25° y 154.02°, evidenciando modificaciones en patrones de la circulación atmosférica en lo que va del año. Asimismo, la velocidad del viento presentó su mayor promedio durante la primavera (2.41 m/s) y el menor durante el invierno (1.84 m/s), indicando una disminución de la intensidad del viento durante la estación más fría.

De acuerdo con la clasificación de velocidad del viento establecida en la operacionalización de variables del presente estudio, los valores observados corresponden principalmente a vientos flojos (1.7–5.6 m/s), predominando durante todas las estaciones que fueron evaluadas.

**Tabla 14:** Comportamiento estacional de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Parámetro            | Unidad | Promedio | Desv. Est. | Max   | Min  | Mediana |
|----------------------|--------|----------|------------|-------|------|---------|
| <b>Verano</b>        |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa     | %      | 79.72    | 8.78       | 95.1  | 52.9 | 81.6    |
| Temperatura          | °C     | 21.72    | 2.48       | 29.1  | 16.3 | 21.5    |
| Dirección del viento | °      | 154.02   | 43.82      | 358.8 | 2.5  | 156.7   |
| Velocidad del viento | m/s    | 1.96     | 0.95       | 5.2   | 0.2  | 1.8     |
| <b>Otoño</b>         |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa     | %      | 80.57    | 7.78       | 93    | 53.4 | 82.8    |
| Temperatura          | °C     | 21.09    | 2.44       | 29.4  | 17   | 20.8    |
| Dirección del viento | °      | 148.58   | 35.35      | 344.2 | 37.2 | 149.3   |
| Velocidad del viento | m/s    | 1.99     | 0.92       | 5.6   | 0.1  | 1.8     |
| <b>Invierno</b>      |        |          |            |       |      |         |
| Humedad relativa     | %      | 81.67    | 5.53       | 92.5  | 66.1 | 83      |
| Temperatura          | °C     | 18.8     | 1.52       | 24.7  | 14.9 | 18.7    |
| Dirección del viento | °      | 143.25   | 37.91      | 354.9 | 7.9  | 143.7   |
| Velocidad del viento | m/s    | 1.84     | 0.78       | 4.5   | 0.1  | 1.8     |
| <b>Primavera</b>     |        |          |            |       |      |         |

|                      |     |        |       |       |      |        |
|----------------------|-----|--------|-------|-------|------|--------|
| Humedad relativa     | %   | 81.34  | 7.57  | 93.5  | 61.8 | 83.5   |
| Temperatura          | °C  | 18.13  | 1.75  | 23.7  | 14.7 | 17.7   |
| Dirección del viento | °   | 144.57 | 24.94 | 322.1 | 42.9 | 146.65 |
| Velocidad del viento | m/s | 2.41   | 0.91  | 5.7   | 0.2  | 2.4    |

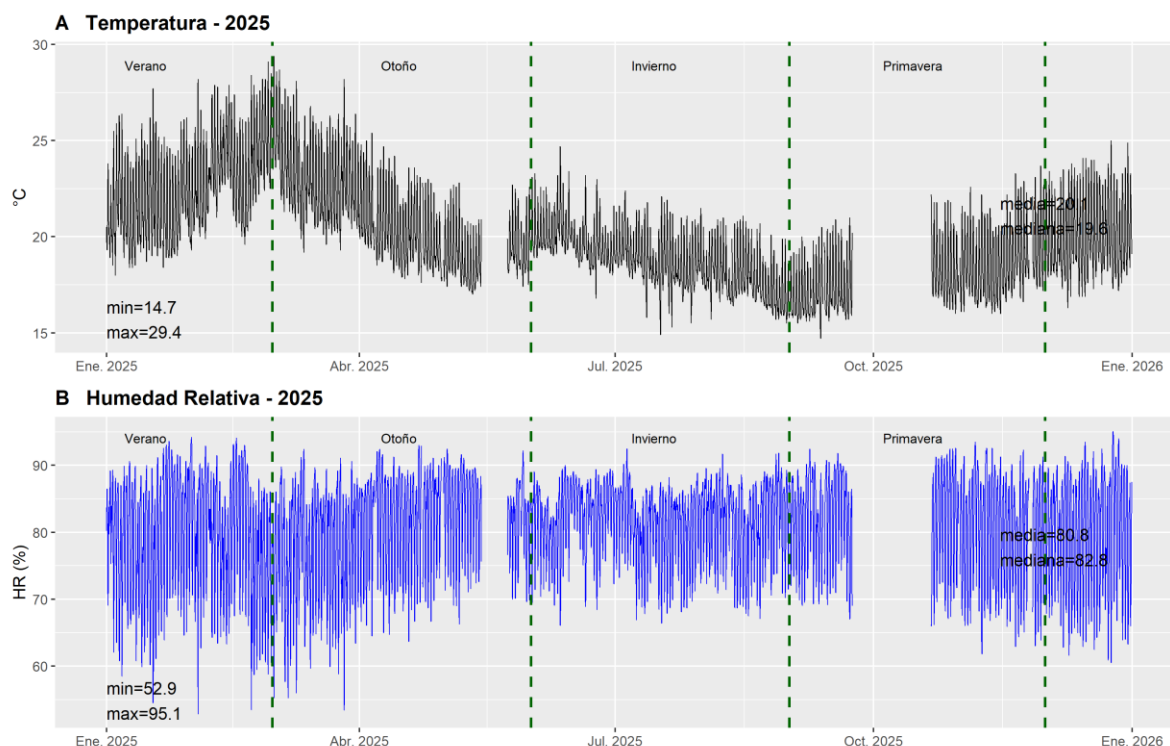
En conjunto, los resultados evidencian una marcada influencia estacional sobre la velocidad del viento y la temperatura, entre tanto la humedad relativa mantuvo valores elevados y relativamente estables durante todo el año. Estas condiciones meteorológicas constituyen factores que pueden influir en los procesos de dispersión y también de, y acumulación de contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote.

En la figura 24 se presenta la distribución temporal de la temperatura y la humedad relativa registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025, diferenciadas según las estaciones del año. Se muestra que la temperatura presenta una marcada variación estacional, registrando los valores más elevados durante el verano y una disminución progresiva hacia el invierno, seguida de un ligero incremento durante la primavera. Durante el periodo de estudio se registró la mínima temperatura de 14.7 °C y una máxima de 29.4 °C, con una media de 20.1 °C y una mediana de 19.6 °C.

Por su parte, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso al de la temperatura, teniendo valores más elevados en las estaciones más frías y una disminución relativa durante el verano. Los valores oscilaron entre 52.9 % y 95.1 %, con una media de 80.8 % y una mediana de 82.8 %, evidenciando condiciones atmosféricas húmedas durante gran parte del año.

Asimismo, la serie temporal muestra una distribución continua de los registros meteorológicos durante las diferentes estaciones del año, permitiendo identificar claramente las variaciones temporales de ambas variables a lo largo del periodo evaluado.

**Figura 24:** Distribución de datos en una serie temporal para las variables meteorológicas: (A) Temperatura (°C) y (B) Humedad relativa (%) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



En conjunto, estos resultados evidencian un comportamiento estacional característico de las variables meteorológicas analizadas, destacando la relación inversa entre la humedad relativa y la temperatura, así como la persistencia de elevados niveles de humedad atmosférica a lo largo de todo el año en el distrito de Chimbote.

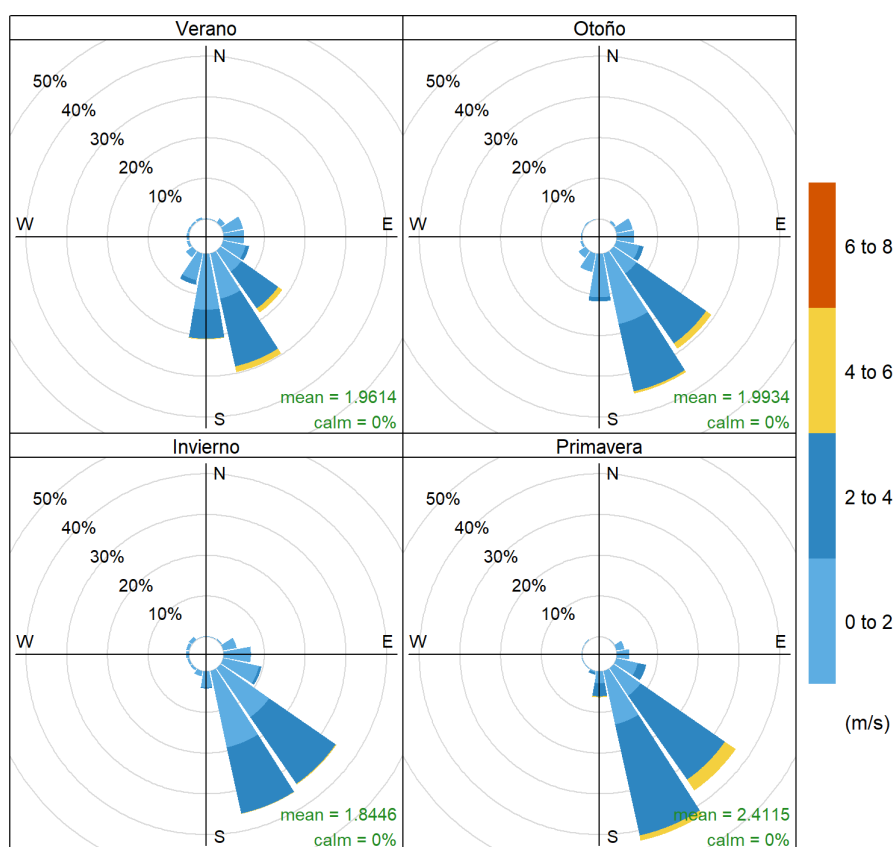
En la figura 25 se presentan las rosas de viento estacionales registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025, las cuales muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento para cada estación del año. Se observa que durante todas las estaciones predominan los vientos provenientes de los sectores sur y sur-sureste, evidenciando un patrón relativamente constante de circulación atmosférica en el área de estudio. Sin embargo, la frecuencia de ocurrencia y la dispersión de las direcciones del viento presentan variaciones estacionales.

Durante el verano se vió que la velocidad media del viento de 1.96 m/s, predominando los vientos procedentes de los sectores sur y sur-sureste. En otoño se observa una distribución similar de las direcciones del viento, con una velocidad media de 1.99 m/s. Por su parte, el invierno presentó la menor velocidad media del año (1.84 m/s), acompañado de una mayor

concentración de frecuencias hacia el sector sur-sureste. Finalmente, durante la primavera se registró la mayor velocidad media del año (2.41 m/s), observándose la dirección predominante más marcada del periodo, concentrada principalmente hacia el sector sur-sureste.

De acuerdo con la clasificación de velocidad del viento establecida en la operacionalización de variables de la investigación, las mayores frecuencias corresponden a vientos de categoría flojo (1.7–5.6 m/s). Asimismo, se observa una limitada ocurrencia de vientos en calma (<1.39 m/s), mientras que las categorías moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s) no presentan una frecuencia significativa durante el periodo evaluado.

**Figura 25:** Rosas de viento estacionales que muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Chimbote durante el año 2025



Frequency of counts by wind direction (%)

*Nota:* La longitud de cada segmento representa la frecuencia relativa (%) de ocurrencia del viento según su dirección. Los colores indican intervalos de velocidad del viento expresados en m/s. Para la interpretación de la velocidad del viento se consideró la clasificación establecida en la operacionalización de variables: calma (<1.39 m/s), flojo (1.7–5.6 m/s),

*moderado (5.8–11.1 m/s), fuerte (11.4–19.4 m/s), muy fuerte (19.7–33.3 m/s) y huracanado (>33.3 m/s).*

En conjunto, los resultados evidencian que la circulación atmosférica en el distrito de Chimbote durante el año 2025 estuvo dominada por vientos procedentes de los sectores sur y sur-sureste, asociados principalmente a velocidades clasificadas como flojas. Estas condiciones podrían influir en los procesos de transporte atmosférico observados en la zona de estudio.

### 4.3 Prueba de hipótesis

#### 4.3.1 Relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2024

En la tabla 15 se presentan los valores promedio mensuales de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , así como de las variables meteorológicas velocidad del viento (WS), dirección del viento (WD), temperatura y humedad relativa, registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024. Estos valores constituyen la base para la evaluación estadística de la relación entre las condiciones meteorológicas y los contaminantes atmosféricos presentes en el área de estudio.

**Tabla 15:** Promedios mensuales de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y variables meteorológicas (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa) en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Mes               | WS<br>m/s | WD<br>(°) | $PM_{10}$<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $PM_{2.5}$<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $SO_2$<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $H_2S$<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Temperatura<br>°C | Humedad<br>% |
|-------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------|
| <b>Enero</b>      | 2.55      | 185.34    | 23.45                                 | 13.91                                  | 10.28                              | -                                  | 23.74             | 77.2         |
| <b>Febrero</b>    | 2.26      | 188.37    | 26.3                                  | 16.14                                  | 9.31                               | 12.45                              | 24.96             | 75.58        |
| <b>Marzo</b>      | 2.31      | 172.68    | 25.8                                  | 19.87                                  | 7.99                               | 10.37                              | 23.28             | 79.4         |
| <b>Abril</b>      | 2.35      | 177.53    | 21.72                                 | 15.48                                  | 33.61                              | 15.6                               | 21.32             | 80.24        |
| <b>Mayo</b>       | 2.42      | 143.74    | 17.91                                 | 14.64                                  | 70.13                              | 13.9                               | 18.31             | 84.72        |
| <b>Junio</b>      | 1.62      | 175.84    | 19.88                                 | 16.31                                  | 15.74                              | 11.84                              | 17.14             | 81.82        |
| <b>Julio</b>      | -         | -         | 21.93                                 | 16.9                                   | 6.04                               | 7.26                               | -                 | -            |
| <b>Agosto</b>     | -         | -         | 19.56                                 | 15.88                                  | 5.49                               | 5.95                               | -                 | -            |
| <b>Septiembre</b> | 2.13      | 140.32    | 16.55                                 | 13.12                                  | 8                                  | 8.65                               | 17.38             | 83.18        |
| <b>Octubre</b>    | 2.19      | 138.16    | 16.18                                 | 13.28                                  | 6.53                               | 8.48                               | 17.81             | 83.1         |
| <b>Noviembre</b>  | 2.09      | 145       | 21.19                                 | 16.89                                  | 42.52                              | 10.38                              | 19.57             | 79.33        |
| <b>Diciembre</b>  | 2.42      | 150.79    | 16.43                                 | 14.79                                  | 78.18                              | 15.91                              | 20.17             | 80.27        |
| <b>Promedio</b>   | 2.23      | 161.78    | 20.58                                 | 15.6                                   | 24.48                              | 10.98                              | 20.37             | 80.48        |

**a) Prueba de normalidad para los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) para el año 2024**

Para la estimar si los datos registrados para los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) siguen una distribución normal, se empleó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ( $n < 50$ ), considerando los promedios mensuales obtenidos durante el periodo de observación 2024. Asimismo, se realizó la evaluación de la distribución de las variables meteorológicas empleadas en el análisis correlacional. Para ello se consideraron los supuestos que a continuación se detalla:

**H<sub>0</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas siguen una distribución normal durante el año 2024.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas no siguen una distribución normal durante el año 2024.

**Tabla 16:** Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Variables         |                   | Estadístico | Shapiro-Wilk<br>gl | Sig.  |
|-------------------|-------------------|-------------|--------------------|-------|
| WS                | m/s               | 0.879       | 10                 | 0.127 |
| WD                | (°)               | 0.863       | 10                 | 0.082 |
| PM <sub>10</sub>  | µg/m <sup>3</sup> | 0.934       | 12                 | 0.424 |
| PM <sub>2.5</sub> | µg/m <sup>3</sup> | 0.937       | 12                 | 0.455 |
| SO <sub>2</sub>   | µg/m <sup>3</sup> | 0.742       | 12                 | 0.002 |
| H <sub>2</sub> S  | µg/m <sup>3</sup> | 0.961       | 11                 | 0.779 |
| Temperatura       | °C                | 0.913       | 10                 | 0.305 |
| Humedad           | %                 | 0.971       | 10                 | 0.896 |

*Nota:* Valores de significancia mayores a 0.05 indican que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad; valores inferiores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal.

Los resultados que se obtuvieron luego de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk muestran que las variables de dirección y velocidad del viento, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, H<sub>2</sub>S, temperatura y humedad relativa presentan valores de significancia superiores a 0.05, por ello no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En contraste, el contaminante SO<sub>2</sub> registró un valor de significancia de 0.002, inferior a 0.05, indicando que sus datos no presentan una distribución normal para el periodo evaluado.

En consecuencia, debido a que una de las variables analizadas no cumple el supuesto de normalidad, se decidió emplear el coeficiente de correlación de rangos de Spearman para

que se evalúe la relación entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos durante el año 2024, acorde a los criterios establecidos en la metodología de la investigación.

**b) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas para el año 2024**

Debido a que la prueba de normalidad evidenció que no todas las variables evaluadas presentan una distribución normal, se procedió a realizar el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas para el año 2024. Por ello se plantearon éstos supuestos estadísticos:

**H<sub>0</sub>:** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas durante el año 2024.

**H<sub>1</sub>:** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas durante el año 2024.

**Tabla 17:** Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas mensuales en el distrito de Chimbote durante el año 2024

| Muestra1          | Muestra2    | Correlación ( $\rho$ ) | Valor_p | Interpretación    |
|-------------------|-------------|------------------------|---------|-------------------|
| PM <sub>10</sub>  | WS          | 0.152                  | 0.676   | Muy baja positiva |
| PM <sub>10</sub>  | WD          | 0.818                  | 0.004   | Alta positiva     |
| PM <sub>10</sub>  | Temperatura | 0.758                  | 0.011   | Alta positiva     |
| PM <sub>10</sub>  | Humedad     | -0.794                 | 0.006   | Alta negativa     |
| PM <sub>2.5</sub> | WS          | -0.273                 | 0.446   | Baja negativa     |
| PM <sub>2.5</sub> | WD          | 0.43                   | 0.214   | Moderada positiva |
| PM <sub>2.5</sub> | Temperatura | 0.285                  | 0.425   | Baja positiva     |
| PM <sub>2.5</sub> | Humedad     | -0.503                 | 0.138   | Moderada negativa |
| SO <sub>2</sub>   | WS          | 0.297                  | 0.405   | Baja positiva     |
| SO <sub>2</sub>   | WD          | 0.103                  | 0.777   | Muy baja positiva |
| SO <sub>2</sub>   | Temperatura | -0.018                 | 0.96    | Muy baja negativa |
| SO <sub>2</sub>   | Humedad     | 0.067                  | 0.855   | Muy baja positiva |
| H <sub>2</sub> S  | WS          | 0.617                  | 0.077   | Moderada positiva |
| H <sub>2</sub> S  | WD          | 0.55                   | 0.125   | Moderada positiva |
| H <sub>2</sub> S  | Temperatura | 0.383                  | 0.308   | Baja positiva     |
| H <sub>2</sub> S  | Humedad     | -0.15                  | 0.7     | Muy baja negativa |

*Nota:*  $p$ : coeficiente de correlación de Spearman. Se consideró significancia estadística cuando  $p < 0.05$ . Se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) si  $p < 0.05$  y se acepta la hipótesis nula si  $p \geq 0.05$ . La magnitud de la correlación se interpretó según los siguientes rangos: muy baja ( $|\rho| = 0.01$ –

0.19), *baja* ( $|\rho| = 0.20-0.39$ ), *moderada* ( $|\rho| = 0.40-0.69$ ), *alta* ( $|\rho| = 0.70-0.89$ ) y *muy alta* ( $|\rho| = 0.90-0.99$ ).

En la tabla 17 se presenta la correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

El PM<sub>10</sub> fue el único contaminante que presentó correlaciones estadísticamente significativas con algunas de las variables meteorológicas evaluadas. Se observó una correlación alta positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.818$ ;  $p = 0.004$ ) y con la temperatura ( $\rho = 0.758$ ;  $p = 0.011$ ), así como una correlación alta negativa con la humedad relativa ( $\rho = -0.794$ ;  $p = 0.006$ ).

Asimismo, se observa una correlación baja negativa entre PM<sub>2.5</sub> y la velocidad del viento ( $\rho = -0.273$ ;  $p > 0.05$ ); correlación moderada positiva entre PM<sub>2.5</sub> y la dirección del viento ( $\rho = 0.430$ ;  $p > 0.05$ ); correlación baja positiva entre PM<sub>2.5</sub> y la temperatura ( $\rho = 0.285$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación moderada negativa entre PM<sub>2.5</sub> y la humedad relativa ( $\rho = -0.503$ ;  $p > 0.05$ ). Ninguna de las correlaciones obtenidas para PM<sub>2.5</sub> presentó significancia estadística ( $p > 0.05$ ).

Por su parte, el SO<sub>2</sub> presentó una correlación baja positiva con la velocidad del viento ( $\rho = 0.297$ ;  $p > 0.05$ ); correlación muy baja positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.103$ ;  $p > 0.05$ ); correlación muy baja negativa con la temperatura ( $\rho = -0.018$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación muy baja positiva con la humedad relativa ( $\rho = 0.067$ ;  $p > 0.05$ ). Ninguna de las correlaciones entre SO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas evaluadas resultó estadísticamente significativa ( $p > 0.05$ ).

En cuanto al H<sub>2</sub>S, se identificó una correlación moderada positiva con la velocidad del viento ( $\rho = 0.617$ ;  $p > 0.05$ ); correlación moderada positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.550$ ;  $p > 0.05$ ); correlación baja positiva con la temperatura ( $\rho = 0.383$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación muy baja negativa con la humedad relativa ( $\rho = -0.150$ ;  $p > 0.05$ ). Aunque el H<sub>2</sub>S presentó correlaciones moderadas con la dirección y velocidad del viento, ninguna de estas relaciones alcanzó significancia estadística ( $p > 0.05$ ).

Considerando el nivel de significancia estadística ( $p < 0.05$ ), únicamente se identificaron relaciones significativas entre PM<sub>10</sub> y la dirección del viento, PM<sub>10</sub> y la temperatura, así como entre PM<sub>10</sub> y la humedad relativa. Las demás correlaciones presentaron

valores de  $p$  superiores a 0.05, por lo que no evidencian una relación estadísticamente significativa durante el periodo evaluado.

En conjunto, los resultados evidencian que el  $PM_{10}$  fue el único contaminante que presentó relaciones estadísticamente significativas con variables meteorológicas durante el año 2024. Las correlaciones observadas sugieren que la dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa estuvieron asociadas con la variación temporal de este contaminante. En contraste,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  no mostraron correlaciones estadísticamente significativas con las variables meteorológicas evaluadas, debido a que los valores de significancia obtenidos fueron superiores a 0.05.

### **c) Análisis de la influencia de las variables meteorológicas sobre la concentración de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) para el año 2024**

La figura 26 muestra las gráficas polares de las concentraciones de  $PM_{10}$  en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2024. En la gráfica polar de  $PM_{10}$  versus temperatura (A), se muestra que las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  se registran principalmente a temperaturas comprendidas entre 20 y 25 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes del sector este. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 35  $\mu g/m^3$  y se concentran en dicha dirección predominante.

La gráfica polar de humedad relativa versus  $PM_{10}$  (B) deja ver que las altas concentraciones de  $PM_{10}$  se presentan principalmente bajo condiciones de humedad relativa entre 60 y 70 %, provenientes del sector este. Por otro lado, las menores concentraciones se observan a mayores valores de humedad relativa y en sectores diferentes al este.

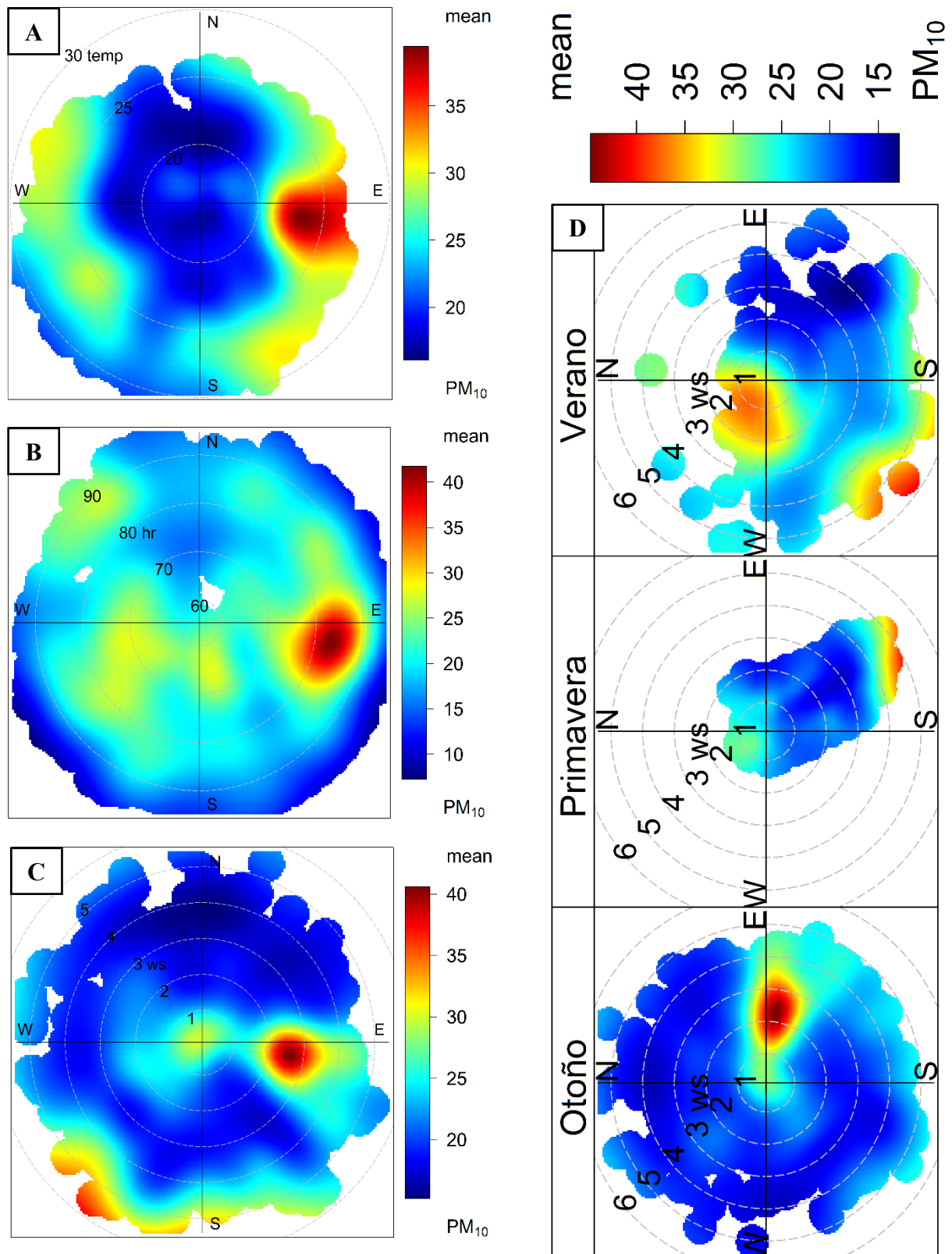
En la gráfica polar de  $PM_{10}$  versus velocidad del viento (C), se evidencia que las altas concentraciones del contaminante son para velocidades de viento cercanas a 1 m/s, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes del sector este. Mientras que la velocidad del viento aumenta, las concentraciones tienden a disminuir, por ello sugiere una mayor dispersión atmosférica del material particulado.

Respecto al comportamiento estacional (D), se muestra que las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  se registran principalmente durante los meses de marzo-abril-mayo, temporada de otoño, donde se identifican valores superiores a 40  $\mu g/m^3$  asociados a corrientes provenientes del sector este. Asimismo, durante el verano (diciembre-enero-febrero) se

presentan concentraciones relativamente elevadas en comparación con la primavera, mientras que esta última estación muestra una distribución más localizada y concentraciones menores. La estación de invierno no se representa debido a la insuficiencia de registros meteorológicos disponibles para los meses que la conforman durante el periodo evaluado.

Los resultados observados en las gráficas polares son consistentes con el análisis de correlación de Spearman realizado previamente, donde  $PM_{10}$  presentó una correlación alta positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.818$ ;  $p = 0.004$ ) y la temperatura ( $\rho = 0.758$ ;  $p = 0.011$ ), tal como una correlación alta negativa con la humedad relativa ( $\rho = -0.794$ ;  $p = 0.006$ ), evidenciando una asociación importante entre estas variables meteorológicas y la variación de las concentraciones de  $PM_{10}$  durante el año 2024.

**Figura 26:** Gráficas polares de  $PM_{10}$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



La figura 27 muestra las gráficas polares de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2024. En la gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus temperatura (A), se observa que las mayores concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se registran principalmente a temperaturas entre 20 y 25 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes del sector este. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 30 µg/m<sup>3</sup> y se encuentran concentradas en dicha dirección predominante.

La gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus humedad relativa (B) deja ver que las altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se presentan principalmente bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 60 y 70 %, asociadas a corrientes de aire provenientes del sector este. Por otro lado, las menores concentraciones se observan en condiciones de mayor humedad relativa y en direcciones distintas al este.

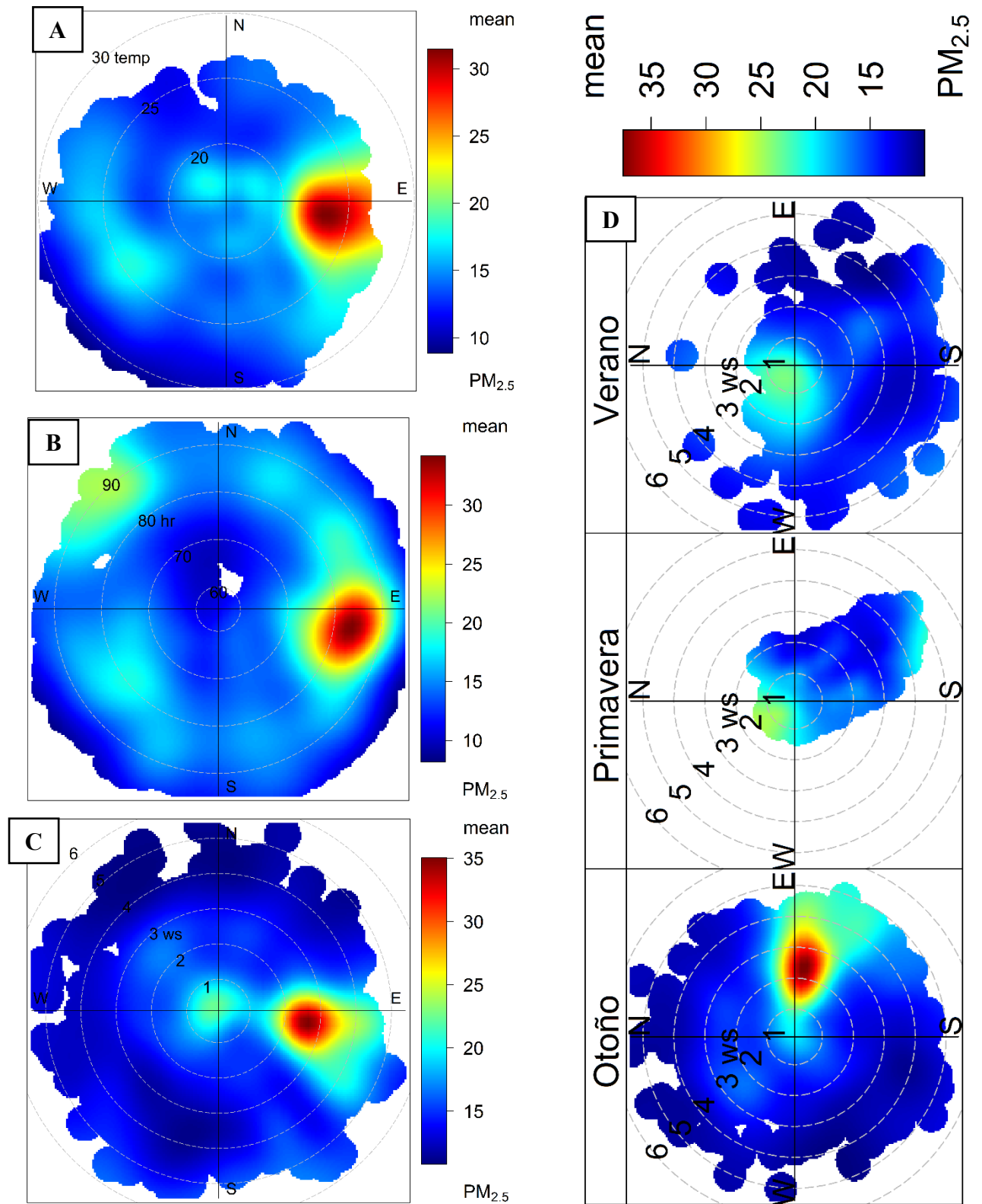
En la gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus velocidad del viento (C), se evidencia que las concentraciones tienden a disminuir, observándose valores más bajos bajo condiciones de mayores velocidades del viento, provenientes principalmente del sector este. A medida que aumenta la velocidad del viento, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tienden a disminuir, observándose valores más bajos bajo condiciones de mayores velocidades del viento.

Respecto al comportamiento estacional (D), se muestra que las altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se registran durante los meses de marzo-abril-mayo, temporada de otoño; donde se identifican valores superiores a 30 µg/m<sup>3</sup> asociados principalmente a corrientes provenientes del sector este. Asimismo, durante el verano (diciembre-enero-febrero) se presentan concentraciones moderadas, mientras que en primavera (septiembre-octubre-noviembre) las concentraciones muestran una distribución más localizada y valores relativamente menores. La estación de invierno no se representa debido a la insuficiencia de registros meteorológicos disponibles durante los meses que la conforman.

Si bien las gráficas polares evidencian patrones espaciales asociados principalmente al sector este y determinadas condiciones meteorológicas, los resultados del análisis de correlación de Spearman indicaron que las relaciones entre PM<sub>2.5</sub> y las variables meteorológicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). Por lo tanto, aunque visualmente se observan concentraciones más elevadas bajo ciertas condiciones de humedad relativa, velocidad del viento y temperatura, no existe evidencia estadística suficiente para establecer una relación estadísticamente significativa entre las variables meteorológicas

evaluadas y las concentraciones de  $PM_{2.5}$  durante el año 2024, pese a los patrones espaciales observados en las gráficas polares.

**Figura 27:** Gráficas polares de  $PM_{2.5}$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



La figura 28 deja ver las gráficas polares de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2024. En la gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus temperatura (A), se muestra que las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se registran principalmente a temperaturas cercanas a 20 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes de los sectores norte-noroeste y sur-sureste. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 100 µg/m<sup>3</sup> y se encuentran concentradas en dichas direcciones.

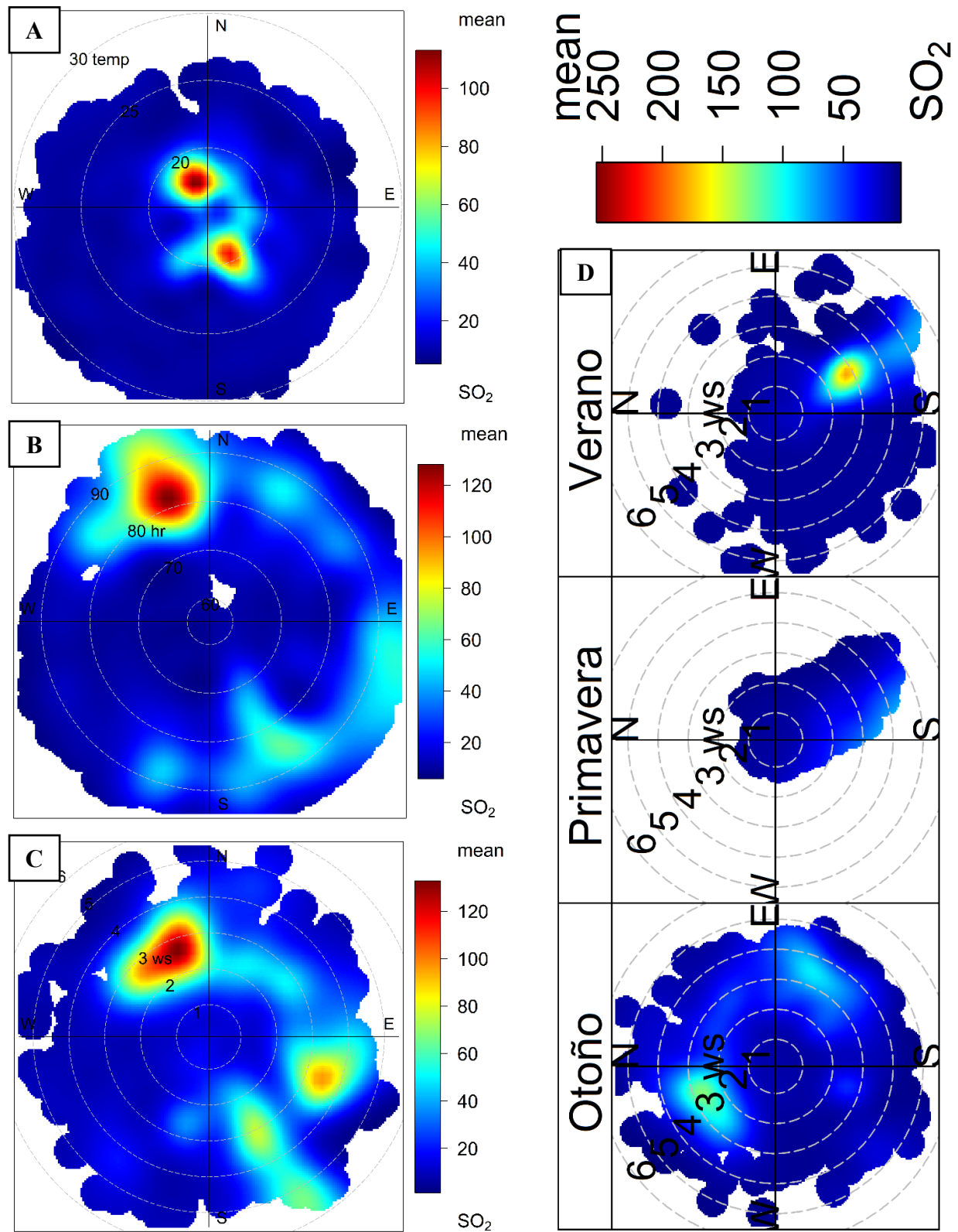
La gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus humedad relativa (B) deja ver que las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 80 y 90 %, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes del sector noroeste. Por el contrario, en las demás direcciones y rangos de humedad predominan concentraciones relativamente menores.

En la gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus velocidad del viento (C), se identifican las mayores concentraciones del contaminante para velocidades de viento comprendidas entre 3 y 4 m/s provenientes del sector noroeste, así como un segundo foco de concentraciones elevadas asociado a velocidades cercanas a 2 m/s provenientes del sector este-sureste. Las concentraciones máximas alcanzan valores superiores a 120 µg/m<sup>3</sup> en estas condiciones.

Respecto al comportamiento estacional (D), se contempla que las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> se registran durante los meses de diciembre-enero-febrero, es decir en verano, donde se identifican valores elevados asociados principalmente a corrientes provenientes del sector este. Durante el otoño (marzo-abril-mayo) se observa una distribución más amplia de las concentraciones, mientras que en primavera (septiembre-octubre-noviembre) se presentan concentraciones relativamente menores y más localizadas. Por otro lado, la estación de invierno no se representa debido a la insuficiencia de registros válidos disponibles para la construcción de la superficie polar correspondiente.

Si bien las gráficas polares evidencian patrones espaciales asociados a determinadas condiciones meteorológicas y direcciones predominantes del viento, dichos patrones no fueron corroborados mediante relaciones estadísticamente significativas en el análisis de correlación. En consecuencia, no existe evidencia estadística suficiente para afirmar una relación significativa entre la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y las concentraciones de SO<sub>2</sub> durante el año 2024.

**Figura 28:** Gráficas polares de  $\text{SO}_2$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



La figura 29 muestra las gráficas polares de las concentraciones de H<sub>2</sub>S en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2024. En la gráfica polar de H<sub>2</sub>S versus temperatura (A), se muestra que las altas concentraciones de H<sub>2</sub>S se registran principalmente a temperaturas cercanas a 20 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes de los sectores oeste-noroeste y sur. Las máximas concentraciones superan los 20 µg/m<sup>3</sup> y se concentran en dichas direcciones.

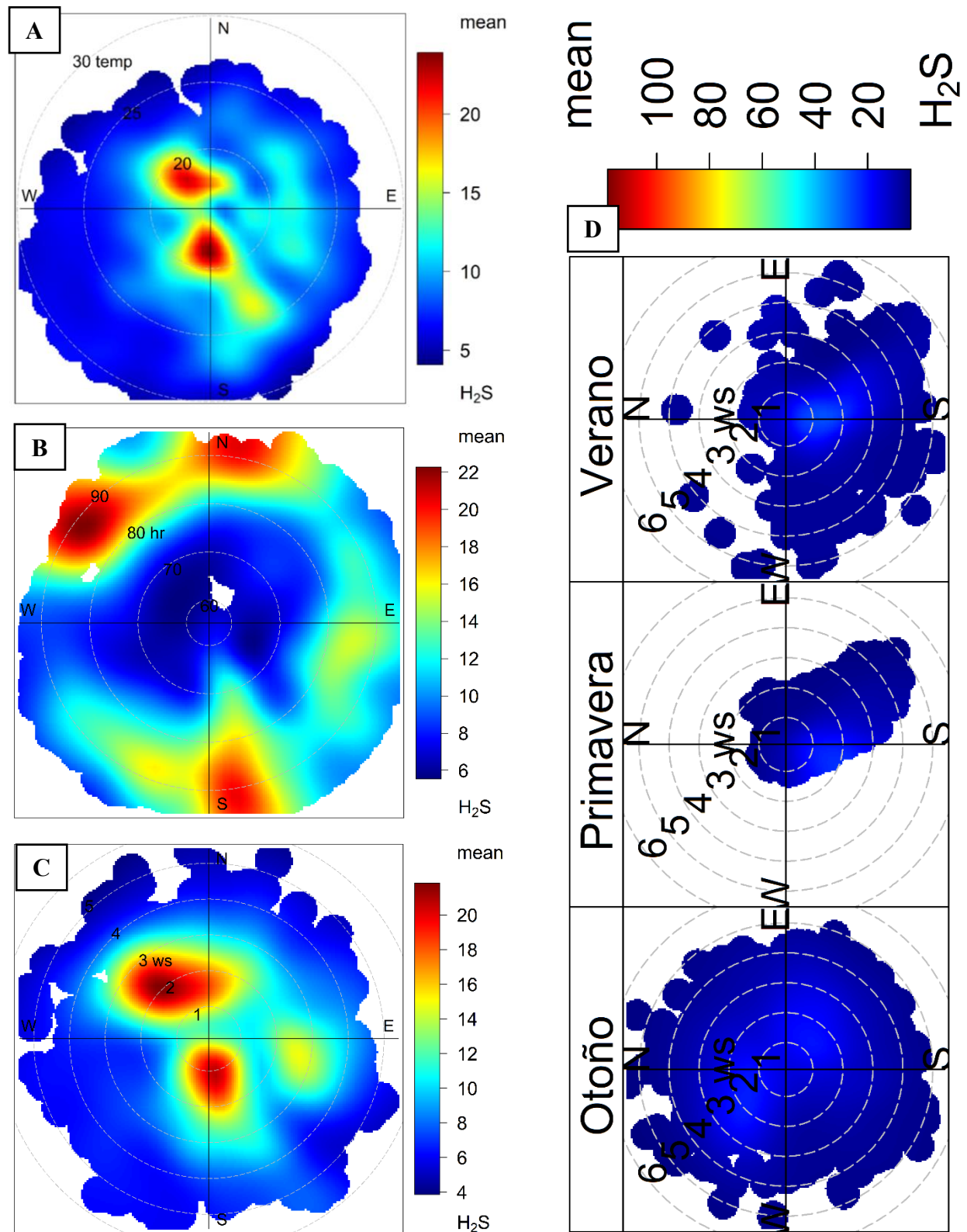
La gráfica polar de H<sub>2</sub>S versus humedad relativa (B) deja ver que las altas concentraciones de H<sub>2</sub>S se presentan bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 85 y 95 %, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes de los sectores norte y noroeste. Asimismo, se observa una zona secundaria de concentraciones elevadas asociada al sector sur bajo condiciones similares de humedad.

En la gráfica polar de H<sub>2</sub>S versus velocidad del viento (C), las altas concentraciones del contaminante se registran para velocidades de viento comprendidas entre 2 y 3 m/s provenientes del sector noroeste. De manera similar, se observa un segundo núcleo de concentraciones elevadas asociado a velocidades cercanas a 1 y 2 m/s provenientes del sector sur. Las concentraciones máximas alcanzan aproximadamente entre 20 y 22 µg/m<sup>3</sup> bajo estas condiciones.

Respecto al comportamiento estacional (D), se observa que las concentraciones de H<sub>2</sub>S presentan una distribución más amplia durante los meses de marzo-abril-mayo, la estación de otoño, mientras que en primavera (septiembre-octubre-noviembre) las concentraciones se encuentran más localizadas. Durante el verano (diciembre-enero-febrero) se identifican algunos focos aislados de concentración asociados principalmente al sector este. Por otro lado, la estación de invierno no se representa debido a la insuficiencia de registros válidos disponibles para la construcción de la superficie polar correspondiente.

Si bien las gráficas polares evidencian algunos patrones espaciales asociados a determinadas condiciones meteorológicas y direcciones de viento, los resultados del análisis de correlación de Spearman indicaron que las relaciones entre H<sub>2</sub>S y las variables meteorológicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). Por ello, no existe evidencia estadística suficiente para establecer una asociación estadísticamente significativa entre las variables meteorológicas evaluadas y las concentraciones de H<sub>2</sub>S durante el año 2024.

**Figura 29:** Gráficas polares de  $H_2S$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2024



#### 4.3.2 Relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2025

En la tabla 18 se presentan los valores promedio mensuales de los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , así como de las variables meteorológicas velocidad del viento (WS), dirección del viento (WD), temperatura y humedad relativa, registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025. Estos valores constituyen la base para la evaluación estadística de la relación entre las condiciones meteorológicas y los contaminantes atmosféricos presentes en el área de estudio.

**Tabla 18:** Promedios mensuales de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y variables meteorológicas (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa) en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Mes        | WS<br>m/s | WD<br>(°) | $PM_{10}$<br>$\mu g/m^3$ | $PM_{2.5}$<br>$\mu g/m^3$ | $SO_2$<br>$\mu g/m^3$ | $H_2S$<br>$\mu g/m^3$ | Temperatura<br>°C | Humedad<br>% |
|------------|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| Enero      | 2.06      | 149.98    | 8.22                     | 7.7                       | 52.71                 | 16.32                 | 21.59             | 79.92        |
| Febrero    | 1.64      | 144.08    | 14.92                    | 10.27                     | 4.32                  | 14.13                 | 23.7              | 78.98        |
| Marzo      | 1.83      | 151.89    | 20.85                    | 16.57                     | 2.64                  | 12.42                 | 23.12             | 77.45        |
| Abril      | 2.12      | 150.82    | 13.53                    | 11.95                     | 13.42                 | 7.01                  | 20.4              | 81.97        |
| Mayo       | 2.07      | 140.92    | 12.44                    | 12.39                     | 53.85                 | 8.67                  | 19.1              | 83.18        |
| Junio      | 1.93      | 143.1     | 13.43                    | 11.53                     | 14.99                 | 7.18                  | 19.88             | 82.48        |
| Julio      | 1.58      | 147.11    | 13.12                    | 12.13                     | 12.01                 | 6.28                  | 18.78             | 80.8         |
| Agosto     | 2.02      | 139.51    | 12.7                     | 10.96                     | 6.76                  | 4.83                  | 17.79             | 81.76        |
| Septiembre | 2.09      | 140.5     | 12.94                    | 11.1                      | 6.72                  | 4.45                  | 17.18             | 82.46        |
| Octubre    | 2.54      | 142.51    | 11.9                     | 10.51                     | 7.27                  | 4.63                  | 18.34             | 81.96        |
| Noviembre  | 2.61      | 148.37    | -                        | -                         | 38.77                 | 7.79                  | 18.78             | 80.26        |
| Diciembre  | 2.15      | 167.06    | 15.81                    | 12.88                     | 21.86                 | 11.11                 | 20.05             | 80.19        |
| Promedio   | 2.05      | 147.15    | 13.62                    | 11.64                     | 19.61                 | 8.73                  | 19.89             | 80.95        |

##### a) Prueba de normalidad para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ , $SO_2$ y $H_2S$ ) para el año 2025

Para estimar si los datos registrados para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) tienen una distribución normal, se empleó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ( $n < 50$ ), considerando los promedios mensuales obtenidos durante el periodo de observación 2025. Asimismo, se estimó la distribución de las variables meteorológicas empleadas en el análisis correlacional. Para ello se consideraron los siguientes supuestos:

**H<sub>0</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas siguen una distribución normal durante el año 2025.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas no siguen una distribución normal durante el año 2025.

**Tabla 19:** Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Variables               |                         | Estadístico | Shapiro-Wilk |       |
|-------------------------|-------------------------|-------------|--------------|-------|
|                         |                         |             | gl           | Sig.  |
| <b>WS</b>               | <b>m/s</b>              | 0.929       | 12           | 0.369 |
| <b>WD</b>               | <b>(°)</b>              | 0.836       | 12           | 0.025 |
| <b>PM<sub>10</sub></b>  | <b>µg/m<sup>3</sup></b> | 0.879       | 11           | 0.101 |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>µg/m<sup>3</sup></b> | 0.911       | 11           | 0.248 |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | <b>µg/m<sup>3</sup></b> | 0.798       | 12           | 0.009 |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>   | <b>µg/m<sup>3</sup></b> | 0.908       | 12           | 0.204 |
| <b>Temperatura</b>      | <b>°C</b>               | 0.932       | 12           | 0.402 |
| <b>Humedad</b>          | <b>%</b>                | 0.941       | 12           | 0.516 |

*Nota:* Valores de significancia mayores a 0.05 indican que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad; valores inferiores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal.

Los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk muestran que las variables velocidad del viento,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $H_2S$ , temperatura y humedad relativa presentan valores de significancia superiores a 0.05, por ello no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Sin embargo, la dirección del viento (WD) registró un valor de significancia de 0.025 y el contaminante  $SO_2$  un valor de significancia de 0.009, ambos inferiores a 0.05, indicando que dichas variables no presentan una distribución normal para el periodo evaluado.

En consecuencia, debido a que al menos una de las variables evaluadas no cumple el supuesto de normalidad, se optó por emplear el coeficiente de correlación de rangos de Spearman para evaluar la relación entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos durante el año 2025, conforme a los criterios establecidos en la metodología de la investigación.

#### **b) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas para el año 2025**

Debido a que la prueba de normalidad evidenció que no todas las variables evaluadas presentan una distribución normal, se procedió a realizar el análisis de correlación de Spearman

entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas para el año 2025. Para ello se plantearon los siguientes supuestos estadísticos:

**H<sub>0</sub>:** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas durante el año 2025.

**H<sub>1</sub>:** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas durante el año 2025.

**Tabla 20:** Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas mensuales en el distrito de Chimbote durante el año 2025

| Muestra1          | Muestra2    | Correlación | Valor_p | Interpretación    |
|-------------------|-------------|-------------|---------|-------------------|
| PM <sub>10</sub>  | WS          | -0.273      | 0.417   | Baja negativa     |
| PM <sub>10</sub>  | WD          | 0.6         | 0.051   | Moderada positiva |
| PM <sub>10</sub>  | Temperatura | 0.509       | 0.11    | Moderada positiva |
| PM <sub>10</sub>  | Humedad     | -0.4        | 0.223   | Moderada negativa |
| PM <sub>2.5</sub> | WS          | -0.018      | 0.958   | Muy baja negativa |
| PM <sub>2.5</sub> | WD          | 0.418       | 0.201   | Moderada positiva |
| PM <sub>2.5</sub> | Temperatura | 0.055       | 0.873   | Muy baja positiva |
| PM <sub>2.5</sub> | Humedad     | 0.064       | 0.853   | Muy baja positiva |
| SO <sub>2</sub>   | WS          | 0.42        | 0.175   | Moderada positiva |
| SO <sub>2</sub>   | WD          | 0.147       | 0.649   | Muy baja positiva |
| SO <sub>2</sub>   | Temperatura | -0.021      | 0.948   | Muy baja negativa |
| SO <sub>2</sub>   | Humedad     | 0.322       | 0.308   | Baja positiva     |
| H <sub>2</sub> S  | WS          | -0.245      | 0.443   | Baja negativa     |
| H <sub>2</sub> S  | WD          | 0.601       | 0.039   | Moderada positiva |
| H <sub>2</sub> S  | Temperatura | 0.86        | 0       | Alta positiva     |
| H <sub>2</sub> S  | Humedad     | -0.629      | 0.028   | Moderada negativa |

*Nota:*  $\rho$ : coeficiente de correlación de Spearman. Se consideró significancia estadística cuando  $p < 0.05$ . Se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) si  $p < 0.05$  y se acepta la hipótesis nula si  $p \geq 0.05$ . La magnitud de la correlación se interpretó según los siguientes rangos: muy baja ( $|\rho| = 0.01-0.19$ ), baja ( $|\rho| = 0.20-0.39$ ), moderada ( $|\rho| = 0.40-0.69$ ), alta ( $|\rho| = 0.70-0.89$ ) y muy alta ( $|\rho| = 0.90-0.99$ ).

En la tabla 20 se presenta la correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y las variables meteorológicas registradas en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

Se evidencia una correlación baja negativa entre PM<sub>10</sub> y la velocidad del viento ( $\rho = -0.273$ ;  $p > 0.05$ ); correlación moderada positiva entre PM<sub>10</sub> y la dirección del viento ( $\rho = 0.600$ ;

$p > 0.05$ ); correlación moderada positiva entre  $PM_{10}$  y la temperatura ( $\rho = 0.509$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación moderada negativa entre  $PM_{10}$  y la humedad relativa ( $\rho = -0.400$ ;  $p > 0.05$ ).

Asimismo, se observa una correlación muy baja negativa entre  $PM_{2.5}$  y la velocidad del viento ( $\rho = -0.018$ ;  $p > 0.05$ ); correlación moderada positiva entre  $PM_{2.5}$  y la dirección del viento ( $\rho = 0.418$ ;  $p > 0.05$ ); correlación muy baja positiva entre  $PM_{2.5}$  y la temperatura ( $\rho = 0.055$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación muy baja positiva entre  $PM_{2.5}$  y la humedad relativa ( $\rho = 0.064$ ;  $p > 0.05$ ).

Por su parte, el  $SO_2$  presentó una correlación moderada positiva con la velocidad del viento ( $\rho = 0.420$ ;  $p > 0.05$ ); correlación muy baja positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.147$ ;  $p > 0.05$ ); correlación muy baja negativa con la temperatura ( $\rho = -0.021$ ;  $p > 0.05$ ); y correlación baja positiva con la humedad relativa ( $\rho = 0.322$ ;  $p > 0.05$ ).

En cuanto al  $H_2S$ , se identificó una correlación moderada positiva y estadísticamente significativa con la dirección del viento ( $\rho = 0.601$ ;  $p = 0.039$ ), una correlación alta positiva y estadísticamente significativa con la temperatura ( $\rho = 0.860$ ;  $p < 0.001$ ), y una correlación moderada negativa y estadísticamente significativa con la humedad relativa ( $\rho = -0.629$ ;  $p = 0.028$ ). Por el contrario, la relación entre  $H_2S$  y la velocidad del viento no resultó significativa ( $p > 0.05$ ).

Considerando el nivel de significancia estadística establecido ( $p < 0.05$ ), únicamente se identificaron relaciones significativas entre  $H_2S$  y la dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa. Ninguno de los demás contaminantes presentó asociaciones estadísticamente significativas con las variables meteorológicas evaluadas.

En conjunto, los resultados evidencian que las concentraciones de  $H_2S$  presentaron asociaciones estadísticamente significativas con la temperatura, la humedad relativa y la dirección del viento durante el año 2025. Por el contrario,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $SO_2$  no mostraron relaciones estadísticamente significativas con las variables meteorológicas evaluadas, debido a que los valores de significancia obtenidos fueron superiores a 0.05.

### **c) Análisis de la influencia de las variables meteorológicas sobre la concentración de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) para el año 2025**

La figura 30 muestra las gráficas polares de las concentraciones de  $PM_{10}$  en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2025. En la gráfica polar de  $PM_{10}$  versus temperatura (A), se muestra que las

mayores concentraciones de  $PM_{10}$  se registran principalmente a temperaturas cercanas a 25 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes de los sectores oeste y noroeste. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 30  $\mu g/m^3$  y se encuentran concentradas en dichas direcciones predominantes.

La gráfica polar de  $PM_{10}$  versus humedad relativa (B) deja ver que las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  se presentan principalmente bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 70 y 80 %, asociadas a corrientes de aire provenientes de los sectores oeste, suroeste y sur. Por otro lado, las menores concentraciones se observan hacia el sector este y bajo condiciones de humedad relativamente menores.

En la gráfica polar de  $PM_{10}$  versus velocidad del viento (C), se evidencia que las más elevadas concentraciones del contaminante se registran para velocidades de viento comprendidas entre 1 y 2 m/s, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes del sector sur-sureste. Mientras que aumenta la velocidad del viento, las concentraciones tienden a disminuir, observándose una reducción gradual de las concentraciones bajo condiciones de mayores velocidades del viento.

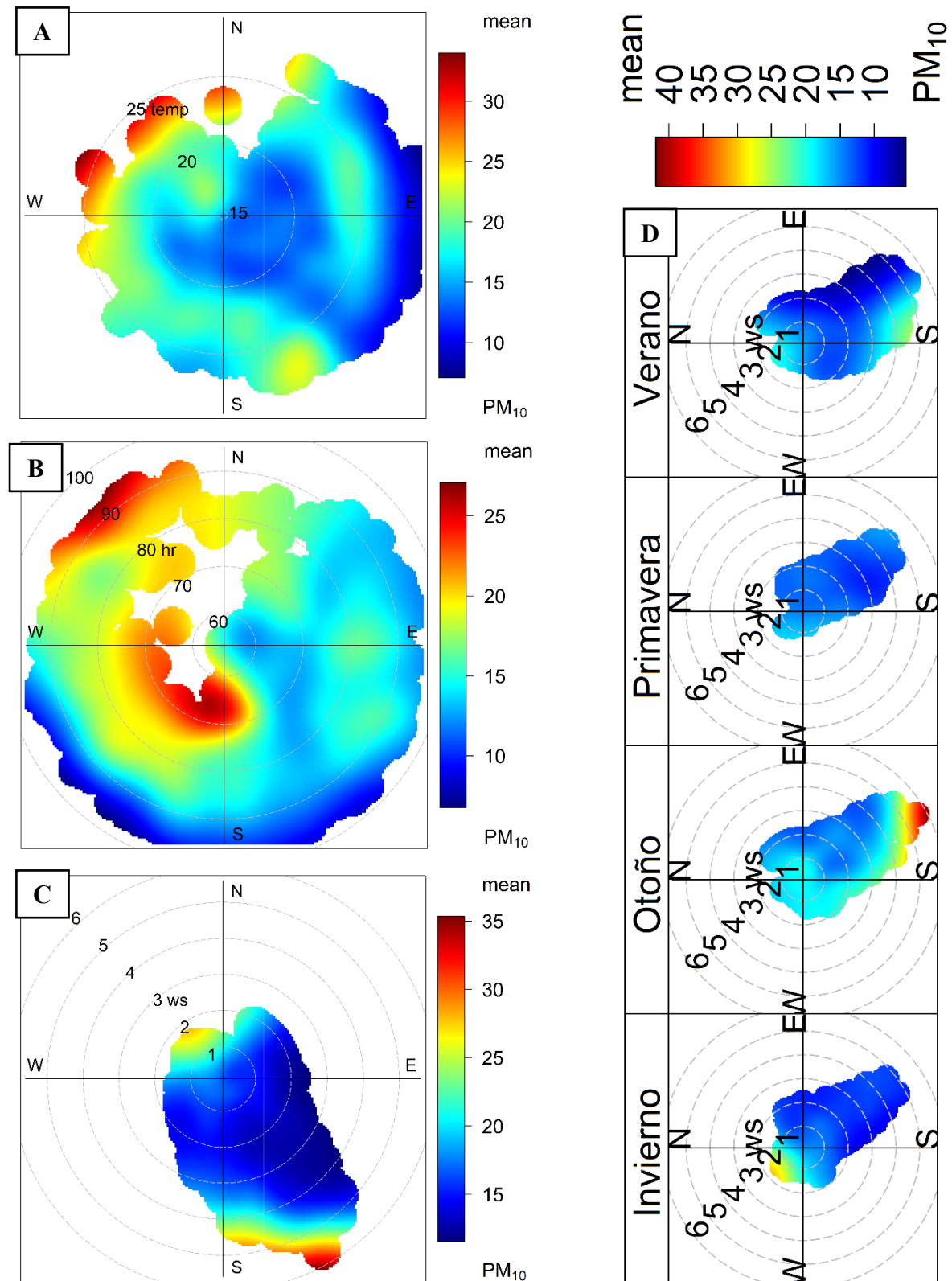
Respecto al comportamiento estacional (D), se deja ver que las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  se registran principalmente durante los meses de marzo-abril-mayo, la estación de otoño, donde se identifican valores superiores a 30  $\mu g/m^3$  asociados a corrientes provenientes del sector sur-sureste. Asimismo, durante el verano (diciembre-enero-febrero) se presentan concentraciones moderadas, mientras que la primavera (septiembre-octubre-noviembre) muestra concentraciones relativamente menores y una distribución más localizada. Por su parte, la estación de invierno (junio-julio-agosto) presenta una menor extensión espacial de las concentraciones, asociada a una menor disponibilidad de registros meteorológicos durante dicho periodo.

Si bien las gráficas polares evidencian ciertos patrones espaciales asociados a determinadas condiciones meteorológicas y direcciones de viento, los resultados del análisis de correlación de Spearman indicaron que las relaciones entre  $PM_{10}$  y las variables meteorológicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). En particular, se observaron correlaciones moderadas entre  $PM_{10}$  y la dirección del viento ( $\rho = 0.600$ ), la temperatura ( $\rho = 0.509$ ) y la humedad relativa ( $\rho = -0.400$ ); sin embargo, dichas relaciones no alcanzaron el nivel de significancia estadística establecido ( $p < 0.05$ ). Por lo tanto, no existe evidencia estadística suficiente para establecer una asociación estadísticamente significativa

entre las variables meteorológicas evaluadas y las concentraciones de  $PM_{10}$  durante el año 2025.

Cabe señalar que la relación entre  $PM_{10}$  y la dirección del viento se tuvo una correlación moderada positiva y un valor de significancia cercano al umbral establecido ( $p = 0.051$ ), aunque sin alcanzar el criterio de significancia estadística adoptado en la investigación.

**Figura 30:** Gráficas polares de  $PM_{10}$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



La figura 31 muestra las gráficas polares de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2025. En la gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus temperatura (A), se muestra que las altas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se registran principalmente a temperaturas cercanas a 25 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes de los sectores oeste y noroeste. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 20 µg/m<sup>3</sup> y se encuentran concentradas en dichas direcciones predominantes.

La gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus humedad relativa (B) deja ver que las mayores concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se presentan bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 80 y 90 %, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes de los sectores oeste y noroeste. Por otro lado, las menores concentraciones se registran hacia el sector este y bajo condiciones de menor humedad relativa.

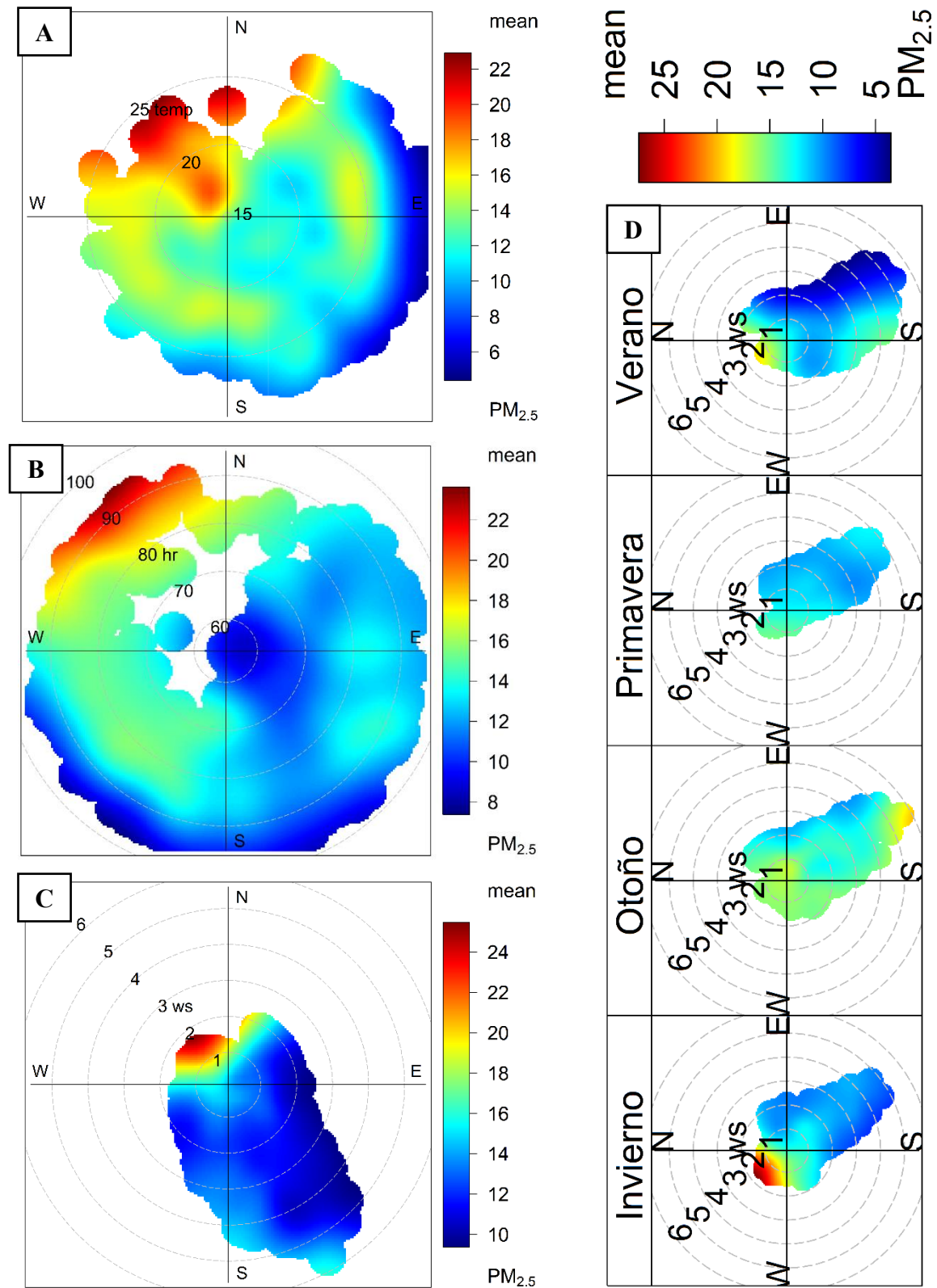
En la gráfica polar de PM<sub>2.5</sub> versus velocidad del viento (C), se evidencia que las mayores concentraciones del contaminante se registran para velocidades de viento cercanas a 2 m/s, provenientes principalmente del sector oeste-noroeste. Mientras que aumenta la velocidad del viento, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> disminuyen, observándose una disminución gradual de las concentraciones bajo condiciones de mayores velocidades del viento.

Respecto al comportamiento estacional (D), se evidencia que las elevadas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se registran durante los meses de marzo-abril-mayo, es decir otoño, donde se identifican valores cercanos a 25 µg/m<sup>3</sup> asociados principalmente a corrientes provenientes del sector sureste. Asimismo, durante el verano (diciembre-enero-febrero) se presentan concentraciones moderadas distribuidas principalmente hacia el sector sureste, mientras que en primavera (septiembre-octubre-noviembre) las concentraciones muestran una distribución más localizada y valores relativamente menores. Por su parte, la estación de invierno (junio-julio-agosto) presenta una menor extensión espacial de las concentraciones, asociada a una menor disponibilidad de registros meteorológicos durante dicho periodo.

Si bien las gráficas polares evidencian patrones espaciales asociados a determinadas condiciones meteorológicas y direcciones de viento, los resultados del análisis de correlación de Spearman indicaron que las relaciones entre PM<sub>2.5</sub> y las variables meteorológicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). En particular, se observaron correlaciones muy bajas entre PM<sub>2.5</sub> y la velocidad del viento ( $\rho = -0.018$ ), la temperatura ( $\rho = 0.055$ ) y la humedad relativa ( $\rho = 0.064$ ), así como una correlación moderada positiva con la dirección del

viento ( $\rho = 0.418$ ); sin embargo, ninguna de estas relaciones alcanzó significancia estadística. Por ello, no hay evidencia estadística adecuada para establecer una asociación estadísticamente significativa entre las variables meteorológicas evaluadas y las concentraciones de  $PM_{2.5}$  durante el año 2025.

**Figura 31:** Gráficas polares de  $PM_{2.5}$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



La figura 32 muestra las gráficas polares de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2025. En la gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus temperatura (A), se muestra que las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se registran principalmente a temperaturas comprendidas entre 15 y 20 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes del sector sur-sureste. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 35 µg/m<sup>3</sup> y se encuentran concentradas en dicha dirección predominante.

La gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus humedad relativa (B) deja ver que las elevadas concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 70 y 80 %, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes de los sectores sur y sur-sureste. Por el contrario, en las demás direcciones y rangos de humedad predominan concentraciones relativamente menores.

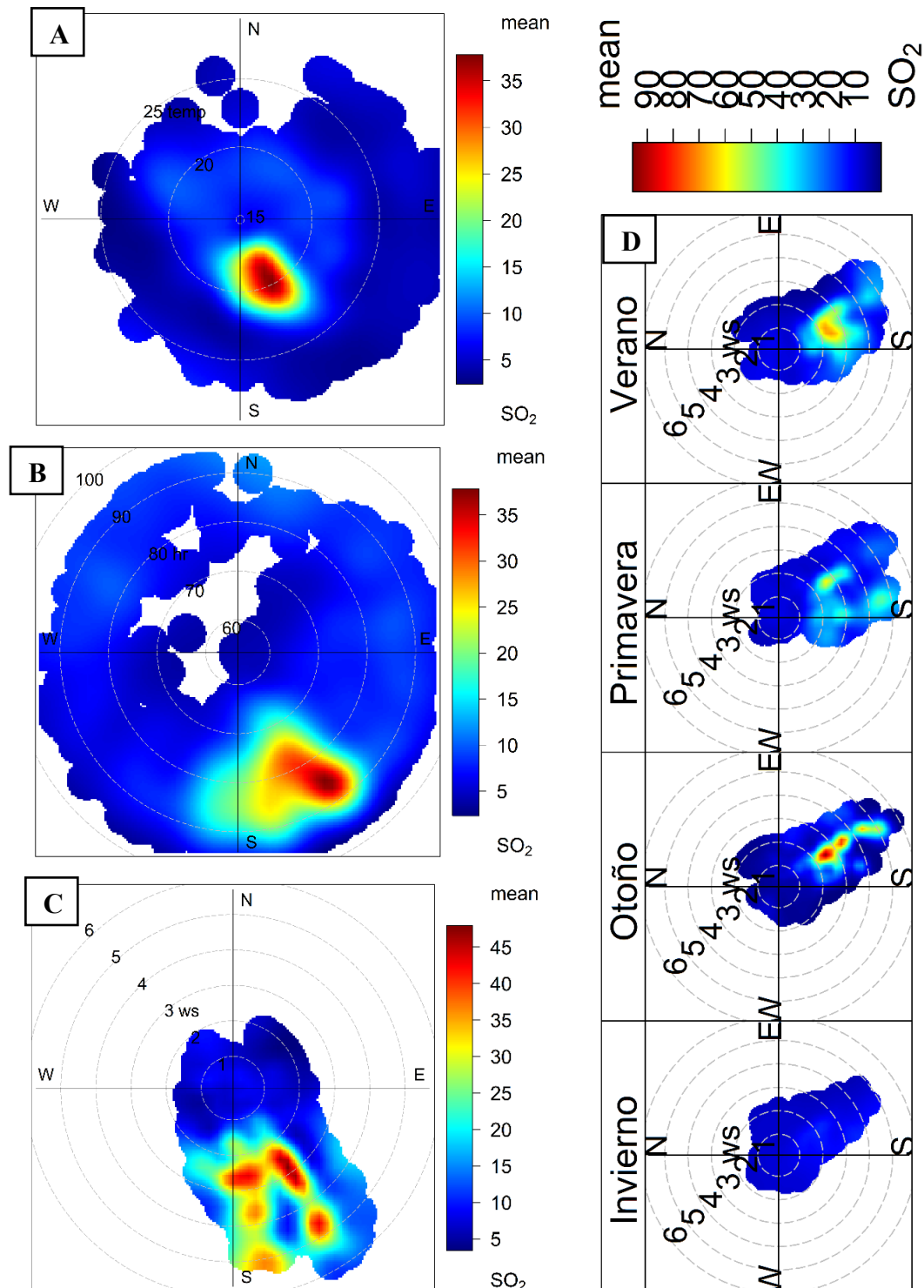
En la gráfica polar de SO<sub>2</sub> versus velocidad del viento (C), se identifican las mayores concentraciones del contaminante para velocidades de viento comprendidas entre 1 y 2 m/s provenientes principalmente de los sectores sur, sur-sureste y sureste. Asimismo, se observan algunos focos secundarios de concentración asociados a velocidades similares, alcanzando valores superiores a 40 µg/m<sup>3</sup> bajo dichas condiciones.

Respecto al comportamiento estacional (D), se muestra que las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> se registran durante los meses de marzo-abril-mayo, la estación de otoño, donde se identifican valores elevados asociados principalmente a corrientes provenientes del sector este-sureste. Durante el verano (diciembre-enero-febrero) se presentan concentraciones moderadas localizadas principalmente hacia el sector sureste, mientras que en primavera (septiembre-octubre-noviembre) las concentraciones son relativamente menores y presentan una distribución más dispersa. Por su parte, durante el invierno (junio-julio-agosto) se observan concentraciones más bajas y una distribución espacial menos extensa en comparación con las demás estaciones.

Si bien las gráficas polares evidencian ciertos patrones espaciales asociados a determinadas condiciones meteorológicas y direcciones de viento, los resultados del análisis de correlación de Spearman indicaron que las relaciones entre SO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). En particular, se vió una correlación moderada positiva entre SO<sub>2</sub> y la velocidad del viento ( $\rho = 0.420$ ), una correlación baja positiva entre SO<sub>2</sub> y la humedad relativa ( $\rho = 0.322$ ), y correlaciones muy

bajas con la dirección del viento ( $p = 0.147$ ) y la temperatura ( $p = -0.021$ ); sin embargo, ninguna de estas relaciones alcanzó significancia estadística. Por ello, no hay evidencia estadística real para establecer una asociación estadísticamente significativa entre las variables meteorológicas evaluadas y las concentraciones de SO<sub>2</sub> durante el año 2025.

**Figura 32:** Gráficas polares de  $\text{SO}_2$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



La figura 33 muestra las gráficas polares de las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  en relación con las variables meteorológicas y el comportamiento estacional en el distrito de Chimbote durante el año 2025. En la gráfica polar de  $\text{H}_2\text{S}$  versus temperatura (A), se muestra que las elevadas

concentraciones de H<sub>2</sub>S se registran principalmente a temperaturas comprendidas entre 15 y 20 °C, asociadas a corrientes de aire provenientes del sector sur-suroeste. Asimismo, las concentraciones más elevadas superan los 35 µg/m<sup>3</sup> y se encuentran concentradas en dicha dirección predominante.

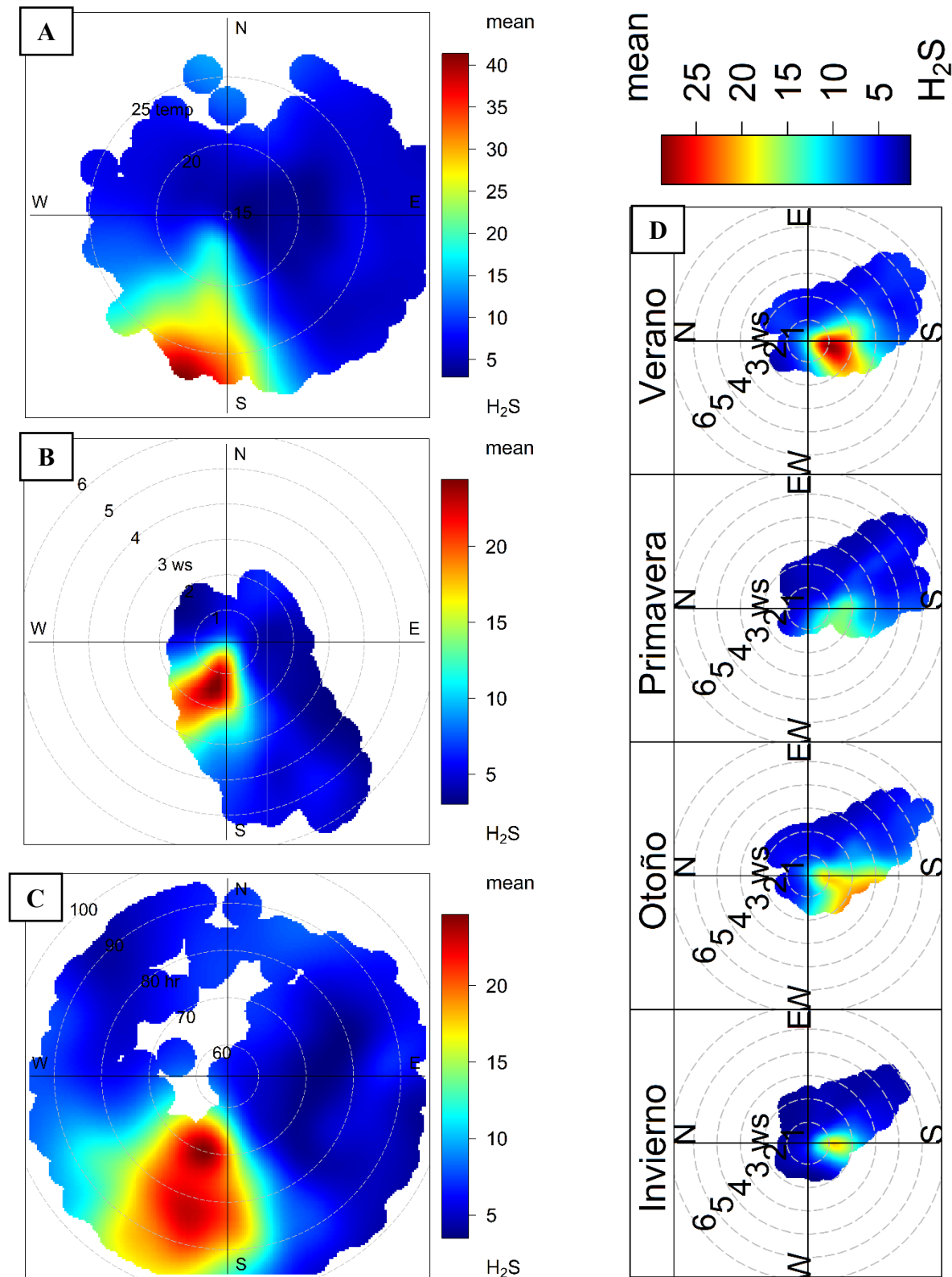
La gráfica polar de H<sub>2</sub>S versus humedad relativa (B) deja ver que las altas concentraciones de H<sub>2</sub>S se presentan bajo condiciones de humedad relativa comprendidas entre 70 y 80 %, asociadas principalmente a corrientes de aire provenientes del sector sur-suroeste. Por otro lado, las concentraciones disminuyen a medida que aumentan los valores de humedad relativa, observándose menores concentraciones bajo condiciones de humedad más elevadas.

En la gráfica polar de H<sub>2</sub>S versus velocidad del viento (C), las elevadas concentraciones del contaminante se registran para velocidades de viento comprendidas entre 1 y 2 m/s, provenientes principalmente del sector suroeste. Mientras que aumenta la velocidad del viento, las concentraciones de H<sub>2</sub>S disminuyen, observándose una disminución gradual de las concentraciones para velocidades de viento más elevadas.

Respecto al comportamiento estacional (D), se observa que las concentraciones de H<sub>2</sub>S presentan una distribución más amplia durante el otoño (marzo-abril-mayo), donde se identifican las mayores concentraciones asociadas principalmente a corrientes provenientes del sector sureste. Durante el verano (diciembre-enero-febrero) también se observan concentraciones relativamente elevadas concentradas en el mismo sector. En primavera (septiembre-octubre-noviembre), las concentraciones presentan una distribución más uniforme y valores moderados, mientras que durante el invierno (junio-julio-agosto) se observan concentraciones relativamente menores y una menor extensión espacial de las áreas de influencia.

Los resultados observados en las gráficas polares son consistentes con el análisis de correlación de Spearman realizado previamente, donde H<sub>2</sub>S presentó una correlación moderada positiva con la dirección del viento ( $\rho = 0.601$ ;  $p < 0.05$ ), una correlación alta positiva con la temperatura ( $\rho = 0.860$ ;  $p < 0.05$ ) y una correlación moderada negativa con la humedad relativa ( $\rho = -0.629$ ;  $p < 0.05$ ). En contraste, la relación entre H<sub>2</sub>S y la velocidad del viento no fue estadísticamente significativa ( $\rho = -0.245$ ;  $p > 0.05$ ). En conjunto, estos resultados evidencian una asociación estadísticamente significativa entre la dirección del viento, la temperatura, la humedad relativa y las concentraciones de H<sub>2</sub>S durante el año 2025.

**Figura 33:** Gráficas polares de  $H_2S$  versus temperatura (A), humedad relativa (B), velocidad del viento (C) y comportamiento estacional (D) en el distrito de Chimbote durante el año 2025



### 4.3.3 Relación de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) con las variables Meteorológicas en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash trimestral para el año 2024 y 2025

#### a) Prueba de normalidad para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) para los años 2024 – 2025 de manera trimestral

Para evaluar el supuesto de normalidad de las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante los años 2024 y 2025, se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov a los registros correspondientes a cada trimestre del periodo de estudio. Para ello se plantearon los próximos supuestos:

**H<sub>0</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos no siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

Posterior a la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov los resultados dejan ver que las concentraciones trimestrales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  presentaron valores de significancia inferiores a 0.05 en todos los trimestres evaluados durante los años 2024 y 2025. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula de normalidad y se define que los datos no presentan una distribución normal en el periodo analizado.

**Tabla 21:** Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, durante los años 2024 y 2025

| 2024                     | $PM_{10}$                      | $PM_{2.5}$                     | $SO_2$                         | $H_2S$                       |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| <b>Enero-Marzo</b>       | D=0.236, valor-p<2.2e-16       | D = 0.316, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.085, valor-p = 5.789e-10 | D = 0.209, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Abril-Junio</b>       | D = 0.103, valor-p = 2.715e-14 | D = 0.107, valor-p = 1.815e-15 | D = 0.317, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.177, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Julio-Septiembre</b>  | D = 0.094, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.097, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.155, valor-p = 1.474e-15 | D = 0.198, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Octubre-Diciembre</b> | D = 0.096, valor-p = 2.04e-15  | D = 0.121, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.320, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.190, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>2025</b>              |                                |                                |                                |                              |
| <b>Enero-Marzo</b>       | D = 0.088, valor-p = 1.07e-09  | D = 0.093, valor-p = 1.149e-10 | D = 0.371, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.181, valor-p < 2.2e-16 |

|                                                                                                |                                   |                                   |                                 |                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Abril-<br/>Junio-<br/>Julio-<br/>Septiem-<br/>bre<br/>Octubre<br/>-<br/>Diciemb-<br/>re</b> | D = 0.080, valor-p =<br>5.825e-10 | D = 0.086, valor-p =<br>1.187e-11 | D = 0.310, valor-p <<br>2.2e-16 | D = 0.224, valor-p <<br>2.2e-16 |
|                                                                                                | D = 0.089, valor-p =<br>2.248e-15 | D = 0.086, valor-p =<br>1.350e-14 | D = 0.391, valor-p <<br>2.2e-16 | D = 0.249, valor-p <<br>2.2e-16 |
|                                                                                                | D = 0.145, valor-p <<br>2.2e-16   | D = 0.165, valor-p <<br>2.2e-16   | D = 0.358, valor-p <<br>2.2e-16 | D = 0.243, valor-p <<br>2.2e-16 |

*Nota: D: estadístico de Kolmogorov-Smirnov. Valores de significancia menores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal; valores de significancia mayores a 0.05 indican que los datos siguen una distribución normal.*

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que ninguno de los contaminantes atmosféricos evaluados presentó una distribución normal durante los años 2024 y 2025. En consecuencia, se justifica la utilización de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de la relación entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos.

Por lo tanto, para los análisis de correlación posteriores se utilizó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, dado a que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad requerido para la aplicación de métodos estadísticos paramétricos.

#### **b) Prueba de normalidad para las variables meteorológicas (ws, temperatura y humedad relativa) para los años 2024-2025 de manera trimestral**

Para evaluar el supuesto de normalidad de las variables meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento (WS), y la humedad relativa durante los años 2024 y 2025, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov considerando los registros correspondientes a cada trimestre del periodo de estudio. Para ello se plantearon supuestos que a continuación se detalla:

**H<sub>0</sub>:** Los datos registrados para las variables meteorológicas siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para las variables meteorológicas no siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

En la tabla 22 se detallan los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov empleada para las variables meteorológicas velocidad del viento (WS), temperatura y humedad relativa durante los años 2024 y 2025. Los resultados muestran que la totalidad de los trimestres evaluados presentó valores de significancia inferiores a 0.05 para las variables

de humedad relativa y temperatura. En el caso de la velocidad del viento, únicamente el trimestre julio-septiembre de 2024 presentó un valor de significancia superior a 0.05 ( $p = 0.1505$ ), indicando una distribución compatible con la normalidad para dicho periodo.

Sin embargo, para la variable velocidad del viento durante el trimestre julio-septiembre de 2024 se obtuvo un valor de significancia de 0.1505 ( $p > 0.05$ ), por lo que en este caso se acepta la hipótesis nula y se considera que los datos presentan una distribución normal.

**Tabla 22:** Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) durante los años 2024-2025 de manera trimestral

| 2024                     | ws                             | Temperatura                    | Humedad                        |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Enero-Marzo</b>       | D = 0.086, valor-p = 2.938e-14 | D = 0.066, valor-p = 1.600e-08 | D = 0.101, valor-p < 2.2e-16   |
| <b>Abril-Junio</b>       | D = 0.044, valor-p = 9.036e-03 | D = 0.062, valor-p = 5.757e-05 | D = 0.095, valor-p = 2.707e-11 |
| <b>Julio-Septiembre</b>  | D = 0.069, valor-p = 1.505e-01 | D = 0.170, valor-p = 3.320e-07 | D = 0.128, valor-p = 2.875e-04 |
| <b>Octubre-Diciembre</b> | D = 0.074, valor-p = 5.210e-11 | D = 0.083, valor-p = 1.781e-13 | D = 0.104, valor-p < 2.2e-16   |
| <b>2025</b>              |                                |                                |                                |
| <b>Enero-Marzo</b>       | D = 0.113, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.065, valor-p = 2.940e-08 | D = 0.086, valor-p = 2.519e-14 |
| <b>Abril-Junio</b>       | D = 0.066, valor-p = 8.138e-08 | D = 0.105, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.120, valor-p < 2.2e-16   |
| <b>Julio-Septiembre</b>  | D = 0.082, valor-p = 3.405e-12 | D = 0.053, valor-p = 2.700e-05 | D = 0.098, valor-p < 2.2e-16   |
| <b>Octubre-Diciembre</b> | D = 0.050, valor-p = 4.915e-04 | D = 0.083, valor-p = 1.414e-10 | D = 0.123, valor-p < 2.2e-16   |

*Nota: D: estadístico de Kolmogorov-Smirnov. Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) cuando  $p > 0.05$  y se rechaza cuando  $p < 0.05$ . Valores de significancia menores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal; valores de significancia mayores a 0.05 indican que los datos siguen una distribución normal.*

En términos generales, los resultados evidencian que la mayor parte de las variables meteorológicas evaluadas no presentan una distribución normal durante el periodo 2024–2025. La única excepción corresponde a la velocidad del viento durante el trimestre julio-septiembre de 2024, cuya distribución fue compatible con el supuesto de normalidad.

Por lo tanto, para los análisis de correlación posteriores se utilizó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, ya que la mayoría de las variables evaluadas no cumplieron el supuesto de normalidad requerido para la aplicación de métodos estadísticos paramétricos.

**c) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2024**

Una vez determinada la distribución de los datos y debido a que la mayor parte de las variables no siguieron una distribución normal, se procedió a ejecutar el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral para el año 2024, para ello se plantearon los supuestos que a continuación se detalla:

**H<sub>0</sub>:** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2024.

**H<sub>1</sub>:** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2024.

En la tabla 23 se presenta la correlación de Spearman y la significancia estadística ( $p < 0.05$ ) entre los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral durante el año 2024. Para los meses de enero a marzo de 2024, se observa que no existe relación significativa entre SO<sub>2</sub> y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.048$ ), ni entre SO<sub>2</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.027$ ). Las demás relaciones entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la relación negativa moderadamente alta entre H<sub>2</sub>S y la velocidad del viento ( $r_s = -0.671$ ), así como la relación positiva muy fuerte entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.866$ ).

**Tabla 23:** *Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2024*

|                   |           | Enero-Marzo |           |                  |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.531***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.530*** | -0.942***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.201*** | 0.236***    | -0.225*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.334*** | -0.104***   | 0.141***  | 0.866***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | -0.202*** | -0.048      | 0.027     | 0.152***         | 0.126***          | 1               |                  |

|                          |           |                    |                |                        |                         |                       |                       |
|--------------------------|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| H <sub>2</sub> S         | -0.671*** | -0.462***          | 0.439***       | 0.145***               | 0.237***                | 0.328***              | 1                     |
| <b>Abril-Junio</b>       |           |                    |                |                        |                         |                       |                       |
|                          | <b>ws</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Humedad</b> | <b>PM<sub>10</sub></b> | <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>H<sub>2</sub>S</b> |
| <b>ws</b>                | 1         |                    |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Temperatura</b>       | 0.238***  | 1                  |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Humedad</b>           | -0.302*** | -0.804***          | 1              |                        |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>10</sub></b>   | -0.192*** | 0.139***           | -0.205***      | 1                      |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b>  | -0.230*** | -0.088**           | 0.036          | 0.934***               | 1                       |                       |                       |
| <b>SO<sub>2</sub></b>    | 0.005     | -0.508***          | 0.226***       | 0.275***               | 0.427***                | 1                     |                       |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>    | -0.365*** | -0.306***          | 0.245***       | 0.367***               | 0.458***                | 0.465***              | 1                     |
| <b>Julio-Setiembre</b>   |           |                    |                |                        |                         |                       |                       |
|                          | <b>ws</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Humedad</b> | <b>PM<sub>10</sub></b> | <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>H<sub>2</sub>S</b> |
| <b>ws</b>                | 1         |                    |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Temperatura</b>       | 0.177*    | 1                  |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Humedad</b>           | -0.160    | -0.947***          | 1              |                        |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>10</sub></b>   | -0.202*   | -0.060             | -0.003         | 1                      |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b>  | -0.207*   | -0.271**           | 0.244**        | 0.908***               | 1                       |                       |                       |
| <b>SO<sub>2</sub></b>    | -0.035    | 0.454***           | -0.527***      | 0.449***               | 0.305***                | 1                     |                       |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>    | -0.199*   | -0.695***          | 0.640***       | 0.311***               | 0.431***                | -0.055                | 1                     |
| <b>Octubre-Diciembre</b> |           |                    |                |                        |                         |                       |                       |
|                          | <b>ws</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Humedad</b> | <b>PM<sub>10</sub></b> | <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>H<sub>2</sub>S</b> |
| <b>ws</b>                | 1         |                    |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Temperatura</b>       | 0.346***  | 1                  |                |                        |                         |                       |                       |
| <b>Humedad</b>           | -0.382*** | -0.858***          | 1              |                        |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>10</sub></b>   | -0.159*** | 0.239***           | -0.208***      | 1                      |                         |                       |                       |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b>  | -0.238*** | 0.052*             | 0.046          | 0.934***               | 1                       |                       |                       |
| <b>SO<sub>2</sub></b>    | 0.064**   | 0.256***           | 0.056*         | 0.213***               | 0.306***                | 1                     |                       |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>    | -0.209*** | -0.429***          | 0.545***       | -0.037                 | 0.151***                | 0.455***              | 1                     |

*Nota: Significancia estadística en  $p < 0.05$ ; \* Significancia estadística en  $p < 0.01$ ; \*\* Significancia estadística en  $p < 0.001$ ; \*\*\* Significancia estadística en  $p < 0.0001$ ; Se rechaza la hipótesis nula;  $+p > 0.05$  = Correlación no significativa, Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). Correlación despreciable:  $r < |0.1|$ ; correlación baja:  $|0.1| < r \leq |0.3|$ ; correlación mediana:  $|0.3| < r \leq |0.5|$ ; correlación fuerte o alta:  $r > |0.5|$ .*

Para los meses de abril - junio de 2024, se ve que no hay ninguna relación significativa entre PM<sub>2.5</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.036$ ), así como tampoco entre SO<sub>2</sub> y la velocidad del viento ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.005$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

Para los meses de julio a septiembre de 2024, se muestra que no hay ninguna relación significativa entre PM<sub>10</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.003$ ), entre SO<sub>2</sub> y la velocidad

del viento ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.035$ ) y entre  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{SO}_2$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.055$ ). Asimismo, las demás relaciones presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

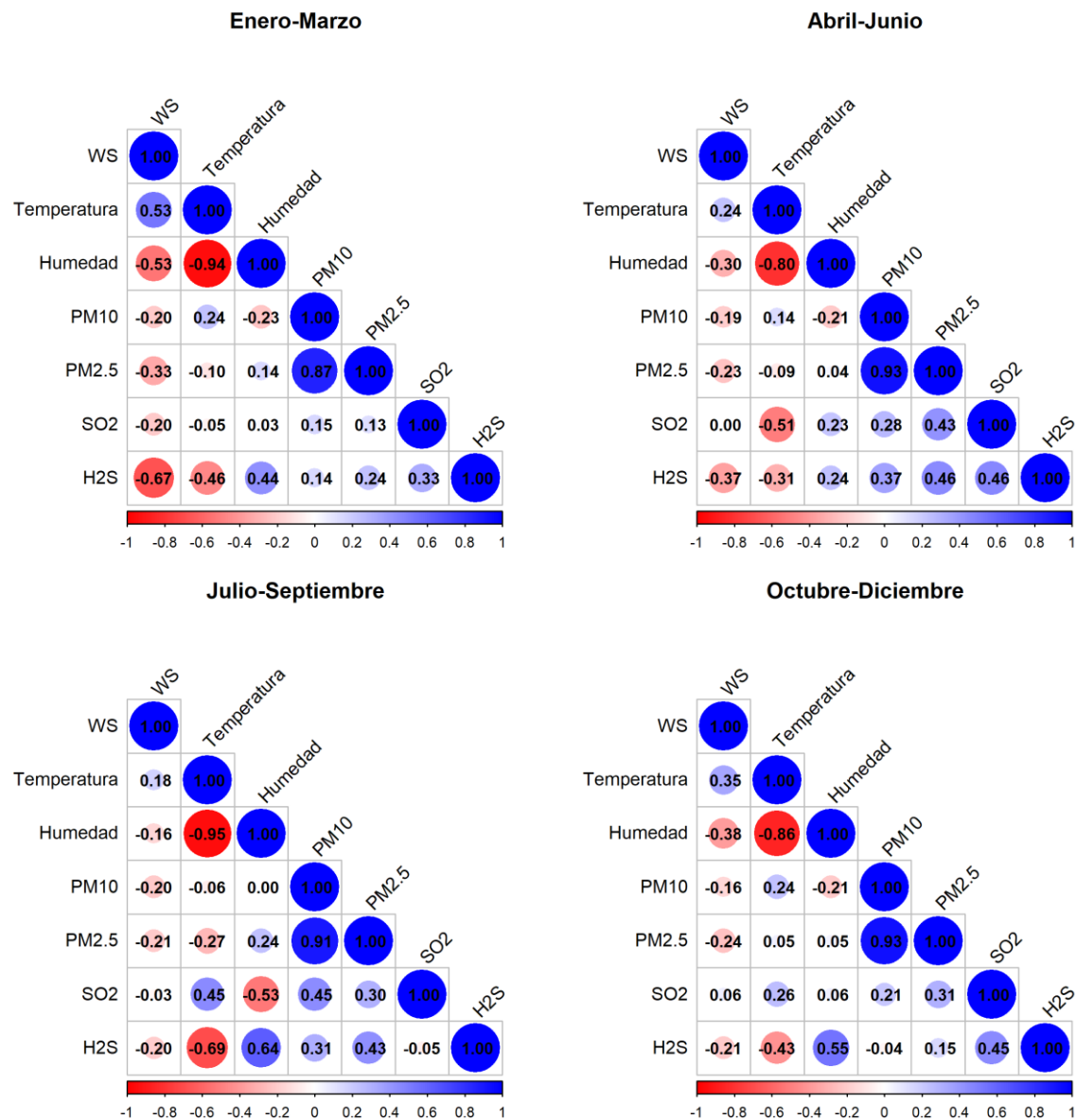
Para los meses de octubre a diciembre de 2024, se ve que no se halla relación significativa entre  $\text{PM}_{2.5}$  y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.046$ ) y entre  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{PM}_{10}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.037$ ). Por otro lado, las demás relaciones entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

En términos generales, durante el año 2024 se observó que la mayoría de las relaciones entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos fueron estadísticamente significativas, por lo que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy fuertes entre  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en todos los trimestres evaluados ( $r_s = 0.866$  a  $0.934$ ), así como correlaciones negativas muy fuertes tanto entre la humedad relativa y la temperatura y ( $r_s = -0.804$  a  $-0.947$ ). Además, el  $\text{H}_2\text{S}$  mostró relaciones significativas principalmente con la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa. Estos resultados evidencian asociaciones significativas entre las concentraciones de contaminantes atmosféricos y las diversas variables meteorológicas durante el año 2024.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2024.

En la figura 34 se presenta el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral durante el año 2024.

**Figura 34:** Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad) de manera trimestral durante el año 2024



*Nota:* Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ). Los colores azules representan correlaciones positivas y los colores rojos representan correlaciones negativas; la intensidad del color y el tamaño de los círculos son proporcionales a la magnitud de la correlación.

En la figura 34 se observa la correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2024. En

general, se evidencia que la mayoría de las relaciones fueron estadísticamente significativas, presentando coeficientes de correlación de intensidad baja a moderada.

Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy fuertes entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todos los trimestres evaluados ( $r_s = 0.866$  a  $0.934$ ), lo que evidencia un comportamiento similar entre ambos contaminantes atmosféricos. Del mismo modo, la temperatura y la humedad relativa presentaron correlaciones negativas muy fuertes durante todo el año ( $r_s = -0.804$  a  $-0.947$ ), indicando una variación inversa entre ambas variables meteorológicas.

Por otra parte, el  $H_2S$  mostró relaciones significativas con las variables meteorológicas, destacando su correlación negativa con la velocidad del viento y la temperatura, así como su correlación positiva con la humedad relativa en la mayoría de los trimestres evaluados.

En términos generales, los resultados evidencian que las condiciones meteorológicas influyeron en la variación temporal de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2024 en el distrito de Chimbote, observándose patrones de asociación que variaron según el trimestre analizado.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2024.

#### **d) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2025**

Una vez determinada la distribución de los datos y debido a que la mayoría de las variables no siguieron una distribución normal, se procedió a realizar el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral para el año 2025, para lo cual se plantearon los siguientes supuestos:

**$H_0$ :** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2025.

**$H_1$ :** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral para el año 2025.

En la tabla 24 se presenta la correlación de Spearman y la significancia estadística ( $p < 0.05$ ) entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables

meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral durante el año 2025. Para los meses de enero a marzo de 2025, se detalla que no hay relación significativa entre PM<sub>10</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.029$ ). Las demás relaciones entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la relación negativa moderada entre H<sub>2</sub>S y la temperatura ( $r_s = -0.526$ ), así como la relación positiva muy fuerte entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.950$ ).

**Tabla 24:** Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2025

| Enero-Marzo       |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.343***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.464*** | -0.825***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.203*** | 0.095***    | -0.029    | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.249*** | -0.102***   | 0.113***  | 0.950***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.015     | -0.105***   | -0.084**  | -0.494***        | -0.468***         | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.465*** | -0.526***   | 0.498***  | 0.055*           | 0.129***          | 0.280***        | 1                |
| Abril-Junio       |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.323***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.446*** | -0.796***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.128*** | -0.001      | 0.097***  | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.169*** | -0.164***   | 0.231***  | 0.948***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.134***  | -0.397***   | 0.078**   | -0.023           | 0.115***          | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.200*** | -0.311***   | 0.357***  | 0.090***         | 0.134***          | 0.147***        | 1                |
| Julio-Setiembre   |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.055*    | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.243*** | -0.748***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.222*** | -0.074**    | 0.084***  | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.247*** | -0.082***   | 0.131***  | 0.972***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | -0.363*** | 0.350***    | -0.055*   | 0.114***         | 0.215***          | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.181*** | -0.402***   | 0.420***  | 0.097***         | 0.117***          | 0.223***        | 1                |
| Octubre-Diciembre |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.313***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.436*** | -0.921***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.135*   | 0.367***    | -0.282*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.272*** | -0.010      | 0.088     | 0.821***         | 1                 |                 |                  |

|                  |           |           |          |          |       |          |   |
|------------------|-----------|-----------|----------|----------|-------|----------|---|
| SO <sub>2</sub>  | -0.328*** | 0.084     | 0.072    | 0.250*** | 0.085 | 1        |   |
| H <sub>2</sub> S | -0.407*** | -0.365*** | 0.438*** | -0.012   | 0.086 | 0.611*** | 1 |

*Nota: Significancia estadística en  $p < 0.05$ ; \* Significancia estadística en  $p < 0.01$ ; \*\* Significancia estadística en  $p < 0.001$ ; \*\*\* Significancia estadística en  $p < 0.0001$ ; Se rechaza la hipótesis nula;  $+p > 0.05$  = Correlación no significativa, Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). Correlación despreciable:  $r < |0.1|$ ; correlación baja:  $|0.1| < r \leq |0.3|$ ; correlación mediana:  $|0.3| < r \leq |0.5|$ ; correlación fuerte o alta:  $r > |0.5|$ .*

Para los meses de abril a junio de 2025, se ve que no existe relación significativa entre PM<sub>10</sub> y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.001$ ) ni entre PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.023$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

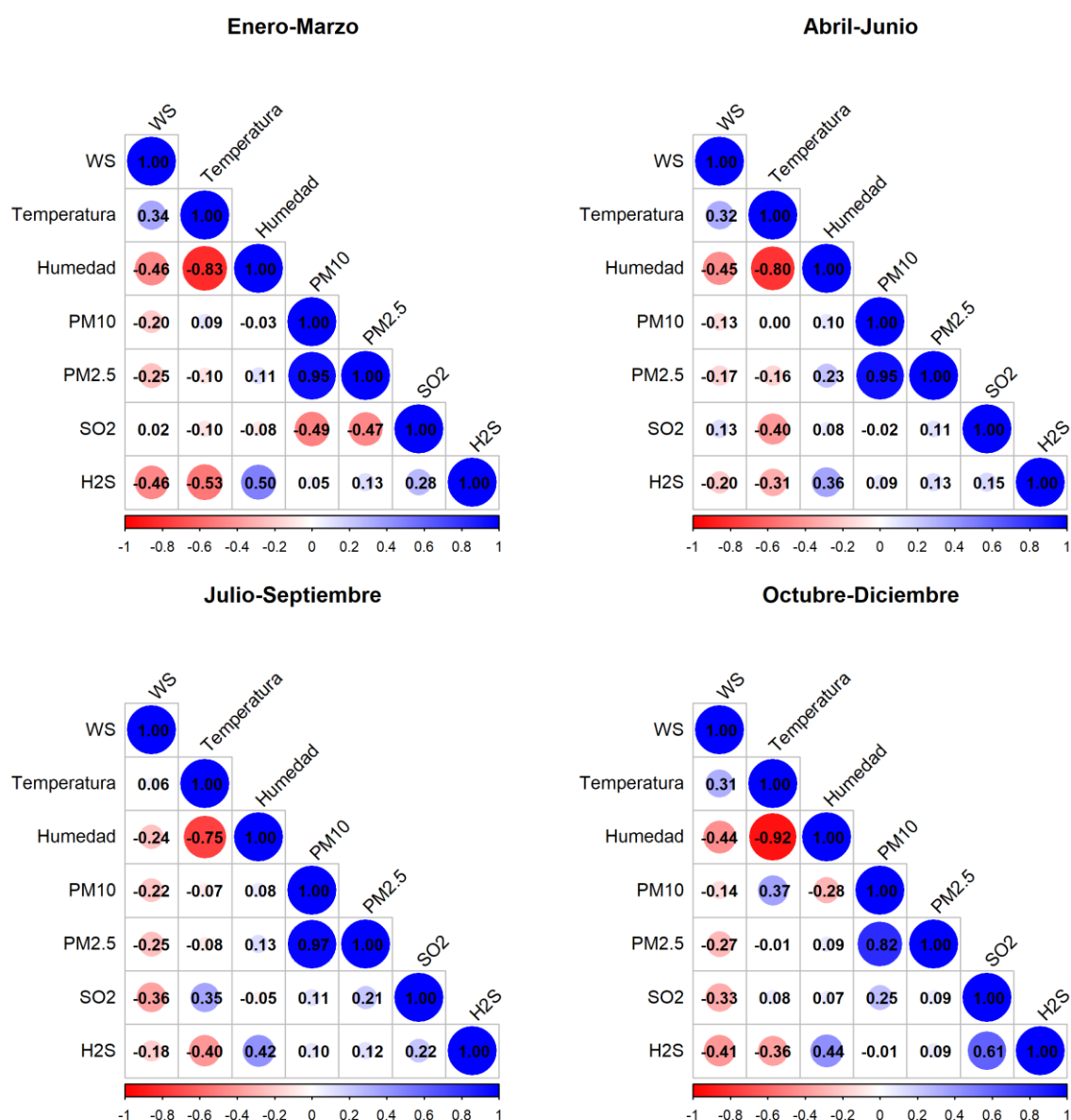
Para los meses de julio a septiembre de 2025, se detalla que no existe relación significativa entre humedad relativa y SO<sub>2</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.055$ ). Asimismo, las demás relaciones presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la relación positiva muy fuerte entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.972$ ), así como la relación negativa muy fuerte entre temperatura y humedad relativa ( $r_s = -0.748$ ).

Para los meses de octubre a diciembre de 2025, se detalla que no existe relación significativa entre la temperatura y PM<sub>2.5</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.010$ ), entre la humedad relativa y PM<sub>2.5</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.088$ ), entre PM<sub>10</sub> y H<sub>2</sub>S ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.012$ ), entre PM<sub>2.5</sub> y H<sub>2</sub>S ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.086$ ), y entre PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.085$ ). Las demás relaciones presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

En términos generales, durante el año 2025 se observó que la mayoría de las relaciones entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas fueron estadísticamente significativas, por lo que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy fuertes entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en todos los trimestres evaluados ( $r_s = 0.821$  a  $0.972$ ), así como correlaciones negativas muy fuertes entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.748$  a  $-0.921$ ). Además, el H<sub>2</sub>S presentó relaciones significativas principalmente con la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa durante la mayor parte del año. Estos resultados evidencian asociaciones significativas entre diversas variables meteorológicas y las concentraciones de contaminantes atmosféricos durante el año 2025.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2025.

**Figura 35:** *Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera trimestral durante el año 2025*



*Nota:* Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ). Los colores azules representan correlaciones positivas y los colores rojos representan correlaciones negativas; la intensidad del color y el tamaño de los círculos son proporcionales a la magnitud de la correlación.

La correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2025 se detalla en la figura 35.. En general, se evidencia que la mayoría de las relaciones fueron estadísticamente significativas, presentando coeficientes de correlación de intensidad baja a moderada.

Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy fuertes entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todos los trimestres evaluados ( $r_s = 0.821$  a  $0.972$ ), lo que evidencia un comportamiento similar entre ambos contaminantes atmosféricos. Del mismo modo, la temperatura y la humedad relativa presentaron correlaciones negativas muy fuertes durante todo el año ( $r_s = -0.748$  a  $-0.921$ ), indicando una variación inversa entre ambas variables meteorológicas.

Por otra parte, el  $H_2S$  mostró relaciones significativas con las variables meteorológicas, destacando su correlación negativa con la velocidad del viento y la temperatura, así como su correlación positiva con la humedad relativa en la mayoría de los trimestres evaluados.

En términos generales, los resultados evidencian que las condiciones meteorológicas influyeron en la variación temporal de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025 en el distrito de Chimbote, observándose patrones de asociación que variaron según el trimestre analizado.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera trimestral durante el año 2025.

#### ***4.3.4 Relación de los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) con las variables Meteorológicas en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash estacional para el año 2024 y 2025***

##### **a) Prueba de normalidad para los contaminantes atmosféricos ( $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$ , $H_2S$ , $SO_2$ ) para los años 2024 – 2025 de manera estacional**

Para evaluar el supuesto de normalidad de las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante los años 2024 y 2025, se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov utilizando los registros agrupados por estación del año. Para ello se plantearon los supuestos siguientes:

**$H_0$ :** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para los contaminantes atmosféricos no siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

Posterior a la prueba Kolmogorov-Smirnov los resultados detallan que las concentraciones estacionales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S presentaron valores de significancia inferiores a 0.05 en todas las estaciones evaluadas durante los años 2024 y 2025. Por ello, se rechaza la hipótesis nula de normalidad y se define que los datos no presentan una distribución normal a escala estacional.

**Tabla 25:** Prueba de Kolmogorov-Smirnov (normalidad) para los contaminantes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, durante los años 2024 y 2025 de manera estacional

| 2024             | PM <sub>10</sub>               | PM <sub>25</sub>               | SO <sub>2</sub>              | H <sub>2</sub> S             |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Verano</b>    | D = 0.123, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.159, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.333, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.169, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Otoño</b>     | D = 0.237, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.286, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.332, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.181, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Invierno</b>  | D = 0.091, valor-p = 1.214e-12 | D = 0.094, valor-p = 1.721e-13 | D = 0.363, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.271, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Primavera</b> | D = 0.074, valor-p = 1.223e-10 | D = 0.075, valor-p = 5.461e-11 | D = 0.351, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.166, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>2025</b>      |                                |                                |                              |                              |
| <b>Verano</b>    | D = 0.130, valor-p = 1.869e-15 | D = 0.148, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.321, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.181, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Otoño</b>     | D = 0.106, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.102, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.342, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.181, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Invierno</b>  | D = 0.086, valor-p = 2.922e-12 | D = 0.075, valor-p = 1.397e-09 | D = 0.352, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.266, valor-p < 2.2e-16 |
| <b>Primavera</b> | D = 0.060, valor-p = 9.269e-05 | D = 0.063, valor-p = 4.033e-05 | D = 0.384, valor-p < 2.2e-16 | D = 0.228, valor-p < 2.2e-16 |

*Nota: D: estadístico de Kolmogorov-Smirnov. Valores de significancia menores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal; valores de significancia mayores a 0.05 indican que los datos siguen una distribución normal.*

En términos generales, ninguno de los contaminantes atmosféricos evaluados presentó una distribución normal en las estaciones analizadas durante los años 2024 y 2025, debido a que todos los valores de significancia fueron inferiores a 0.05. por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y se acepta la hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>), concluyéndose que los contaminantes atmosféricos no presentan una distribución normal de manera estacional.

Por consiguiente, se justifica la utilización de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de la relación entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas.

En ese sentido, para los análisis de correlación posteriores se empleará el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, debido a que los datos no cumplen el supuesto de normalidad requerido para la aplicación de métodos estadísticos paramétricos.

**b) Prueba de normalidad para las variables meteorológicas (ws, temperatura y humedad relativa) para los años 2024–2025 de manera estacional.**

Para evaluar el supuesto de normalidad de las variables meteorológicas velocidad del viento (WS), temperatura y humedad relativa durante los años 2024 y 2025, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov utilizando los registros agrupados por estación del año. Para ello se plantearon los supuestos que siguen a continuación:

**H<sub>0</sub>:** Los datos registrados para las variables meteorológicas siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

**H<sub>1</sub>:** Los datos registrados para las variables meteorológicas no siguen una distribución normal durante los años 2024-2025.

En la tabla 26 se presentan los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) durante los años 2024 y 2025 de manera estacional. Los resultados muestran que la mayoría de las variables meteorológicas presentaron valores de significancia inferiores a 0.05, indicando ausencia de normalidad. La única excepción se registró durante el invierno de 2024, donde la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa presentaron valores de significancia superiores a 0.05. En consecuencia, se evidencia que la distribución de los datos varía según la estación evaluada.

**Tabla 26:** Prueba de Kolmogorov-Smirnov para las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) durante los años 2024 y 2025 de manera estacional

| 2024             | ws                             | Temperatura                    | Humedad                        |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Verano</b>    | D = 0.095, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.056, valor-p = 2.417e-06 | D = 0.085, valor-p = 4.994e-14 |
| <b>Otoño</b>     | D = 0.049, valor-p = 1.106e-04 | D = 0.047, valor-p = 1.859e-04 | D = 0.094, valor-p = 3.526e-16 |
| <b>Invierno</b>  | D = 0.099, valor-p = 7.295e-01 | D = 0.187, valor-p = 6.982e-02 | D = 0.140, valor-p = 3.044e-01 |
| <b>Primavera</b> | D = 0.059, valor-p = 1.032e-05 | D = 0.077, valor-p = 2.196e-09 | D = 0.104, valor-p < 2.2e-16   |
| <b>2025</b>      |                                |                                |                                |
| <b>Verano</b>    | D = 0.097, valor-p < 2.2e-16   | D = 0.064, valor-p = 4.886e-08 | D = 0.104, valor-p < 2.2e-16   |

|                  |                                   |                                   |                                  |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Otoño</b>     | D = 0.087, valor-p =<br>2.747e-13 | D = 0.071, valor-p =<br>7.053e-09 | D = 0.119, valor-p < 2.2e-<br>16 |
| <b>Invierno</b>  | D = 0.077, valor-p =<br>8.003e-12 | D = 0.030, valor-p =<br>3.663e-02 | D = 0.101, valor-p < 2.2e-<br>16 |
| <b>Primavera</b> | D = 0.052, valor-p =<br>8.023e-04 | D = 0.101, valor-p =<br>1.731e-13 | D = 0.114, valor-p < 2.2e-<br>16 |

*Nota: D: estadístico de Kolmogorov-Smirnov. Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) cuando  $p > 0.05$  y se rechaza cuando  $p < 0.05$ . Valores de significancia menores a 0.05 indican que los datos no siguen una distribución normal; valores de significancia mayores a 0.05 indican que los datos siguen una distribución normal.*

En términos generales, los resultados evidencian que la mayor parte de las variables meteorológicas no presentaron una distribución normal durante las estaciones evaluadas en los años 2024 y 2025. La única excepción correspondió al invierno de 2024, donde la temperatura la velocidad del viento y la humedad relativa mostraron una distribución compatible con el supuesto de normalidad.

Por lo tanto, considerando que la mayor parte de las variables meteorológicas evaluadas no cumplió el supuesto de normalidad, se justifica el empleo del coeficiente de correlación de rangos de Spearman para los análisis de correlación estacional posteriores.

### **c) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2024**

Una vez determinada la distribución de los datos y debido a que la mayoría de las variables no siguieron una distribución normal, se procedió a realizar el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional para el año 2024, para lo cual se plantearon los siguientes supuestos:

**$H_0$ :** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2024.

**$H_1$ :** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2024.

En la tabla 27 se presenta la correlación de Spearman y la significancia estadística ( $p < 0.05$ ) entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2024. Para la estación de verano, se observa que no existe relación significativa

entre SO<sub>2</sub> y la velocidad del viento ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.032$ ), entre SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.034$ ), así como tampoco entre H<sub>2</sub>S y PM<sub>10</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.047$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 27:** Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2024

| Verano            |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.352***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.565*** | -0.760***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.127*** | 0.524***    | -0.240*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.286*** | 0.007       | 0.242***  | 0.784***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | -0.032    | -0.618***   | 0.380***  | -0.375***        | 0.034             | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.505*** | -0.507***   | 0.577***  | -0.047           | 0.187***          | 0.472***        | 1                |
| Otoño             |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.256***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.402*** | -0.752***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.202*** | 0.108***    | -0.180*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.269*** | -0.168***   | 0.105***  | 0.914***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.002     | -0.693***   | 0.272***  | 0.135***         | 0.310***          | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.418*** | -0.417***   | 0.356***  | 0.277***         | 0.387***          | 0.432***        | 1                |
| Invierno          |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.198     | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.341*   | -0.900***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -         | -           | -         | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -         | -           | -         | 0.966***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.330*    | -0.604***   | 0.420**   | 0.139***         | 0.116**           | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | 0.269     | -0.384**    | 0.120     | 0.237***         | 0.251***          | 0.518***        | 1                |
| Primavera         |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.205***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.280*** | -0.873***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.188*** | 0.352***    | -0.261*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.249*** | 0.165***    | -0.015    | 0.933***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | -0.039    | 0.377***    | -0.152*** | 0.419***         | 0.405***          | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.213*** | -0.485***   | 0.542***  | 0.022            | 0.182***          | 0.230***        | 1                |

*Nota: Significancia estadística en  $p < 0.05$ ; \* Significancia estadística en  $p < 0.01$ ; \*\* Significancia estadística en  $p < 0.001$ ; \*\*\* Significancia estadística en  $p < 0.0001$ ; Se rechaza la hipótesis nula;  $+p > 0.05$  = Correlación no significativa, Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). Correlación despreciable:  $r < |0.1|$ ; correlación baja:  $|0.1| < r \leq |0.3|$ ; correlación mediana:  $|0.3| < r \leq |0.5|$ ; correlación fuerte o alta:  $r > |0.5|$ .*

Para la estación de otoño de 2024, se detalla que no hay relación significativa entre  $\text{SO}_2$  y la velocidad del viento ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.002$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  ( $r_s = 0.914$ ).

Para la estación de invierno de 2024, se observa que no se halla relación significativa entre la velocidad del viento y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.198$ ), entre la velocidad del viento y  $\text{H}_2\text{S}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.269$ ), y entre la humedad relativa y  $\text{H}_2\text{S}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.120$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  ( $r_s = 0.966$ ), así como la correlación negativa muy alta entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.900$ ).

Para la estación de primavera de 2024, se observa que no existe relación significativa entre  $\text{SO}_2$  y la velocidad del viento ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.039$ ), entre  $\text{PM}_{2.5}$  y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.015$ ), y entre  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{PM}_{10}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.022$ ). Asimismo, las demás relaciones presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ).

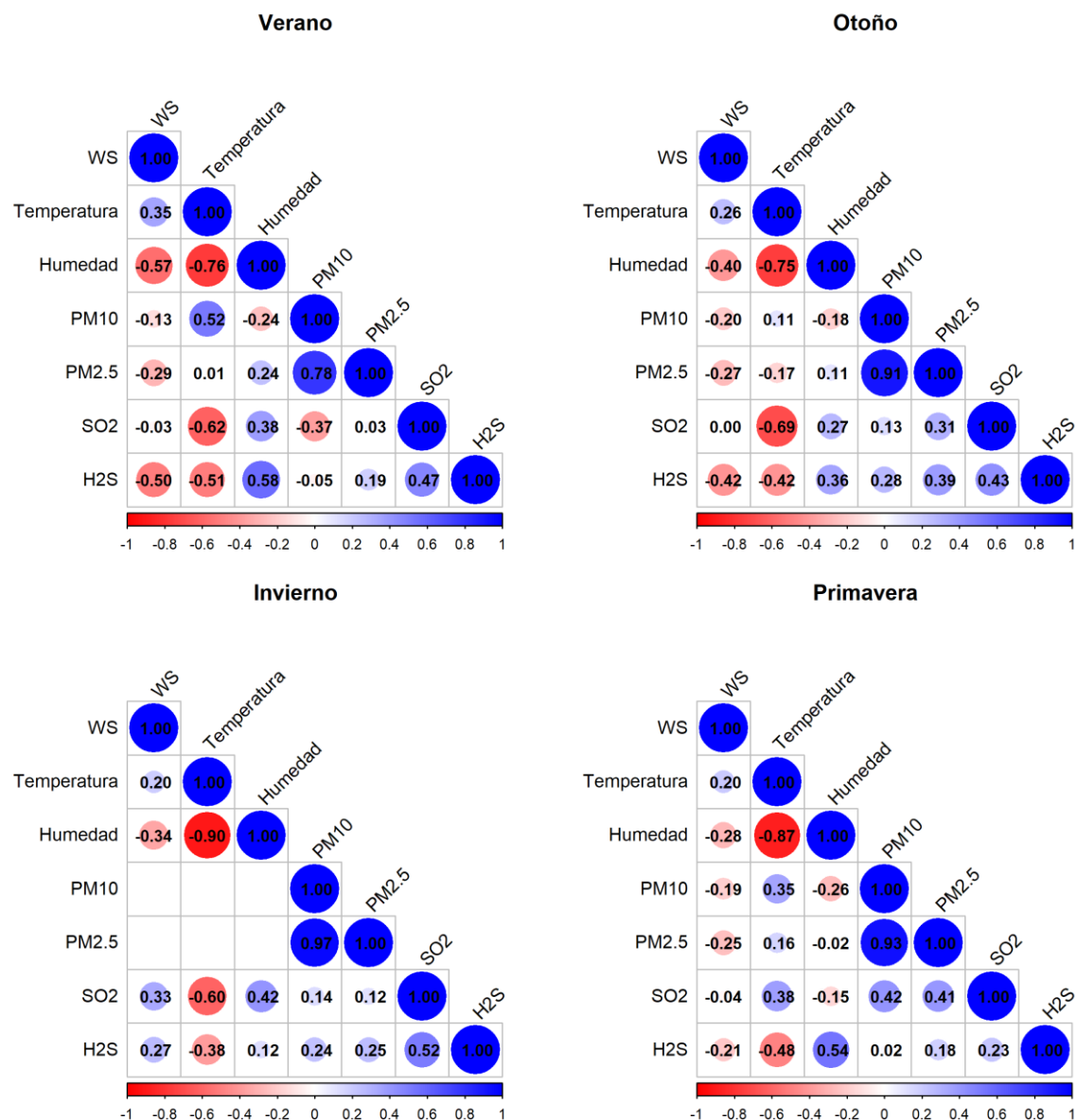
En términos generales, durante el año 2024 se observó que la mayoría de las relaciones entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas fueron estadísticamente significativas, por lo que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy altas entre  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en todas las estaciones evaluadas ( $r_s = 0.784$  a  $0.966$ ), así como correlaciones negativas muy fuertes entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.752$  a  $-0.900$ ). Además, el  $\text{H}_2\text{S}$  mostró relaciones significativas principalmente con la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa. Estos resultados evidencian que las condiciones meteorológicas influyeron en la variación estacional de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2024.

En la figura 36 se observa la correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2024. En general, se evidencia que la mayoría de las relaciones presentaron correlaciones de intensidad baja a muy alta, predominando asociaciones estadísticamente significativas entre las variables evaluadas.

Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy altas entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todas las estaciones del año ( $r_s = 0.784$  a  $0.966$ ), lo que evidencia un comportamiento similar entre ambos contaminantes atmosféricos. Del mismo modo, la temperatura y la humedad relativa presentaron correlaciones negativas muy altas durante todas las estaciones ( $r_s = -0.752$  a  $-0.900$ ), indicando una relación inversa entre ambas variables meteorológicas.

**Figura 36:** Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2024



*Nota:* Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ). Los colores azules representan correlaciones positivas y los colores rojos representan correlaciones negativas; la intensidad del color y el tamaño de los círculos son proporcionales a la magnitud de la correlación.

Por otra parte, el  $H_2S$  mostró relaciones significativas principalmente con la temperatura la velocidad del viento y la humedad relativa, destacando correlaciones negativas

con la velocidad del viento y la temperatura, así como correlaciones positivas con la humedad relativa en la mayoría de las estaciones evaluadas.

Estos resultados evidencian asociaciones significativas entre diversas variables meteorológicas y las concentraciones de contaminantes atmosféricos durante las distintas estaciones del año 2024.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2024.

#### **d) Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2025**

Una vez determinada la distribución de los datos y debido a que la mayoría de las variables no siguieron una distribución normal, se procedió a realizar el análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional para el año 2025, para lo cual se plantearon los siguientes supuestos:

**$H_0$ :** No existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2025.

**$H_1$ :** Existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional para el año 2025.

En la tabla 28 se presenta la correlación de Spearman y la significancia estadística ( $p < 0.05$ ) entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2025. Para la estación de verano, se observa que no existe relación significativa entre  $PM_{10}$  y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.048$ ), entre  $PM_{10}$  y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.022$ ), entre  $SO_2$  y  $PM_{2.5}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.028$ ) y entre  $H_2S$  y  $PM_{10}$  ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.053$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  ( $r_s = 0.912$ ), así como la correlación negativa muy alta entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.755$ ).

**Tabla 28:** Correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2025

| Verano            |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.210***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.458*** | -0.755***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.153*** | -0.048      | 0.022     | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.268*** | -0.322***   | 0.239***  | 0.912***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.149***  | -0.561***   | 0.092***  | -0.287***        | -0.028            | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.348*** | -0.317***   | 0.438***  | 0.053            | 0.217***          | 0.194***        | 1                |
| Otoño             |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.180***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.416*** | -0.812***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.135*** | 0.328***    | -0.134*** | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.190*** | 0.079***    | 0.067**   | 0.937***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.107***  | -0.533***   | 0.208***  | -0.322***        | -0.153***         | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.386*** | -0.016      | 0.256***  | 0.273***         | 0.242***          | 0.038           | 1                |
| Invierno          |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.107***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.160*** | -0.572***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.229*** | -0.063**    | 0.074**   | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.234*** | -0.098***   | 0.121***  | 0.972***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | -0.155*** | 0.344***    | 0.044*    | 0.136***         | 0.229***          | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.161*** | -0.341***   | 0.433***  | 0.041            | 0.070**           | 0.359***        | 1                |
| Primavera         |           |             |           |                  |                   |                 |                  |
|                   | ws        | Temperatura | Humedad   | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
| ws                | 1         |             |           |                  |                   |                 |                  |
| Temperatura       | 0.422***  | 1           |           |                  |                   |                 |                  |
| Humedad           | -0.440*** | -0.831***   | 1         |                  |                   |                 |                  |
| PM <sub>10</sub>  | -0.171*** | 0.133***    | 0.023     | 1                |                   |                 |                  |
| PM <sub>2.5</sub> | -0.145*** | 0.036       | 0.169***  | 0.963***         | 1                 |                 |                  |
| SO <sub>2</sub>   | 0.190***  | 0.368***    | -0.043    | -0.080**         | -0.045            | 1               |                  |
| H <sub>2</sub> S  | -0.167*** | -0.291***   | 0.437***  | -0.064*          | -0.028            | 0.408***        | 1                |

Nota: Significancia estadística en  $p < 0.05$ ; \* Significancia estadística en  $p < 0.01$ ; \*\* Significancia estadística en  $p < 0.001$ ; \*\*\* Significancia estadística en  $p < 0.0001$ ; Se rechaza la hipótesis nula;  $+p > 0.05$  = Correlación no significativa, Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). Correlación despreciable:  $r < |0.1|$ ; correlación baja:  $|0.1| < r \leq |0.3|$ ; correlación mediana:  $|0.3| < r \leq |0.5|$ ; correlación fuerte o alta:  $r > |0.5|$ .

Para la estación de otoño de 2025, se detalla que no hay relación significativa entre H<sub>2</sub>S y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.016$ ), ni entre H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.038$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.937$ ), así como la correlación negativa muy alta entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.812$ ).

Para la estación de invierno de 2025, se observa que no existe relación significativa entre H<sub>2</sub>S y PM<sub>10</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.041$ ). Las demás relaciones evaluadas presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.972$ ), así como la correlación negativa fuerte entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.572$ ).

Para la estación de primavera de 2025, se observa que no existe relación significativa entre PM<sub>10</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.023$ ), entre PM<sub>2.5</sub> y la temperatura ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = 0.036$ ), entre SO<sub>2</sub> y la humedad relativa ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.043$ ), entre H<sub>2</sub>S y PM<sub>10</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.064$ ) y entre H<sub>2</sub>S y PM<sub>2.5</sub> ( $p > 0.05$ ) ( $r_s = -0.028$ ). Las demás relaciones presentaron significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Destacó la correlación positiva muy alta entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ( $r_s = 0.963$ ), así como la correlación negativa muy alta entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.831$ ).

En términos generales, durante el año 2025 se observó que la mayoría de las relaciones entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas fueron estadísticamente significativas, por lo que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy altas entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en todas las estaciones evaluadas ( $r_s = 0.912$  a  $0.972$ ), así como correlaciones negativas altas a muy altas entre la temperatura y la humedad relativa ( $r_s = -0.572$  a  $-0.831$ ).

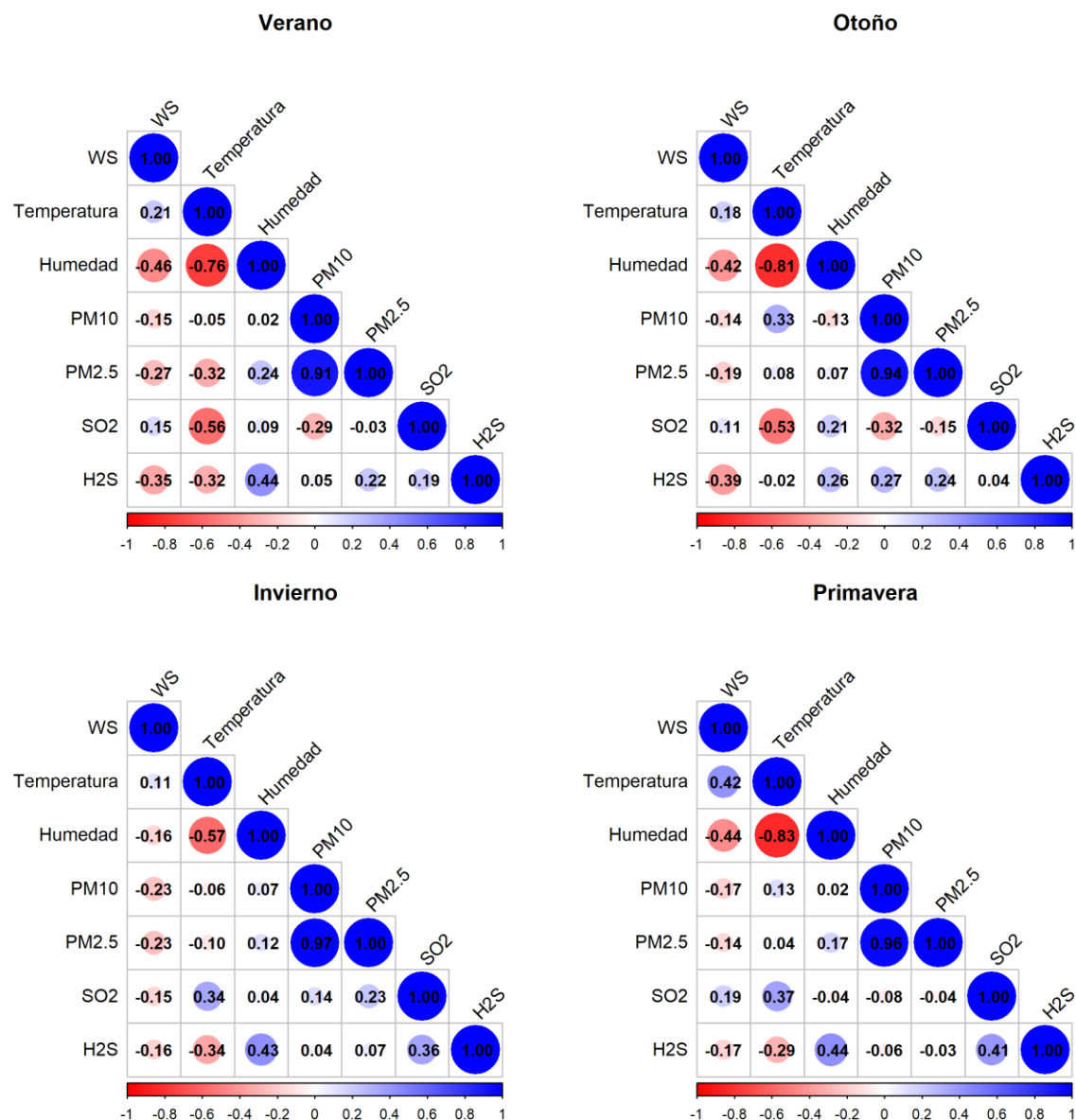
Además, el H<sub>2</sub>S mostró relaciones significativas principalmente con la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa, destacando correlaciones negativas con la velocidad del viento y la temperatura, así como correlaciones positivas con la humedad relativa. Estos resultados evidencian que las condiciones meteorológicas influyeron en la variación estacional de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2025.

En la figura 37 se observa la correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2025. En general, se evidencia que la mayoría de las relaciones presentaron correlaciones de intensidad baja a muy alta, predominando asociaciones estadísticamente significativas entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas evaluadas.

Asimismo, se identificaron correlaciones positivas muy altas entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todas las estaciones del año ( $r_s = 0.912$  a  $0.972$ ), lo que evidencia un comportamiento similar entre ambos contaminantes atmosféricos. Del mismo modo, la temperatura y la humedad relativa presentaron correlaciones negativas altas a muy altas durante todas las estaciones ( $r_s = -0.572$  a  $-0.831$ ), indicando una relación inversa entre ambas variables meteorológicas.

**Figura 37:** Análisis de correlación de Spearman entre los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ ) y las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) de manera estacional durante el año 2025



*Nota:* Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ). Los colores azules representan correlaciones positivas y los colores rojos representan correlaciones negativas; la intensidad del color y el tamaño de los círculos son proporcionales a la magnitud de la correlación.

Por otra parte, el  $H_2S$  mostró relaciones significativas principalmente con la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa, destacando correlaciones negativas con la

velocidad del viento y la temperatura, así como correlaciones positivas con la humedad relativa en la mayoría de las estaciones evaluadas.

En términos generales, los resultados evidencian que las condiciones meteorológicas influyeron en la variación estacional de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025 en el distrito de Chimbote, observándose patrones de asociación que variaron según la estación analizada.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), concluyéndose que existe relación significativa entre los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas de manera estacional durante el año 2025.

#### **4.4 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF**

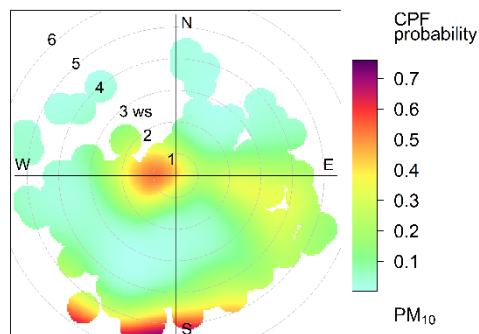
##### ***4.4.1 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2024***

###### **a) Análisis trimestral mediante CBPF**

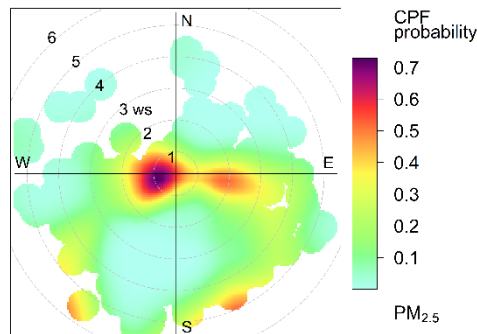
Con la finalidad de identificar las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2024, se aplicó la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF), utilizando los datos horarios de concentración de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , junto con la velocidad y dirección del viento. El análisis se realizó considerando el percentil 75 de concentración para cada contaminante, permitiendo identificar los sectores de procedencia asociados a episodios de concentraciones elevadas y reconocer espacialmente las probables fuentes de contribución de cada contaminante. Los resultados obtenidos se presentan de manera trimestral con el propósito de evaluar la variabilidad temporal de las probables fuentes de emisión durante el periodo de estudio.

**Figura 38:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el primer trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

A. CBPF  $PM_{10}$  - Primer Trimestre 2024      B. CBPF  $PM_{2.5}$  - Primer Trimestre 2024

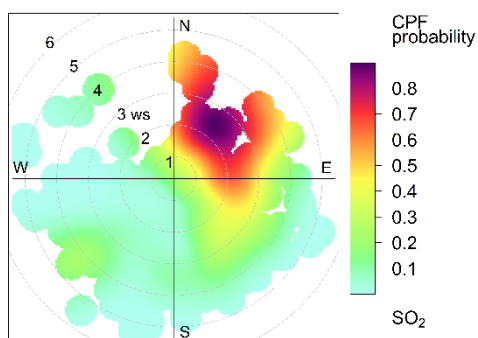


CPF at the 75th percentile (=25)



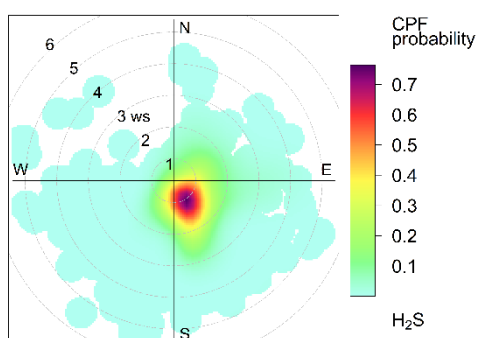
CPF at the 75th percentile (=16)

C. CBPF  $SO_2$  - Primer Trimestre 2024



CPF at the 75th percentile (=8.8)

D. CBPF  $H_2S$  - Primer Trimestre 2024

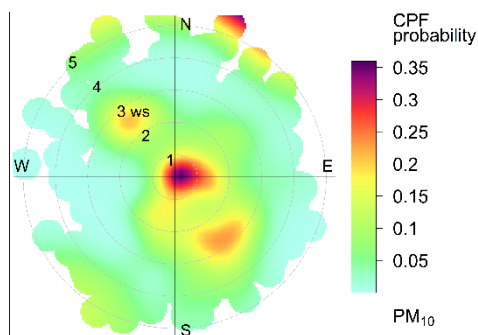


CPF at the 75th percentile (=13)

Durante el primer trimestre de 2024 se identificaron patrones diferenciados en la dirección de procedencia de los contaminantes atmosféricos. El  $PM_{10}$  presentó mayores probabilidades de ocurrencia asociadas principalmente a los sectores oeste, este y sur, predominando condiciones de bajas velocidades de viento. El  $PM_{2.5}$  mostró una contribución predominante desde el sector este, evidenciando una fuente potencial espacialmente más definida. En el caso del  $SO_2$ , las mayores probabilidades se concentraron entre los sectores norte, noreste y este, sugiriendo la influencia de una fuente específica ubicada en dichas direcciones. Por su parte, el  $H_2S$  presentó una contribución predominante desde el sector sureste, asociada principalmente a velocidades de viento reducidas. En conjunto, los resultados evidencian la existencia de múltiples sectores potencialmente emisores que contribuyeron a las concentraciones elevadas registradas durante este trimestre.

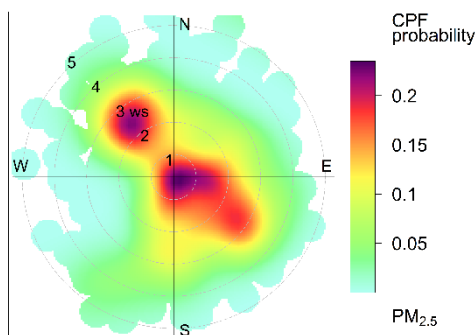
**Figura 39:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el segundo trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

A. CBPF  $PM_{10}$  - Segundo Trimestre 2024



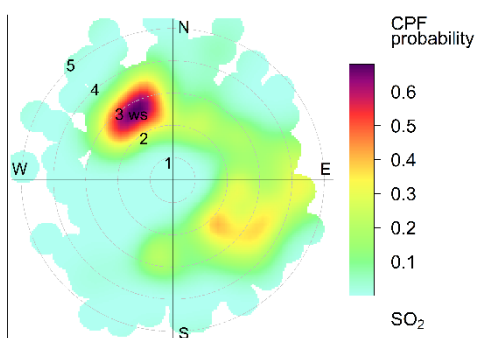
CPF at the 75th percentile (=25)

B. CBPF  $PM_{2.5}$  - Segundo Trimestre 2024



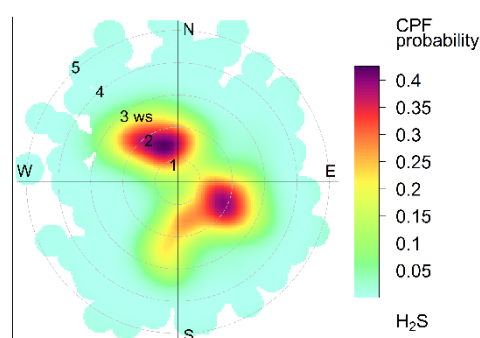
CPF at the 75th percentile (=18)

C. CBPF  $SO_2$  - Segundo Trimestre 2024



CPF at the 75th percentile (=44)

D. CBPF  $H_2S$  - Segundo Trimestre 2024

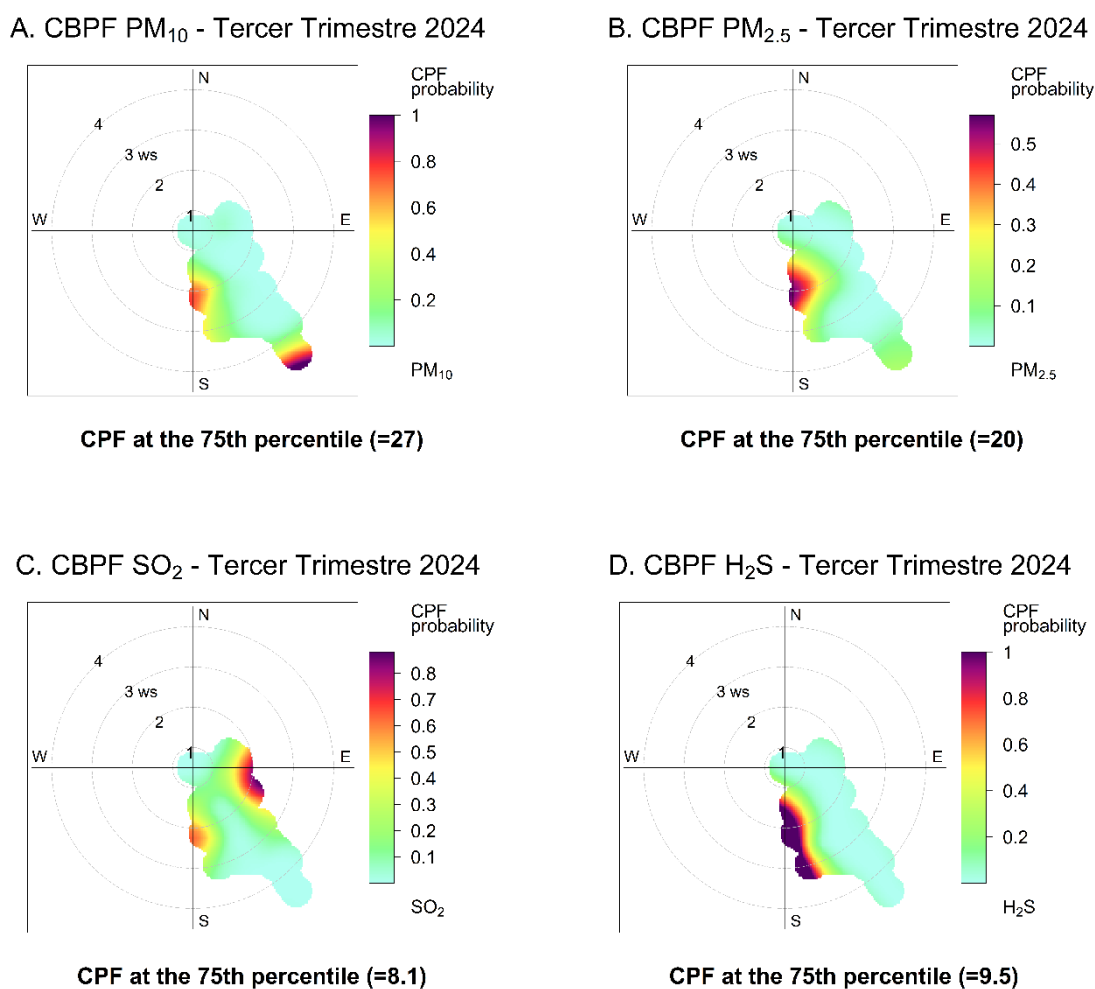


CPF at the 75th percentile (=19)

Durante el segundo trimestre de 2024 se observaron modificaciones en los patrones espaciales de contribución respecto al trimestre anterior. El  $PM_{10}$  presentó mayores probabilidades de ocurrencia asociadas principalmente al sector este, observándose además una contribución secundaria desde el sector sureste bajo condiciones de bajas velocidades de viento. El  $PM_{2.5}$  presentó una distribución espacial más amplia que el  $PM_{10}$ , identificándose zonas de contribución potencial desde los sectores noroeste y este. El  $SO_2$  presentó una contribución potencial predominante desde el sector noroeste, observándose un núcleo de alta probabilidad más definido que el registrado para los contaminantes particulados, mientras que el  $H_2S$  mostró contribuciones potenciales procedentes principalmente de los sectores noroeste y este-sureste, evidenciando una distribución asociada a más de un sector de procedencia. Estos resultados evidencian una variabilidad temporal en la localización de los sectores

potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos, sugiriendo cambios en la contribución relativa de las fuentes de emisión entre los distintos periodos del año.

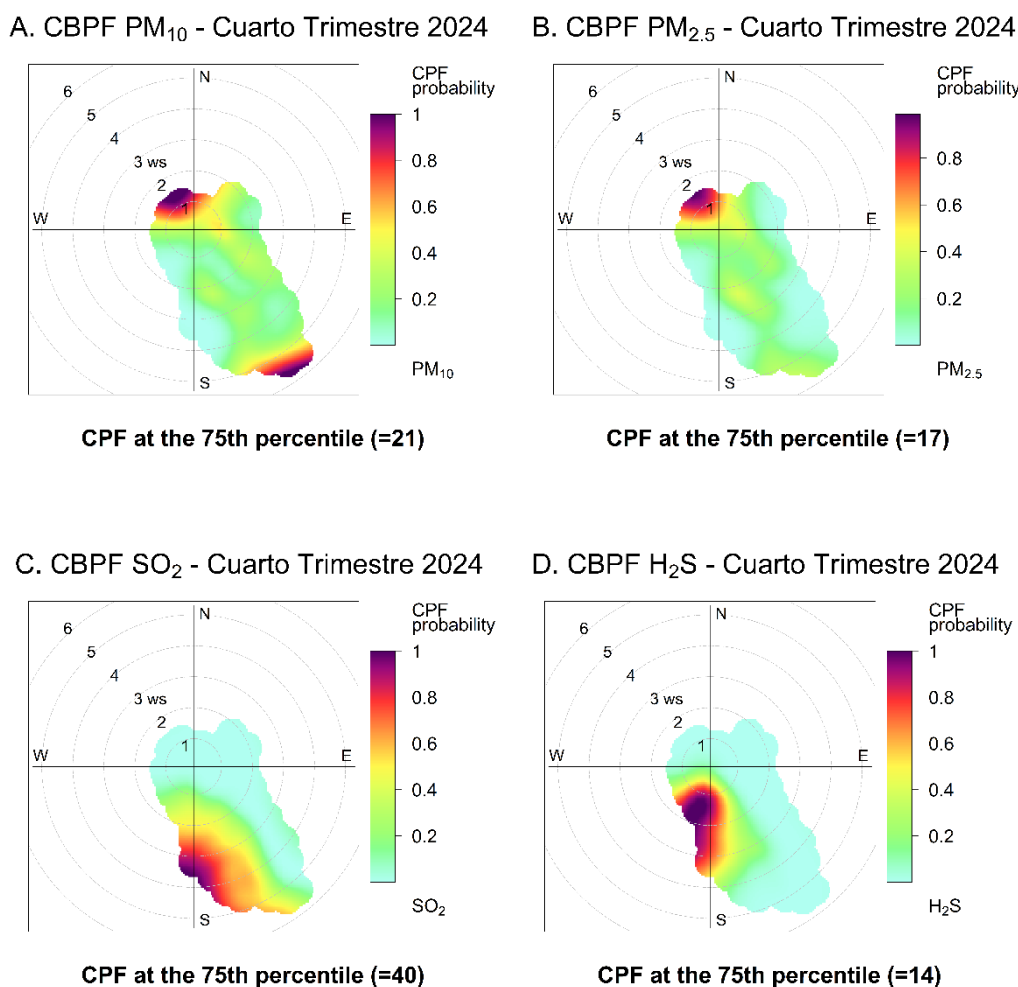
**Figura 40:** *Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el tercer trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash*



Durante el tercer trimestre de 2024, el  $PM_{10}$  presentó una contribución potencial predominantemente asociada a los sectores sur y sur-sureste, observándose un núcleo de alta probabilidad concentrado bajo condiciones de bajas velocidades de viento. El  $PM_{2.5}$  presentó una distribución similar a la observada para  $PM_{10}$ , concentrándose principalmente en los sectores sur y sur-sureste, aunque con una distribución espacial más localizada. El  $H_2S$  presentó una distribución espacial similar a la observada para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , concentrándose principalmente en los sectores sur y sur-sureste bajo condiciones de bajas velocidades del viento. Por otro lado, el  $SO_2$  presentó una contribución predominante desde el sector este,

diferenciándose de los demás contaminantes. Los resultados sugieren un desplazamiento en los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes respecto a los trimestres previos, evidenciando cambios temporales en los patrones de contribución y en la dirección predominante de procedencia de los contaminantes atmosféricos.

**Figura 41:** *Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el cuarto trimestre de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash*



Durante el cuarto trimestre de 2024, el  $PM_{10}$  mostró contribuciones potenciales procedentes principalmente de los sectores oeste-noroeste y sur-sureste, observándose dos núcleos de alta probabilidad bien definidos asociados a condiciones de bajas velocidades del viento. El  $PM_{2.5}$  presentó una contribución predominante desde el sector oeste-noroeste, observándose una distribución espacial más concentrada que la registrada para  $PM_{10}$ , mientras que el  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada en el sector sur-sureste, mostrando uno de los patrones espaciales más definidos entre los contaminantes evaluados. Por

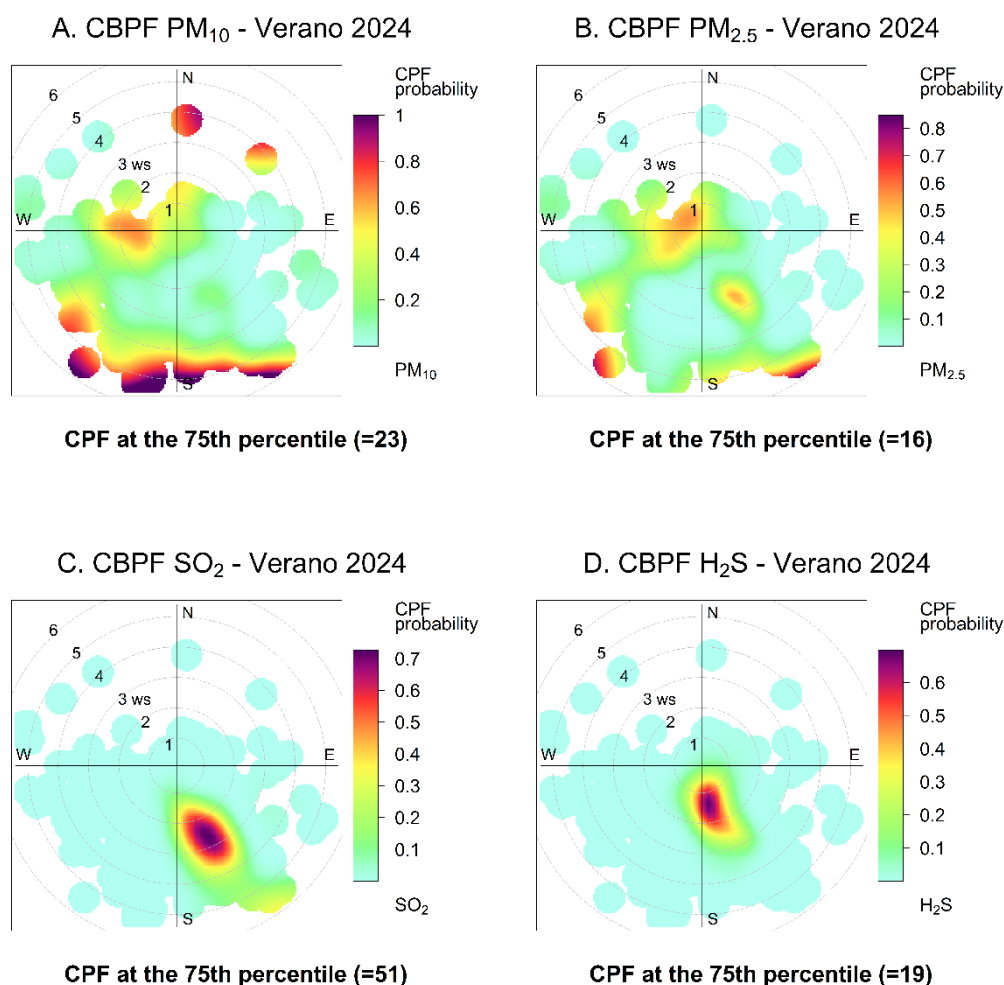
su parte, El H<sub>2</sub>S presentó mayores probabilidades de ocurrencia asociadas a los sectores sur y suroeste, concentrándose principalmente bajo condiciones de bajas velocidades de viento. Estos resultados reflejan nuevamente una variabilidad espacial y temporal en la localización de las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos.

En términos generales, el análisis trimestral mediante la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) evidenció que las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos presentaron variaciones a lo largo del año 2024. Los sectores de contribución identificados no permanecieron constantes entre trimestres, observándose cambios tanto en dirección como en intensidad de las probabilidades asociadas a los episodios de concentraciones elevadas. Asimismo, se identificaron diferencias en los patrones espaciales de los contaminantes evaluados, lo que sugiere comportamientos de emisión y dispersión distintos para cada uno de ellos. Estos resultados evidencian una variabilidad temporal en los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos, observándose cambios en la dirección predominante de contribución y en la intensidad de las probabilidades estimadas mediante el método CBPF a lo largo del año 2024.

#### **b) Análisis estacional mediante CBPF**

Con la finalidad de identificar las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos en función de la variabilidad estacional del distrito de Chimbote durante el año 2024, se aplicó la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF), utilizando los registros horarios de concentración de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en conjunto con las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento. El análisis se realizó considerando el percentil 75 de concentración de cada contaminante, permitiendo identificar los sectores de procedencia asociados a episodios de concentraciones elevadas. Los resultados fueron agrupados según las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera, con el propósito de evaluar la variación estacional de las probables fuentes de emisión presentes en el área de estudio.

**Figura 42:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el verano de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

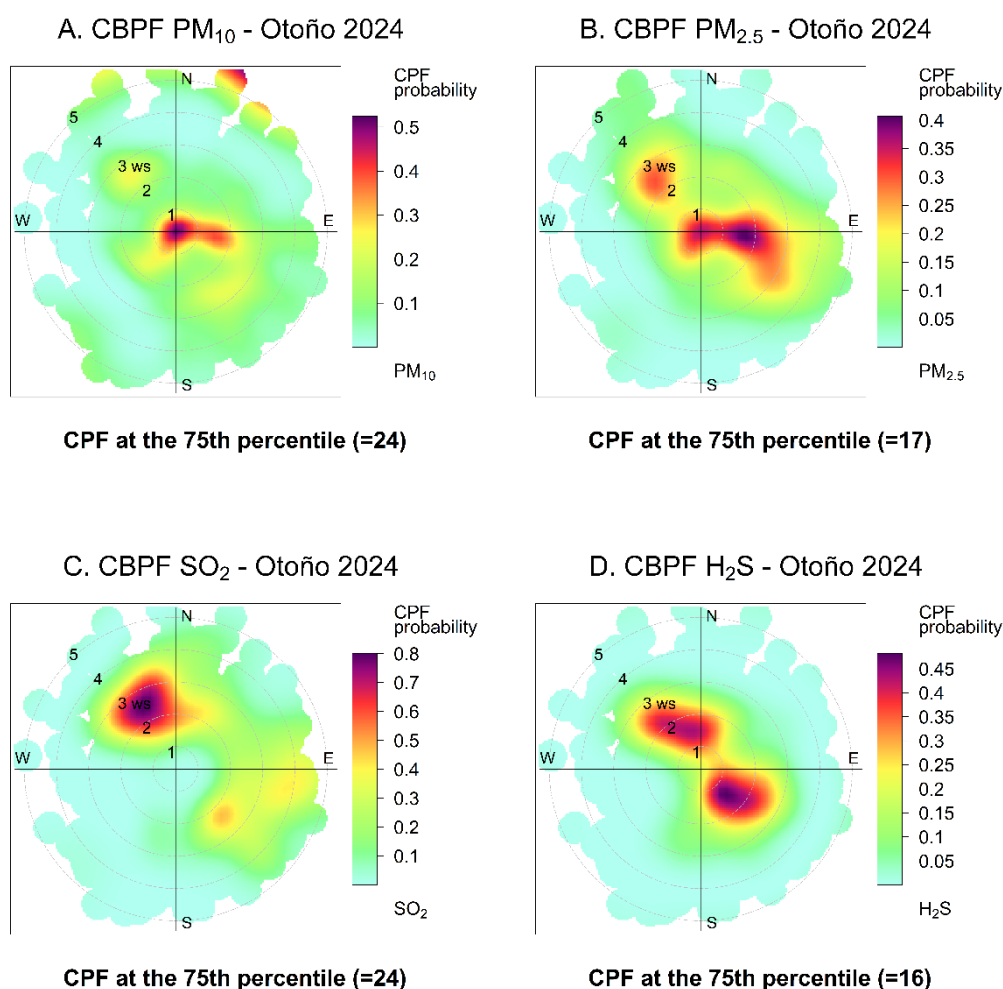


Durante la estación de verano de 2024 se observaron patrones diferenciados en la procedencia de los contaminantes atmosféricos. El  $PM_{10}$  presentó una distribución relativamente dispersa, con mayores probabilidades de ocurrencia asociadas principalmente a los sectores sur y suroeste, observándose además contribuciones secundarias desde el sector oeste bajo condiciones de bajas velocidades de viento. De manera similar, el  $PM_{2.5}$  presentó una distribución más concentrada que la observada para  $PM_{10}$ , identificándose un núcleo principal de contribución potencial hacia el sector sur-sureste. Por otro lado, el  $SO_2$  evidenció el patrón espacial más definido entre los contaminantes evaluados, concentrando las mayores probabilidades de ocurrencia entre los sectores sur y sureste, indicando la presencia de una fuente potencial claramente definida durante esta estación. Asimismo, el  $H_2S$  presentó un comportamiento similar al observado para  $SO_2$ , concentrando las mayores probabilidades de

ocurrencia en los sectores sur y sureste bajo condiciones de bajas velocidades del viento, concentrando las mayores probabilidades de ocurrencia en los sectores sur y sureste. En conjunto, los resultados sugieren que durante el verano las contribuciones más importantes provinieron principalmente de los sectores localizados al sur de la estación de monitoreo.

En conjunto, los resultados sugieren que durante el verano las mayores probabilidades de ocurrencia de concentraciones elevadas estuvieron asociadas principalmente a sectores ubicados al sur y sureste de la estación de monitoreo, aunque con diferencias en el grado de dispersión espacial entre los contaminantes evaluados.

**Figura 43:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el otoño de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

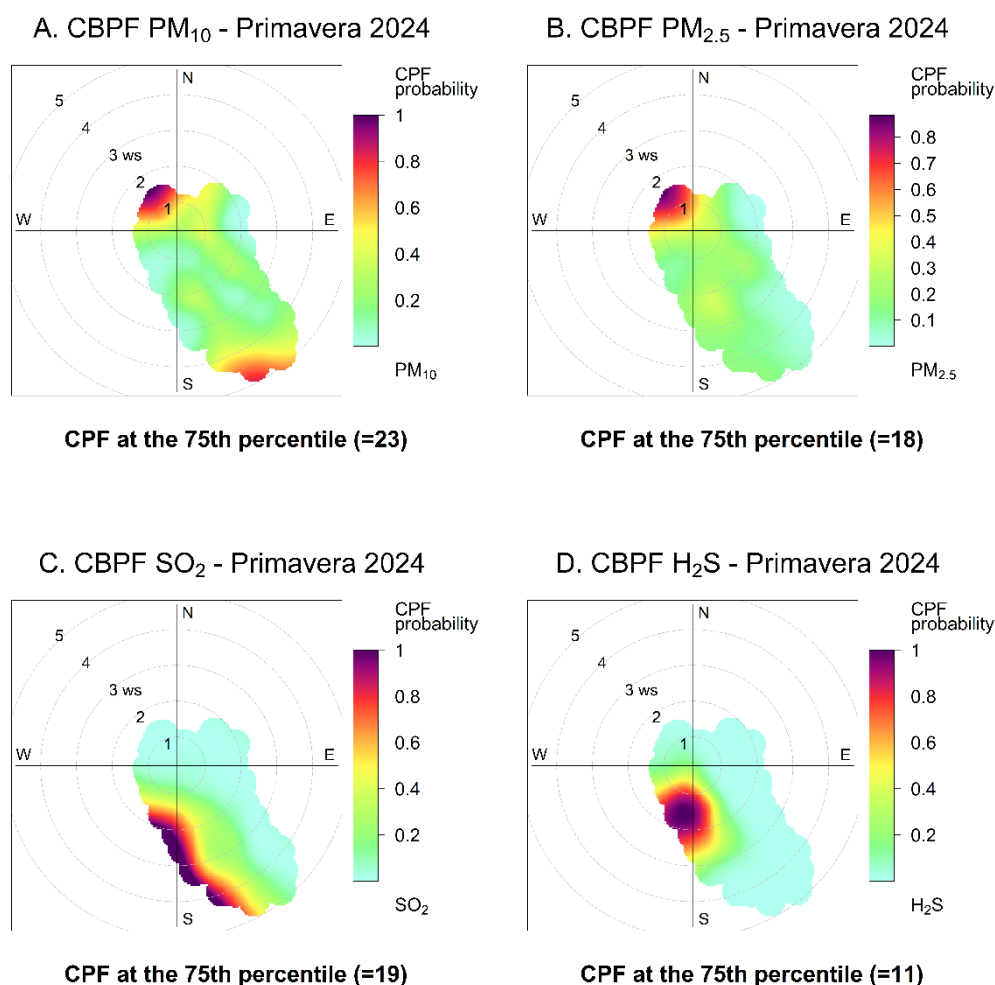


Durante el otoño de 2024 se evidenció una modificación en los patrones espaciales de contribución respecto al verano. El  $PM_{10}$  presentó mayores probabilidades de ocurrencia

asociadas principalmente a los sectores este y oeste, observándose un núcleo de contribución más intenso hacia el sector este bajo condiciones de bajas velocidades del viento, mientras que el  $PM_{2.5}$  presentó una distribución espacial más amplia que la observada para  $PM_{10}$ , identificándose dos sectores principales de contribución potencial localizados hacia el oeste-noroeste y el este-sureste. En el caso del  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada en el sector noroeste, mostrando uno de los patrones espaciales más definidos entre los contaminantes evaluados durante esta estación, sugiriendo una fuente predominante localizada en dicha dirección. Por su parte, el  $H_2S$  presentó una distribución bimodal, con focos de contribución procedentes tanto del noroeste como del sur-sureste, evidenciando una distribución espacial asociada a más de un sector potencial de contribución. Estos resultados evidencian un cambio estacional en la ubicación de los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos, reflejando una variación temporal en los patrones de contribución identificados mediante el método CBPF.

No fue posible aplicar el método CBPF durante la estación de invierno de 2024 debido a la insuficiencia de registros simultáneos de concentración de contaminantes y variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento). Dado que la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) requiere información conjunta de concentración y viento para identificar los sectores potenciales de contribución, no se contó con información suficiente para generar resultados estadísticamente confiables durante esta estación.

**Figura 44:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante la primavera de 2024 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash



Durante la primavera de 2024 se identificaron patrones espaciales bien definidos para los contaminantes evaluados. El  $PM_{10}$  presentó contribuciones potenciales predominantemente desde los sectores noroeste y sur-sureste, observándose una mayor intensidad de probabilidad en este último sector, mostrando la posible influencia de múltiples fuentes emisoras. El  $PM_{2.5}$  presentó un patrón espacial similar al observado para  $PM_{10}$ , con una contribución predominante desde el sector noroeste y una menor influencia procedente del sector sur-sureste, sugiriendo la existencia de fuentes de contribución compartidas. En contraste, el  $SO_2$  mostró una contribución potencial claramente concentrada hacia los sectores sur y suroeste, evidenciando un patrón espacial altamente definido, evidenciando una dirección predominante de aporte. Del mismo modo, el  $H_2S$  presentó una distribución espacial semejante a la observada para el  $SO_2$ , concentrando las mayores probabilidades en los sectores sur y suroeste. Estos resultados

indican que durante la primavera se consolidaron patrones de contribución más definidos para los contaminantes gaseosos respecto a los contaminantes particulados.

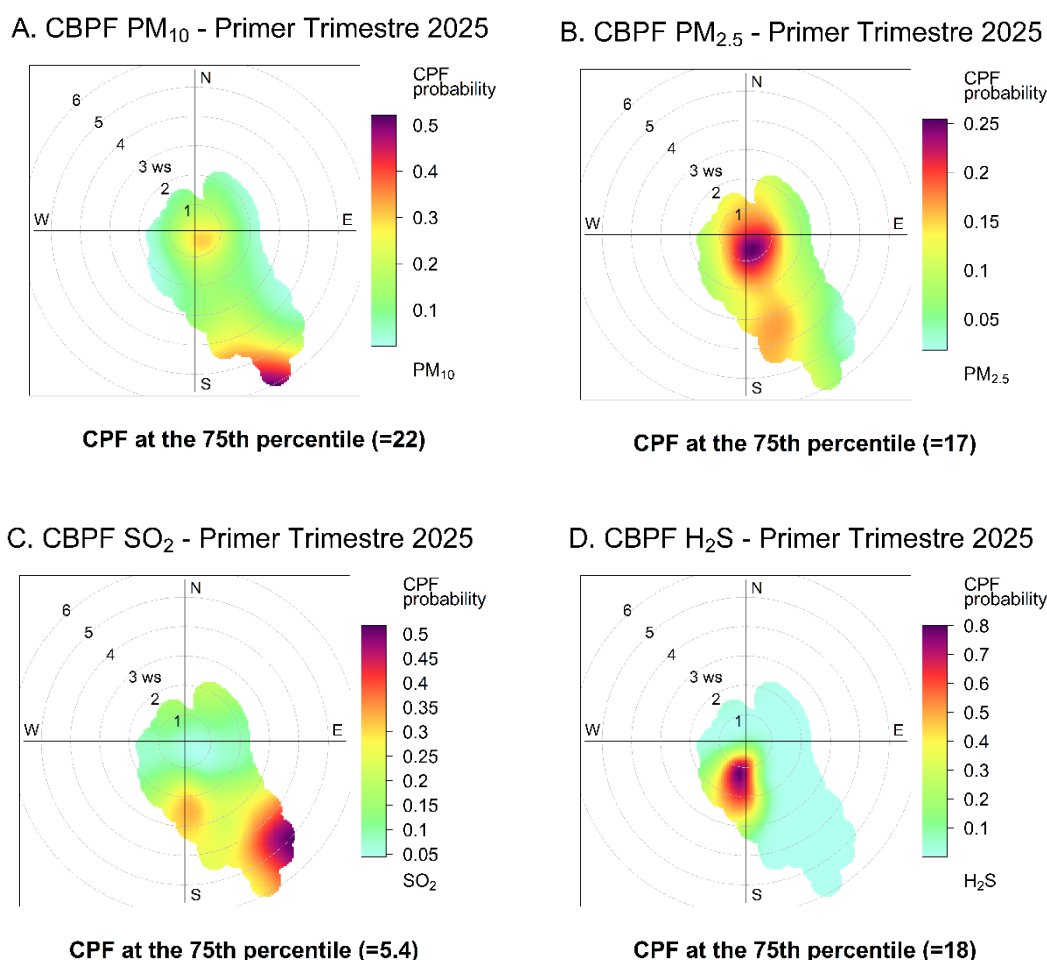
En términos generales, el análisis estacional mediante la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) evidenció variaciones espaciales en los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos durante el año 2024. Las direcciones de contribución identificadas para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  variaron entre estaciones, observándose patrones espaciales diferenciados para cada contaminante. Asimismo, los contaminantes gaseosos presentaron distribuciones más concentradas y definidas que los contaminantes particulados. Estos resultados permitieron identificar la variabilidad estacional de los sectores de contribución asociados a los episodios de mayores concentraciones registrados en el distrito de Chimbote durante el año 2024.

#### ***4.4.2 Determinación de las probables fuentes de origen de los contaminantes mediante el método CBPF en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash para el año 2025***

##### **a) Análisis trimestral mediante CBPF**

Con la finalidad de identificar las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Chimbote durante el año 2025, se aplicó la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF), utilizando los datos horarios de concentración de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  junto con la velocidad y dirección del viento. El análisis se realizó considerando el percentil 75 de concentración para cada contaminante, permitiendo identificar los sectores de procedencia asociados a episodios de concentraciones elevadas y reconocer espacialmente las probables fuentes de contribución de cada contaminante. Los resultados obtenidos se presentan de manera trimestral con el propósito de evaluar la variabilidad temporal de las probables fuentes de emisión durante el periodo de estudio.

**Figura 45:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el primer trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

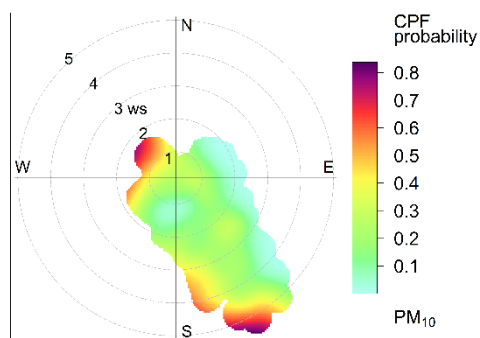


Durante el primer trimestre de 2025 se identificaron patrones diferenciados en la dirección de procedencia de los contaminantes atmosféricos. El  $PM_{10}$  presentó una contribución predominante asociada al sector sur-sureste, observándose un núcleo de alta probabilidad bajo condiciones de bajas velocidades de viento, indicando la posible influencia de una fuente potencial localizada en dicha dirección. El  $PM_{2.5}$  presentó una contribución potencial más próxima a la estación de monitoreo, asociada principalmente a vientos de baja velocidad procedentes de los sectores norte y este, mostrando una distribución espacial más localizada que la observada para  $PM_{10}$ . El  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada en el sector sur-sureste, evidenciando uno de los patrones espaciales más definidos entre los contaminantes evaluados durante este trimestre. Por su parte, el  $H_2S$  presentó una contribución predominante asociada principalmente a los sectores sur y sur-sureste, bajo condiciones de bajas velocidades de viento, asociada principalmente a velocidades de viento

bajas. En conjunto, los resultados evidencian patrones de contribución espacial diferenciados entre los contaminantes evaluados, observándose coincidencias direccionales para  $PM_{10}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , mientras que  $PM_{2.5}$  mostró un comportamiento espacial más localizado y diferenciado.

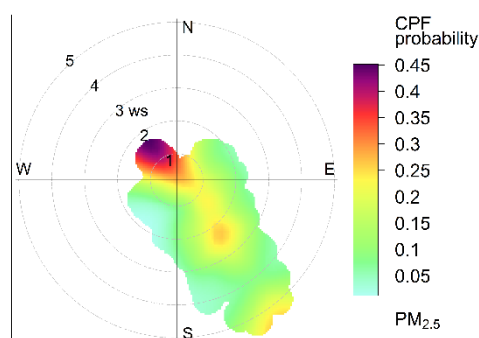
**Figura 46:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el segundo trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

A. CBPF  $PM_{10}$  - Segundo Trimestre 2025



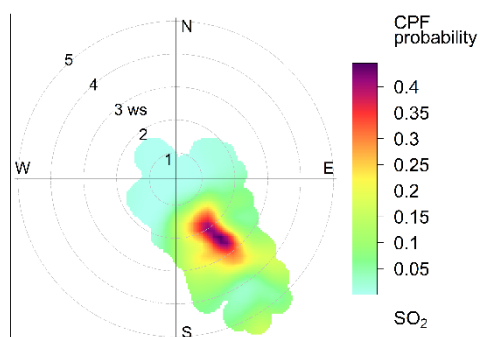
CPF at the 75th percentile (=16)

B. CBPF  $PM_{2.5}$  - Segundo Trimestre 2025



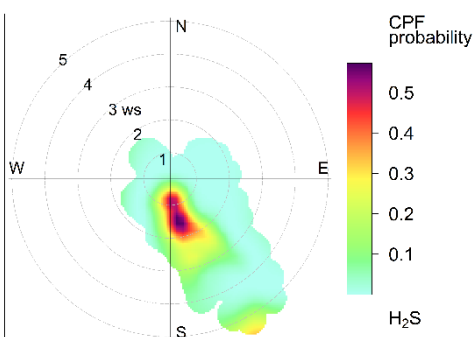
CPF at the 75th percentile (=14)

C. CBPF  $SO_2$  - Segundo Trimestre 2025



CPF at the 75th percentile (=16)

D. CBPF  $H_2S$  - Segundo Trimestre 2025

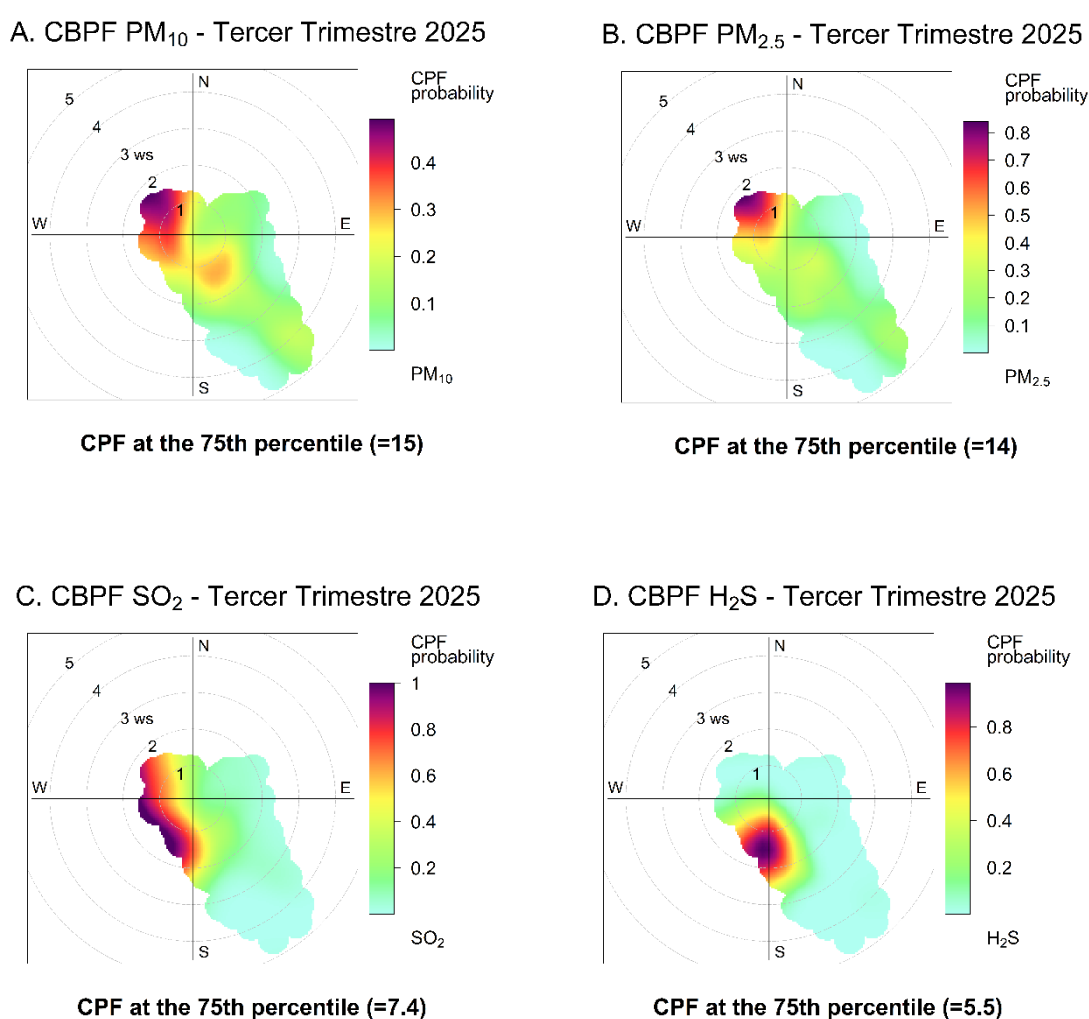


CPF at the 75th percentile (=8.3)

Durante el segundo trimestre de 2025 se observaron cambios en los patrones espaciales de contribución respecto al trimestre anterior. El  $PM_{10}$  presentó dos sectores potenciales de contribución, observándose un núcleo principal de alta probabilidad hacia el sector sur-sureste y un núcleo secundario hacia el sector oeste-noroeste, ambos asociados principalmente a velocidades de viento bajas. El  $PM_{2.5}$  presentó una contribución potencial predominante desde el sector oeste-noroeste, observándose además una contribución secundaria de menor intensidad hacia el sector sureste. Por otro lado, el  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada en el sector sur-sureste, evidenciando un patrón espacial bien definido

durante este trimestre, indicando la influencia de una fuente específica localizada en dicha dirección. De manera similar, El  $H_2S$  presentó una contribución potencial concentrada principalmente hacia los sectores sur y sur-sureste, bajo condiciones de bajas velocidades de viento. En conjunto, los resultados evidencian una predominancia de contribuciones potenciales procedentes de los sectores sur-sureste y oeste-noroeste durante este periodo, observándose patrones espaciales diferenciados entre los contaminantes evaluados.

**Figura 47:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el tercer trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

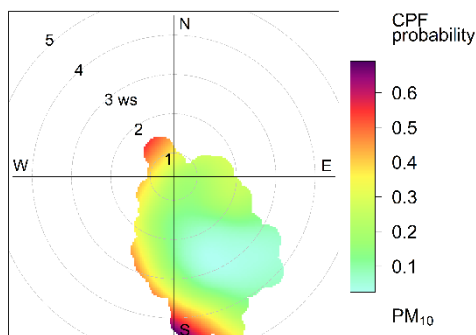


Durante el tercer trimestre de 2025, el  $PM_{10}$  presentó una contribución potencial predominante desde el sector oeste-noroeste, observándose además un foco secundario de contribución desde el sector sur-sureste bajo condiciones de bajas velocidades del viento. El  $PM_{2.5}$  presentó un patrón espacial similar al observado para  $PM_{10}$ , con una contribución

predominante desde el sector oeste-noroeste y una contribución secundaria de menor intensidad asociada al sector sureste, lo que sugiere sectores potenciales de contribución parcialmente compartidos, sugiriendo la posible influencia de fuentes comunes durante este periodo. El  $\text{SO}_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada hacia el sector oeste-oeste-suroeste, evidenciando uno de los patrones espaciales más definidos entre los contaminantes evaluados, evidenciando una dirección predominante de contribución. Por su parte, El  $\text{H}_2\text{S}$  mostró una contribución potencial localizada principalmente entre los sectores sur y suroeste, asociada a condiciones de baja velocidad del viento, diferenciándose del comportamiento observado para los demás contaminantes. En conjunto, los resultados evidencian una reorientación de los sectores potenciales de contribución hacia el cuadrante oeste durante este trimestre, particularmente para  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{SO}_2$ , mientras que el  $\text{H}_2\text{S}$  mantuvo un patrón diferenciado asociado a los sectores sur y suroeste.

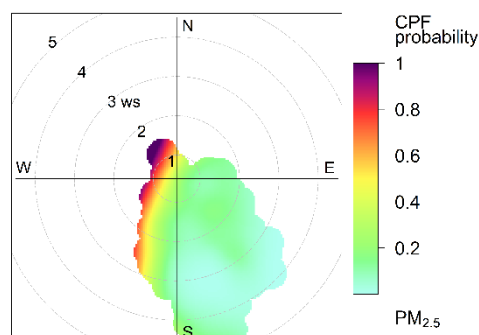
**Figura 48:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el cuarto trimestre de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash

A. CBPF  $PM_{10}$  - Cuarto Trimestre 2025



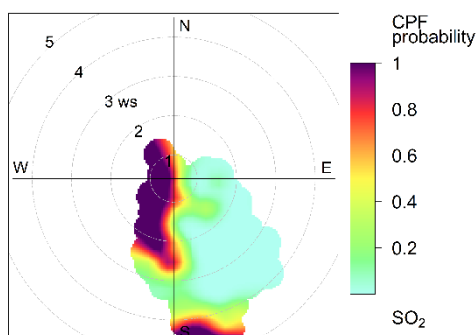
CPF at the 75th percentile (=16)

B. CBPF  $PM_{2.5}$  - Cuarto Trimestre 2025



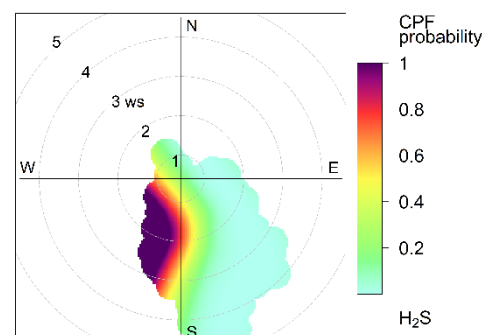
CPF at the 75th percentile (=14)

C. CBPF  $SO_2$  - Cuarto Trimestre 2025



CPF at the 75th percentile (=8.8)

D. CBPF  $H_2S$  - Cuarto Trimestre 2025



CPF at the 75th percentile (=6)

Durante el cuarto trimestre de 2025, el  $PM_{10}$  presentó una contribución potencial predominante desde los sectores sur y oeste-suroeste, observándose núcleos de alta probabilidad asociados principalmente a condiciones de bajas velocidades del viento, sugiriendo la influencia de fuentes potenciales localizadas en dichas direcciones. El  $PM_{2.5}$  presentó una contribución potencial predominantemente asociada al sector oeste-noroeste, mostrando una distribución espacial más localizada que la observada para  $PM_{10}$ , mostrando una distribución espacial más localizada respecto al  $PM_{10}$ . El  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada en los sectores oeste, suroeste y sur, mostrando uno de los patrones espaciales más definidos observados durante el año 2025, indicando la presencia de fuentes emisoras potenciales bien definidas durante este periodo. De manera similar, El  $H_2S$  presentó una contribución potencial predominantemente asociada a los sectores oeste y

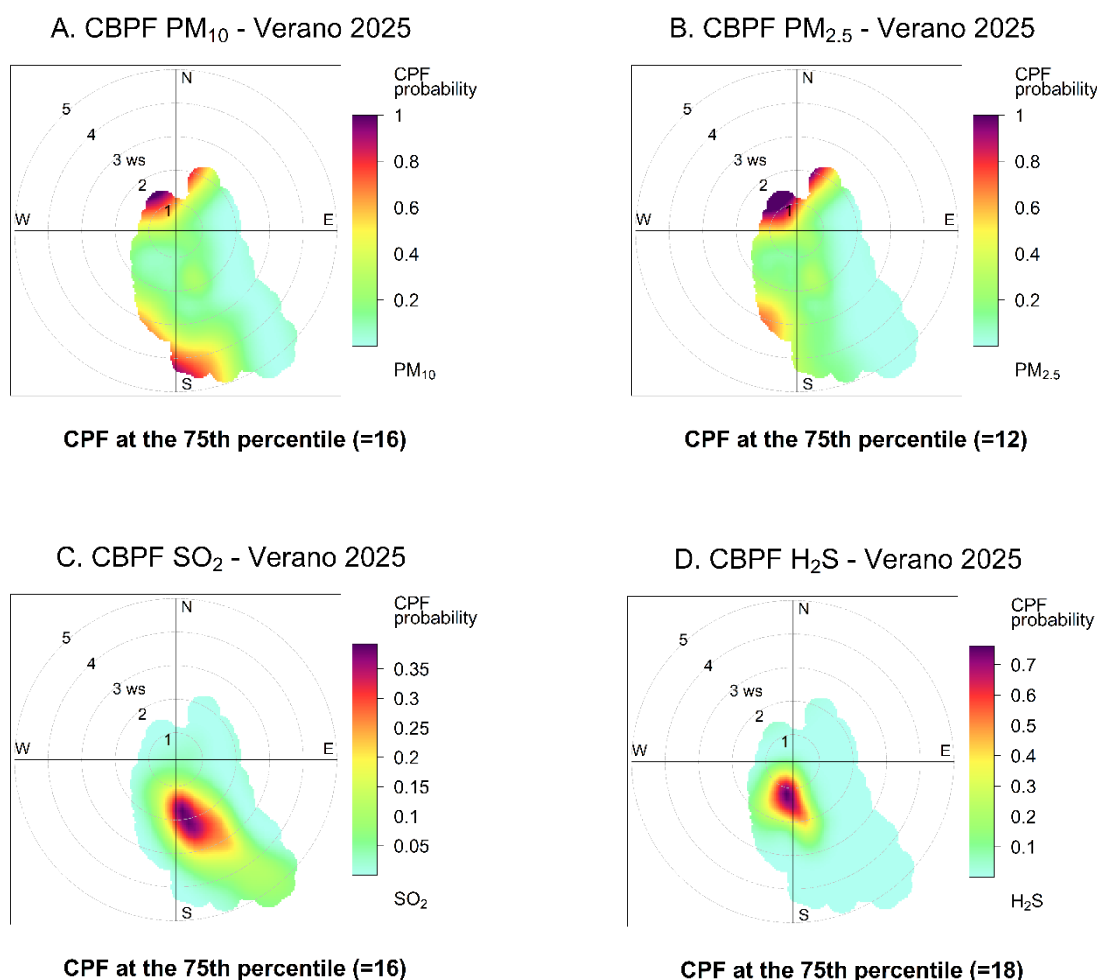
suroeste, mostrando una distribución espacial similar a la observada para  $\text{SO}_2$ , presentando un comportamiento espacial muy parecido al observado para el  $\text{SO}_2$ . Estos resultados reflejan una consolidación de los aportes procedentes de los sectores occidentales durante el último trimestre del año.

En términos generales, el análisis trimestral mediante la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) evidenció una variabilidad temporal en los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025. Los patrones de contribución identificados para  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  variaron entre trimestres, observándose cambios en las direcciones predominantes y en la distribución espacial de las probabilidades estimadas. Estos resultados permitieron identificar los principales sectores de contribución asociados a cada contaminante y evaluar su comportamiento espacial a lo largo del periodo de estudio.

#### **b) Análisis estacional mediante CBPF**

Con la finalidad de identificar las probables fuentes de origen de los contaminantes atmosféricos en función de la variabilidad estacional del distrito de Chimbote durante el año 2025, se aplicó la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF), utilizando los registros horarios de concentración de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  en conjunto con las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento. El análisis se realizó considerando el percentil 75 de concentración de cada contaminante, permitiendo identificar los sectores de procedencia asociados a episodios de concentraciones elevadas y reconocer espacialmente las probables fuentes de contribución de cada contaminante. Los resultados fueron agrupados según las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera, con el propósito de evaluar la variación estacional de las probables fuentes de emisión presentes en el área de estudio.

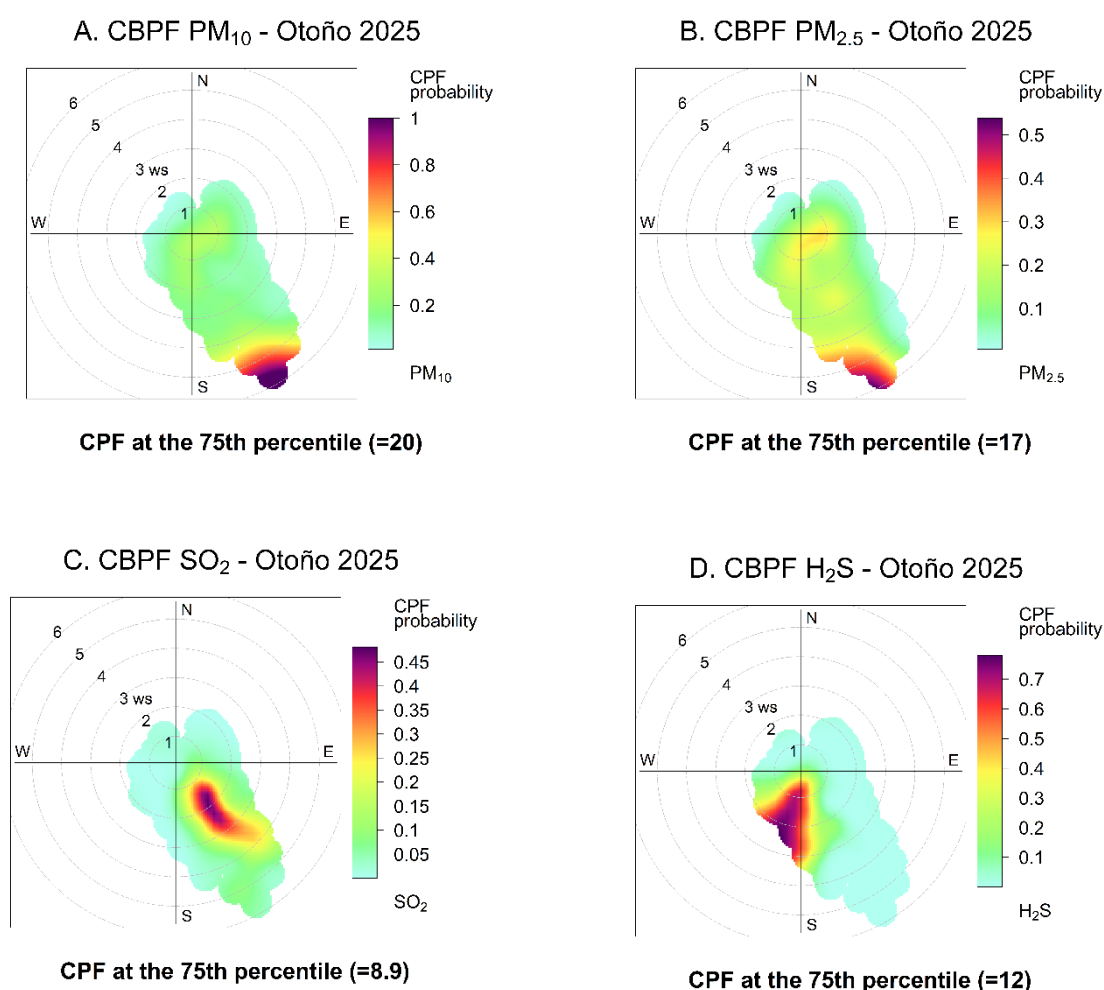
**Figura 49:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el verano de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash



Durante la estación de verano de 2025 se observaron diferencias en la procedencia de los contaminantes atmosféricos evaluados. El  $PM_{10}$  presentó contribuciones potenciales procedentes principalmente de los sectores oeste-noroeste y sur-surste, observándose dos núcleos de alta probabilidad asociados a condiciones de bajas velocidades del viento, sugiriendo la influencia de múltiples fuentes potenciales de emisión. De manera similar, el  $PM_{2.5}$  presentó una contribución predominante desde el sector oeste-noroeste, observándose una contribución secundaria de menor intensidad hacia los sectores sur y sur-suroeste. Su distribución espacial fue más localizada que la observada para  $PM_{10}$ . Por otro lado, el  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada entre los sectores sur y suroeste, evidenciando un patrón espacial altamente definido durante esta estación, indicando una dirección específica de contribución durante esta estación. Asimismo, el  $H_2S$  mostró un

comportamiento espacial muy similar al observado para el  $\text{SO}_2$ , concentrando las mayores probabilidades de ocurrencia en los sectores sur y suroeste, concentrando sus mayores probabilidades de ocurrencia en los sectores sur y suroeste. En conjunto, los resultados evidencian diferencias entre los patrones de contribución de los contaminantes particulados y gaseosos durante el verano.

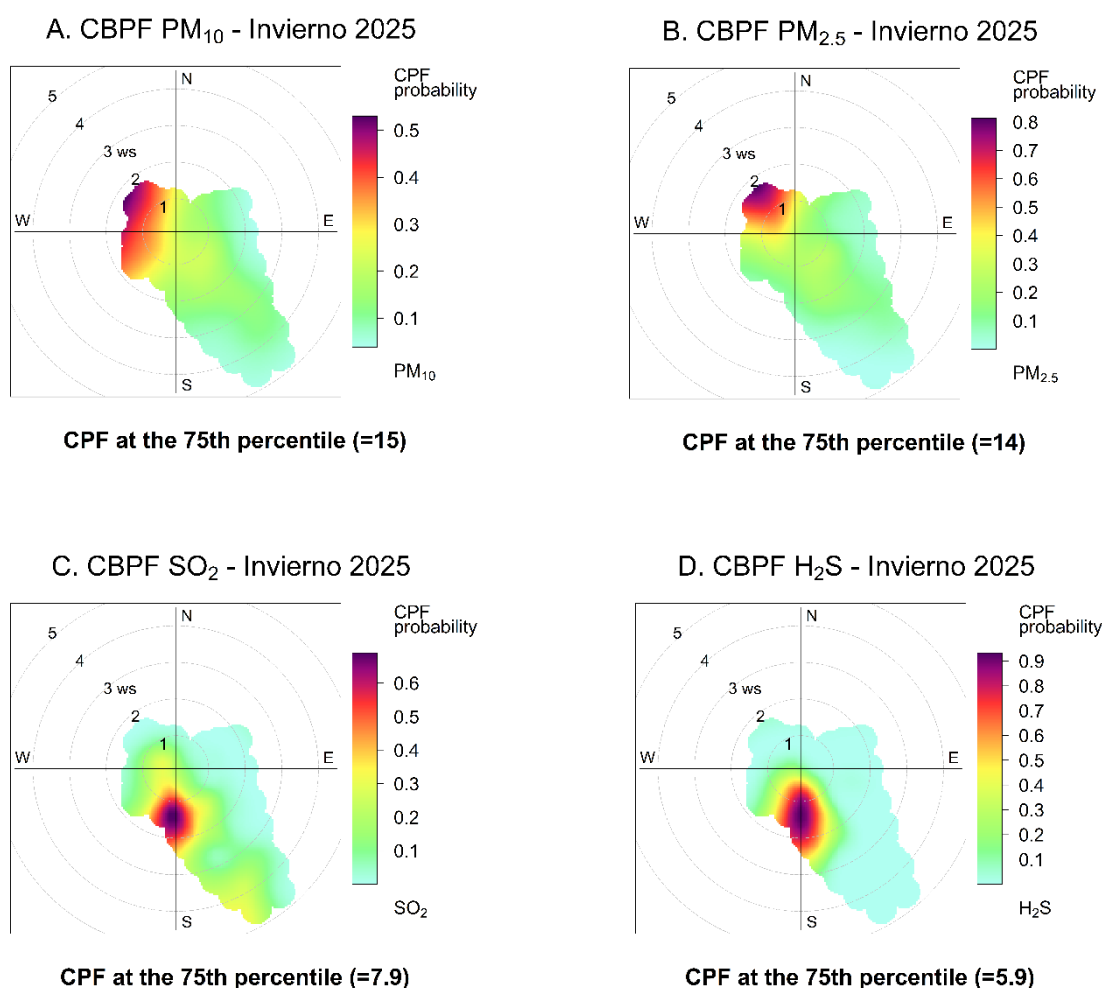
**Figura 50:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  durante el otoño de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash



Durante el otoño de 2025 se observó una mayor convergencia en los patrones espaciales de contribución. El  $\text{PM}_{10}$  presentó una contribución potencial predominante desde el sector sur-sureste, observándose un núcleo de alta probabilidad asociado principalmente a condiciones de bajas velocidades del viento, evidenciando una fuente potencial claramente localizada en dicha dirección. Del mismo modo, el  $\text{PM}_{2.5}$  presentó una contribución predominante desde el sector sur-sureste, mostrando un patrón espacial muy similar al observado para  $\text{PM}_{10}$  durante esta

estación, sugiriendo posibles fuentes de emisión similares a las identificadas para el  $PM_{10}$ . El  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada entre los sectores sur y sureste, evidenciando una dirección predominante de aporte durante esta estación, indicando una dirección definida de contribución. Por su parte, el  $H_2S$  presentó una contribución predominante desde los sectores suroeste y sur, mostrando un patrón espacial diferenciado respecto a los demás contaminantes evaluados. En conjunto, los resultados evidencian una predominancia de contribuciones potenciales procedentes de sectores ubicados al sur de la estación de monitoreo, observándose una notable convergencia espacial entre los contaminantes evaluados durante esta estación.

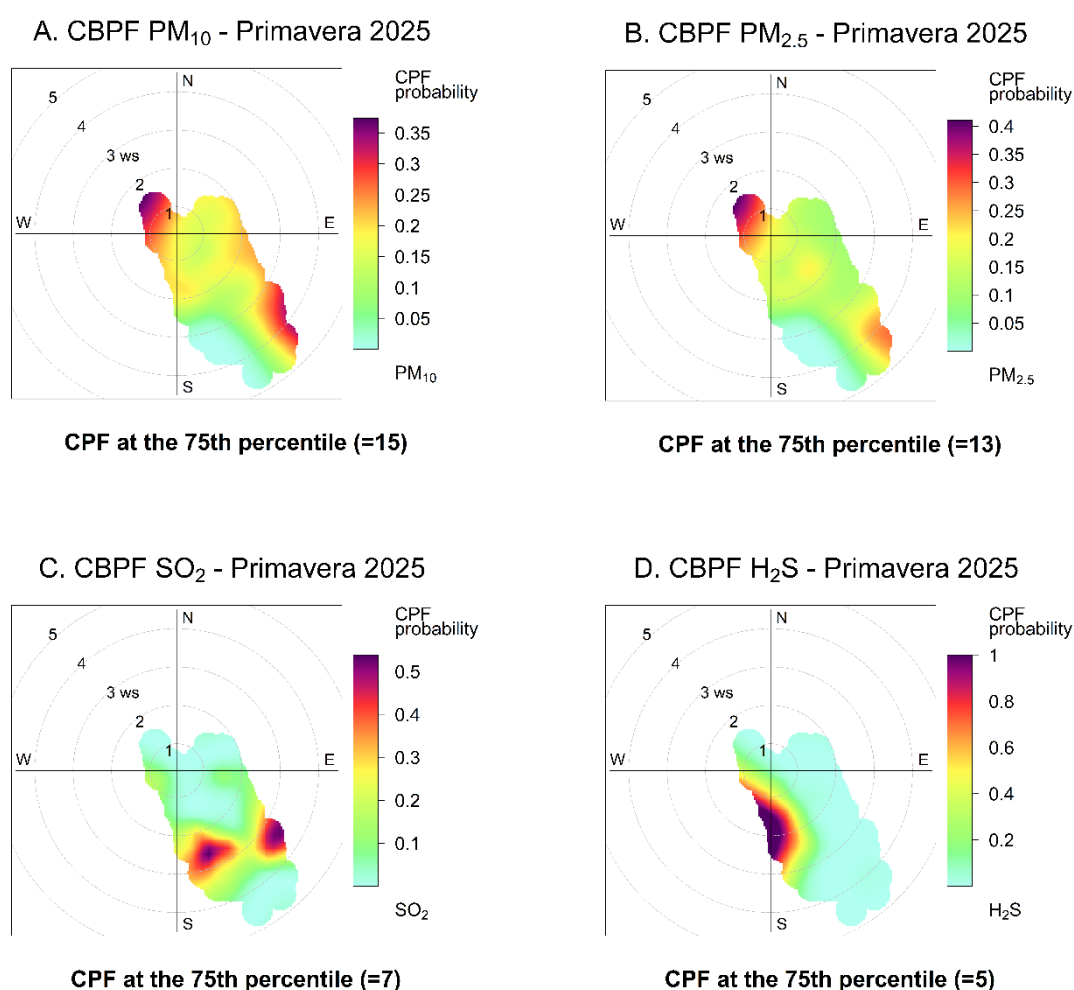
**Figura 51:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante el invierno de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash



Durante la estación de invierno de 2025 se identificaron patrones diferenciados entre los contaminantes particulados y gaseosos. El  $PM_{10}$  presentó una contribución potencial

predominante desde el sector oeste-noroeste, observándose además una contribución secundaria procedente del sector sur-sureste bajo condiciones de bajas velocidades del viento. De manera similar, el  $PM_{2.5}$  presentó una contribución predominante desde el sector oeste-noroeste, mostrando un patrón espacial similar al observado para  $PM_{10}$ , aunque con una distribución más concentrada. Por otro lado, el  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente localizada entre los sectores sur y sur-sureste, evidenciando un patrón espacial diferenciado respecto a los contaminantes particulados, mientras que El  $H_2S$  presentó una distribución espacial muy similar a la observada para  $SO_2$ , concentrando las mayores probabilidades de ocurrencia entre los sectores sur y sur-sureste. Estos resultados evidencian patrones espaciales claramente diferenciados entre los contaminantes particulados y gaseosos durante la estación de invierno, observándose una predominancia de contribuciones desde el oeste-noroeste para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , mientras que  $SO_2$  y  $H_2S$  presentaron contribuciones concentradas en los sectores sur y sur-sureste.

**Figura 52:** Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  durante la primavera de 2025 en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash



Durante la primavera de 2025 se observaron contribuciones procedentes de múltiples sectores para los contaminantes evaluados. El  $PM_{10}$  presentó contribuciones potenciales principalmente desde los sectores oeste-noroeste y sur-sureste, observándose dos núcleos de alta probabilidad asociados a condiciones de bajas velocidades del viento, sugiriendo la presencia de más de una fuente potencial de emisión. De manera similar, el  $PM_{2.5}$  presentó una distribución espacial similar a la observada para  $PM_{10}$ , con contribuciones predominantes desde los sectores oeste-noroeste y sur-sureste, aunque con una distribución más concentrada, evidenciando contribuciones predominantes desde los sectores oeste-noroeste y sur-sureste. El  $SO_2$  presentó una contribución potencial claramente concentrada entre los sectores sur y sureste, evidenciando una dirección predominante de aporte durante esta estación, indicando una fuente potencial claramente definida durante esta estación. Por su parte, El  $H_2S$  presentó

una contribución predominante desde los sectores sur y suroeste, mostrando una distribución espacial más concentrada que la observada para los demás contaminantes evaluados, presentando una distribución espacial más concentrada que la observada para los demás contaminantes. Estos resultados reflejan nuevamente diferencias en los patrones de contribución entre contaminantes particulados y gaseosos.

En términos generales, el análisis estacional mediante la Función de Probabilidad Bivariada Condicional (CBPF) evidenció variaciones espaciales en los sectores potencialmente asociados a las concentraciones elevadas de los contaminantes atmosféricos durante el año 2025. Las direcciones de contribución identificadas para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  variaron entre estaciones, observándose patrones espaciales diferenciados según el contaminante y la época del año. Asimismo, los contaminantes particulados mostraron una influencia recurrente de los sectores oeste-noroeste, mientras que los contaminantes gaseosos presentaron contribuciones predominantemente asociadas a los sectores sur, sureste y suroeste. Estos resultados permitieron identificar la variabilidad estacional de los sectores de contribución asociados a los episodios de mayores concentraciones registrados en el distrito de Chimbote durante el año 2025.

#### **4.5 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el distrito de Chimbote, Santa, Áncash durante los años 2024-2025**

Con la finalidad de identificar las posibles áreas de procedencia de las masas de aire que influyen en la calidad del aire del distrito de Chimbote, se aplicó el modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT), desarrollado por la NOAA. Este modelo permite reconstruir la trayectoria seguida por las masas de aire antes de arribar a un punto receptor, proporcionando información sobre los patrones de transporte atmosférico y las regiones potencialmente asociadas con el aporte de contaminantes.

El análisis se realizó utilizando datos meteorológicos del conjunto REANALYSIS del NCEP/NCAR, considerando retrotrayectorias de 48 horas hacia atrás, una altura de llegada de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL) y las coordenadas de la estación Inca Garcilaso de la Vega como punto receptor. Los parámetros utilizados para la ejecución del modelo se presentan en la tabla 29.

El análisis se desarrolló mediante dos enfoques complementarios. En primer lugar, se evaluaron las retrotrayectorias asociadas a los episodios críticos de concentración máxima de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ , con el propósito de identificar la procedencia de las masas de aire

durante los eventos de mayor contaminación atmosférica. En segundo lugar, se analizaron las retrotrayectorias correspondientes a fechas representativas de cada estación del año, permitiendo caracterizar los patrones estacionales de transporte atmosférico predominantes en el distrito de Chimbote durante los años 2024 y 2025.

**Tabla 29:** *Parámetros utilizados para la ejecución del modelo HYSPLIT*

| <b>Parámetro</b>           | <b>Valor</b>                       |
|----------------------------|------------------------------------|
| <b>Modelo</b>              | HYSPLIT                            |
| <b>Tipo de trayectoria</b> | Retrotrayectoria                   |
| <b>Duración</b>            | 48 horas                           |
| <b>Frecuencia</b>          | 6 horas                            |
| <b>Altura de llegada</b>   | 10 m AGL                           |
| <b>Punto receptor</b>      | Estación Inca Garcilaso de la Vega |
| <b>Latitud</b>             | -9.1029                            |
| <b>Longitud</b>            | -78.5651                           |
| <b>Base meteorológica</b>  | NCEP/NCAR Reanalysis               |
| <b>Periodo de análisis</b> | 2024–2025                          |

La Tabla 29 presenta los parámetros considerados para la ejecución del modelo HYSPLIT. Las simulaciones fueron desarrolladas utilizando retrotrayectorias de 48 horas hacia atrás, calculadas cada 6 horas y a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL), tomando como punto receptor las coordenadas de la estación Inca Garcilaso de la Vega ubicada en el distrito de Chimbote. La utilización de datos meteorológicos REANALYSIS permitió reconstruir los patrones de transporte atmosférico asociados a las masas de aire que arribaron al área de estudio durante el periodo 2024–2025.

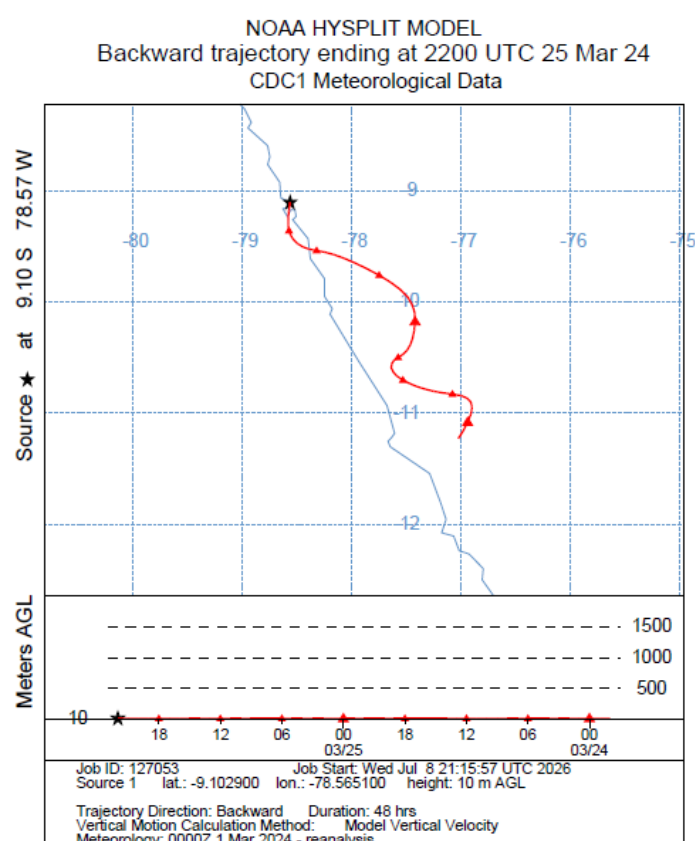
#### **4.5.1 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el año 2024**

##### **a) Retrotrayectorias de episodios críticos**

Con la finalidad de identificar las posibles áreas de procedencia de las masas de aire asociadas a los eventos de contaminación atmosférica registrados en el distrito de Chimbote durante el año 2024, se empleó el modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) de la NOAA. Para ello se seleccionaron los episodios críticos correspondientes a las concentraciones máximas de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S identificadas en la base de datos de monitoreo. Se calcularon retrotrayectorias de 48 horas utilizando datos

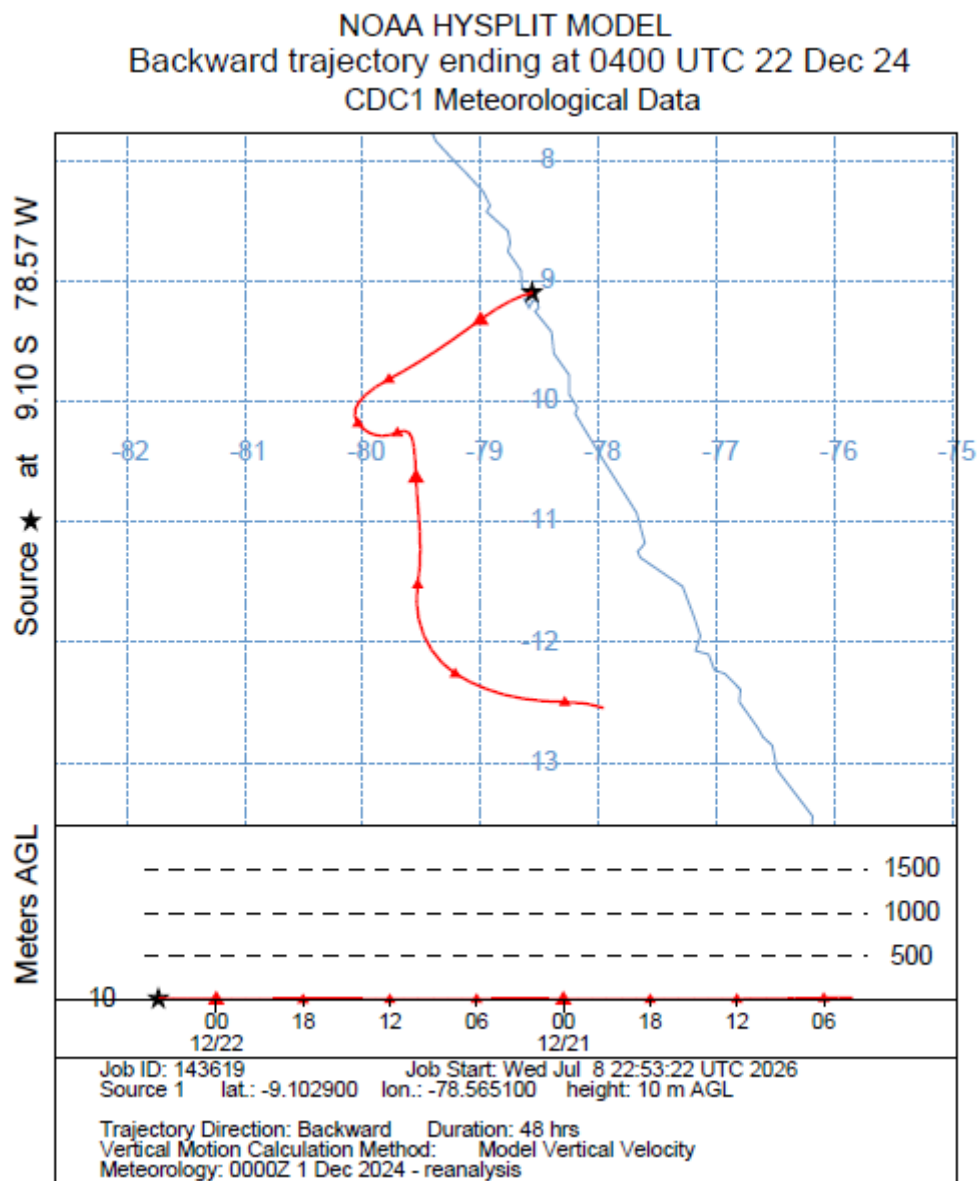
meteorológicos REANALYSIS y una altura de llegada de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL), con el propósito de determinar la procedencia de las masas de aire durante cada evento de máxima concentración.

**Figura 53:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  registrado en el distrito de Chimbote



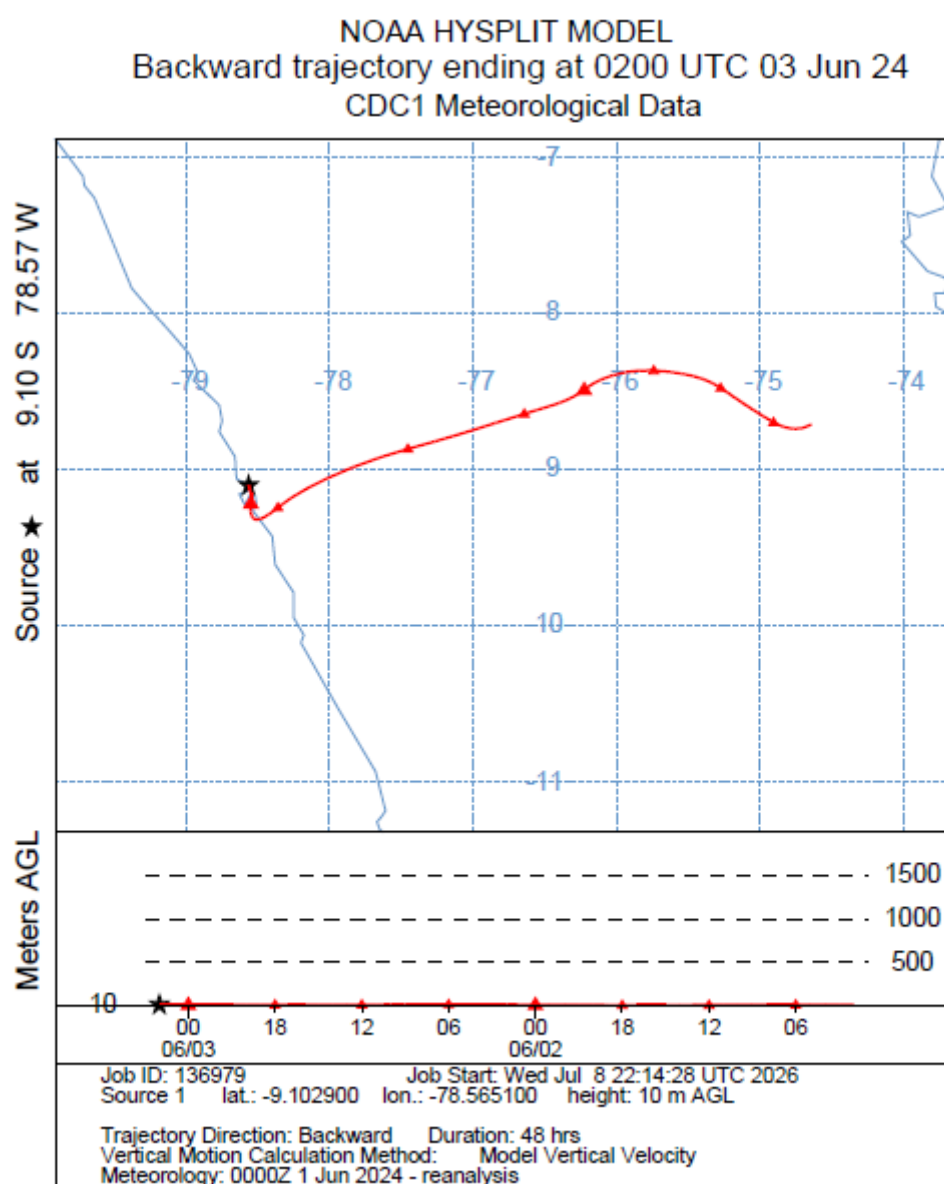
La figura 53 muestra la retrotrayectoria correspondiente al episodio crítico de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  registrado el 25 de marzo de 2024, fecha en la cual se alcanzaron las concentraciones máximas de  $299.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $289.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Se observa que las masas de aire que arribaron a la estación de monitoreo presentaron una procedencia predominante desde el sector sur-sureste, desplazándose paralelamente a la franja costera peruana antes de alcanzar el área de estudio. Este comportamiento evidencia que las masas de aire asociadas al episodio crítico arribaron a la estación desde el sector sur-sureste, siguiendo una trayectoria predominantemente costera. Los resultados sugieren la posible contribución de áreas localizadas al sur de Chimbote al transporte atmosférico registrado durante este evento.

**Figura 54:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de  $\text{SO}_2$  registrado en el distrito de Chimbote



La figura 54 presenta la retrotrayectoria asociada al episodio crítico de  $\text{SO}_2$  registrado el 21 de diciembre de 2024, durante el cual se alcanzó una concentración máxima de  $861.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La trayectoria evidencia una procedencia predominante desde el sur y suroeste de la zona de estudio, mostrando un desplazamiento paralelo a la costa peruana antes de llegar a Chimbote. Este patrón evidencia la influencia de procesos regionales de transporte atmosférico y sugiere la posible contribución de áreas localizadas al sur y sur-suroeste del área de estudio durante el episodio crítico registrado.

**Figura 55:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de  $H_2S$  registrado en el distrito de Chimbote



La figura 55 muestra la retrotrayectoria asociada al episodio crítico de  $H_2S$  registrado el 02 de junio de 2024, cuando se alcanzó una concentración máxima de  $118.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se observa que las masas de aire presentaron una trayectoria predominante desde el este-noreste, recorriendo zonas continentales del interior del país antes de arribar a Chimbote. Este comportamiento evidencia un patrón de transporte atmosférico diferente al observado para los episodios críticos de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , sugiriendo la posible contribución de áreas continentales ubicadas al este y noreste de la zona de estudio durante el evento analizado.

En conjunto, las retrotrayectorias correspondientes a los episodios críticos del año 2024 evidencian diferencias en la procedencia de las masas de aire asociadas a cada contaminante. Mientras que los eventos máximos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  estuvieron vinculados principalmente a trayectorias procedentes del sector sur-sureste, el episodio crítico de  $H_2S$  mostró una influencia predominante de masas de aire provenientes del interior continental. Por su parte, el episodio de  $SO_2$  presentó una trayectoria asociada al sector sur-suroeste. Estos resultados sugieren que los procesos de transporte atmosférico y las posibles áreas de contribución varían según el contaminante evaluado, evidenciando diferencias en los patrones de transporte atmosférico asociados a los episodios críticos registrados en el distrito de Chimbote.

#### **b) Análisis estacional de las retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT**

Con la finalidad de identificar los patrones estacionales de transporte atmosférico que influyen en la calidad del aire del distrito de Chimbote, se empleó el modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) de la NOAA. Para cada estación del año se seleccionó una fecha representativa correspondiente al mayor índice de carga contaminante, calculado a partir de las concentraciones registradas de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$ . Posteriormente, se generaron retrotrayectorias de masas de aire para un periodo de 48 horas hacia atrás, utilizando datos meteorológicos REANALYSIS, una altura de llegada de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL) y trayectorias calculadas cada 6 horas. Este análisis permitió identificar las principales rutas de transporte atmosférico y las posibles regiones de influencia sobre la estación de monitoreo "Inca Garcilaso de la Vega" durante las diferentes estaciones de los años 2024 y 2025.

La figura 56 muestra las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2024. Se observa que las masas de aire presentaron una procedencia predominante desde los sectores sur y sur-sureste lo cual coincide con los patrones predominantes observados en el análisis meteorológico y en las gráficas CBPF desarrolladas previamente del área de estudio, siguiendo principalmente la franja costera peruana antes de arribar a Chimbote. Asimismo, algunas trayectorias evidencian influencia de sectores continentales ubicados al este y noreste del país. Estos resultados evidencian la coexistencia de trayectorias de transporte costero y continental durante la estación de verano, observándose una predominancia de masas de aire procedentes del sector sur-sureste, junto con algunas trayectorias asociadas al interior continental del país.

**Figura 56:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2024, Chimbote

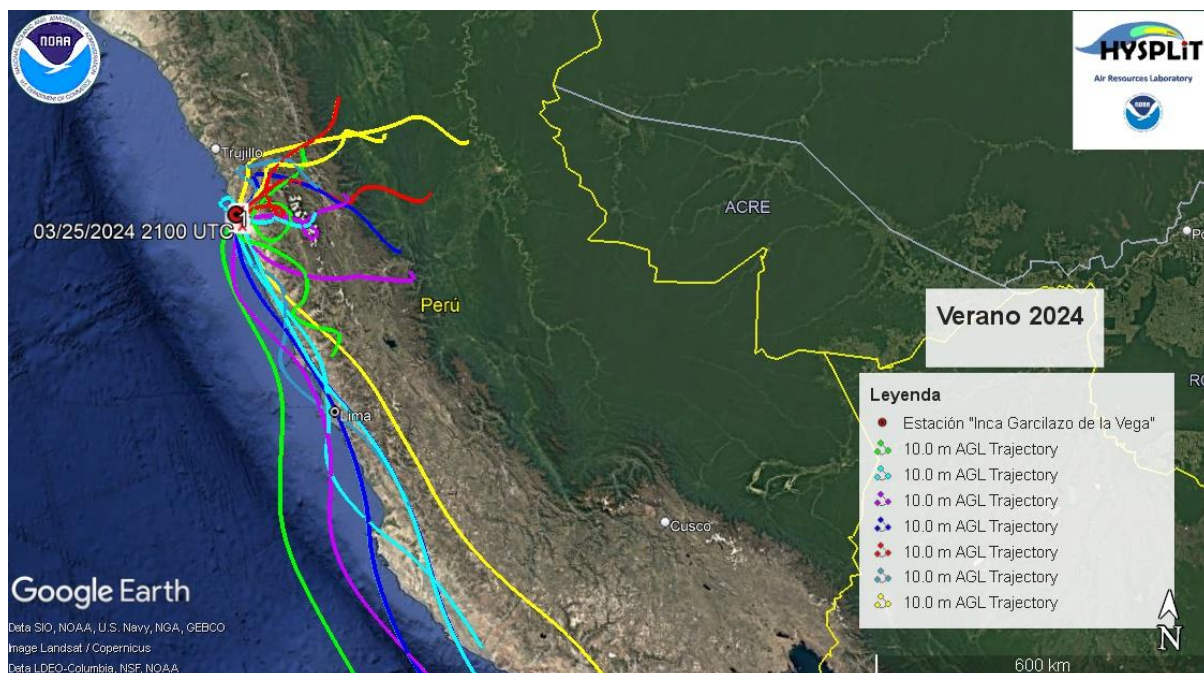
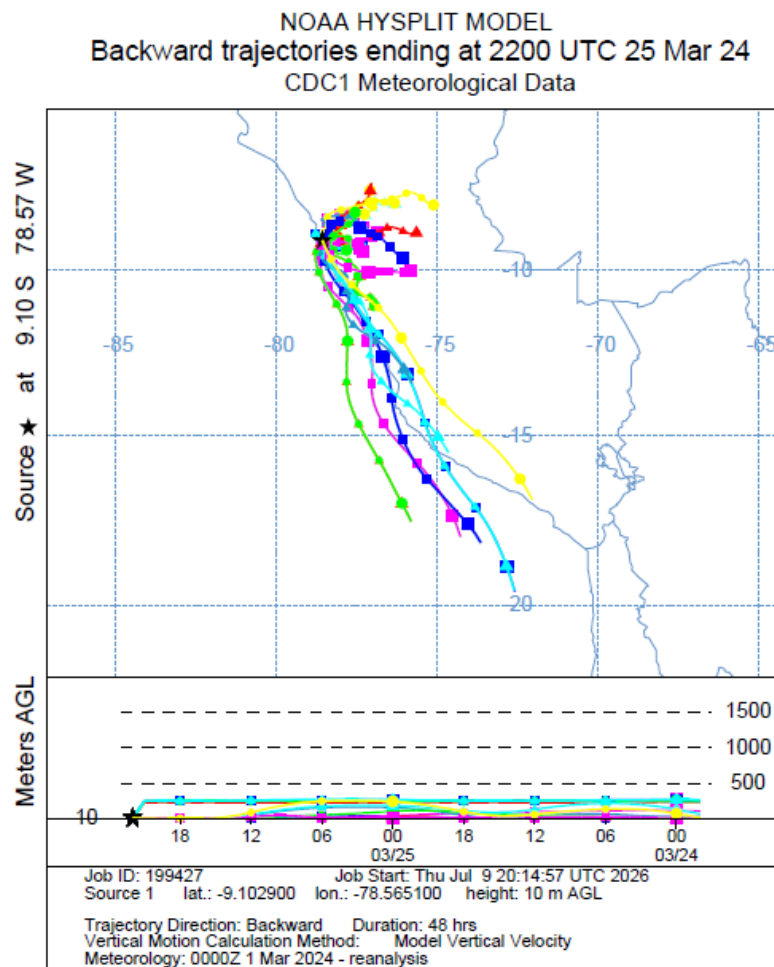


**Figura 57:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al Otoño de 2024, Chimbote

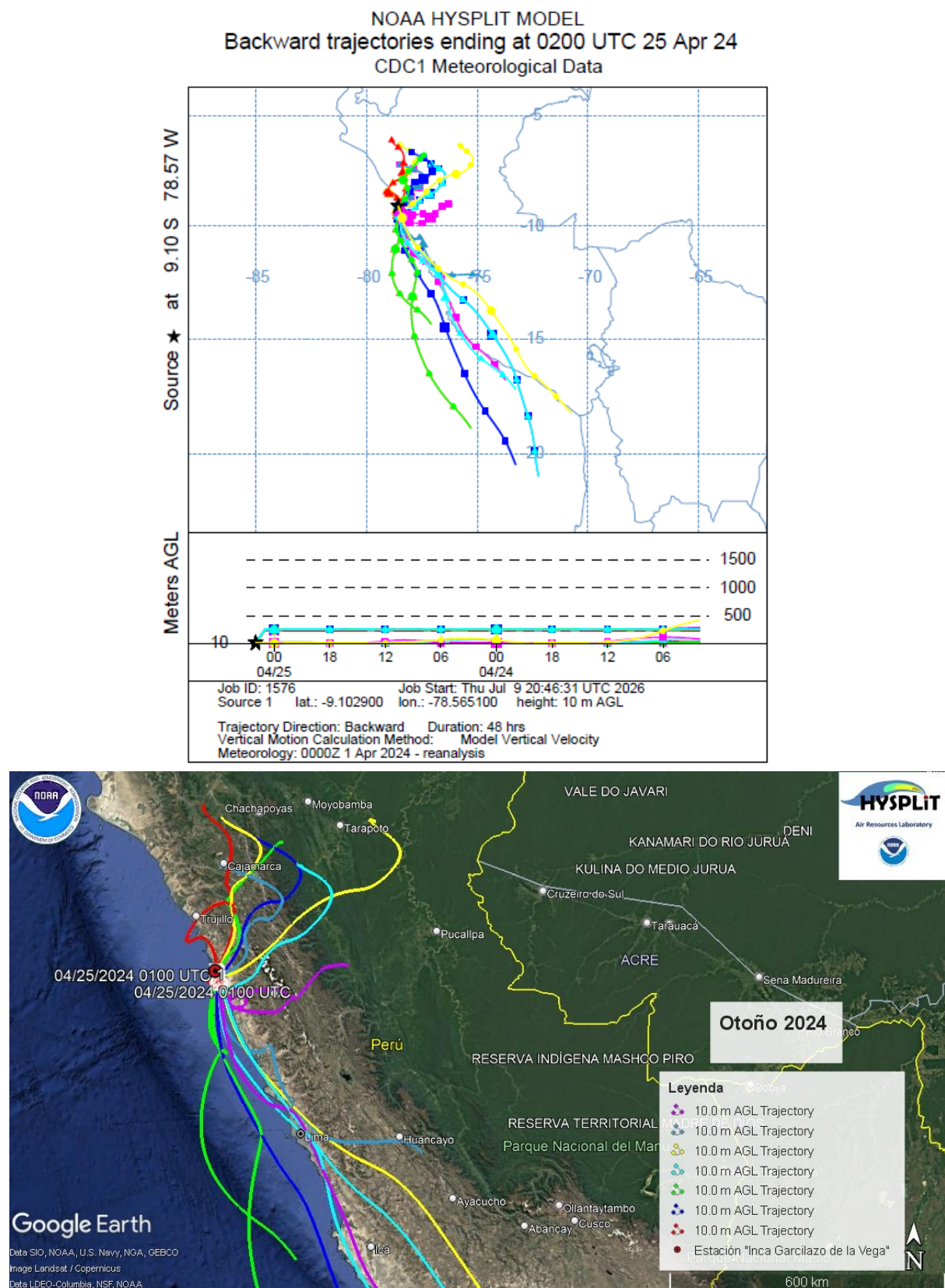


**Figura 58:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al Invierno de 2024, Chimbote

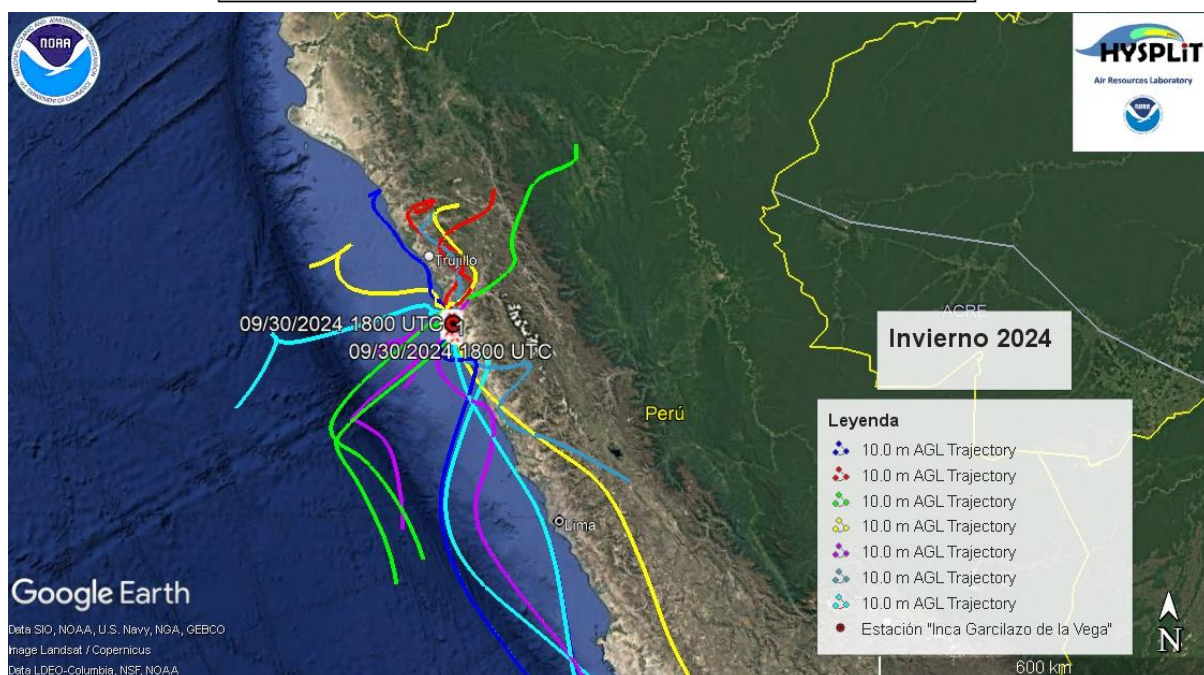
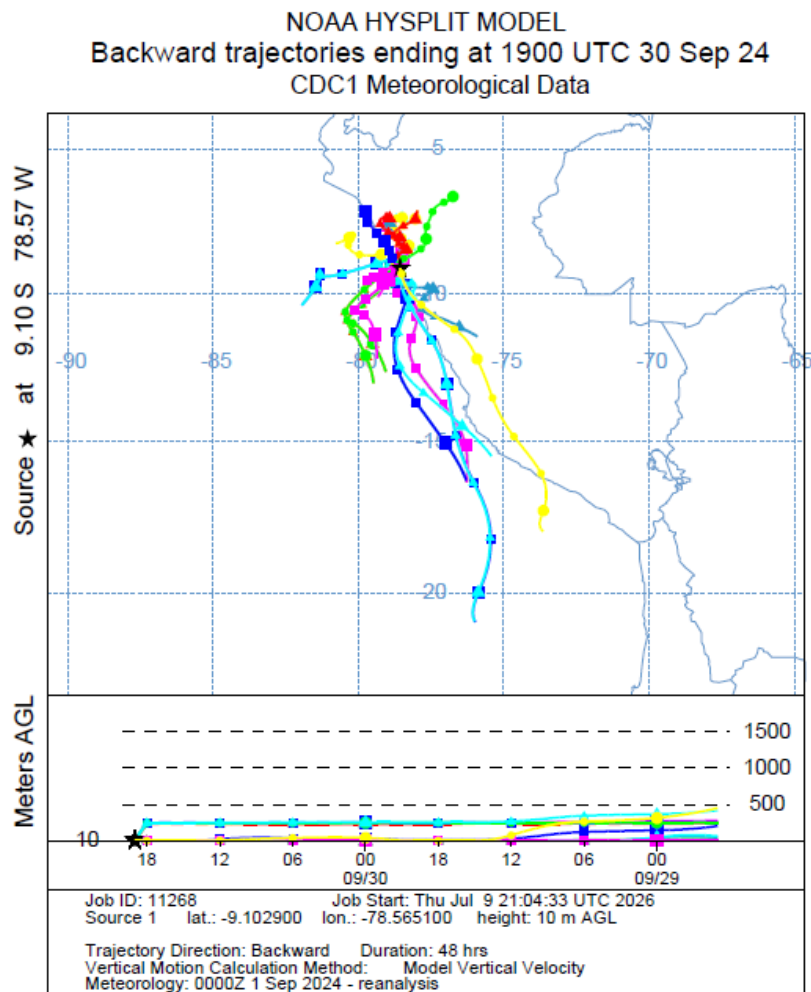
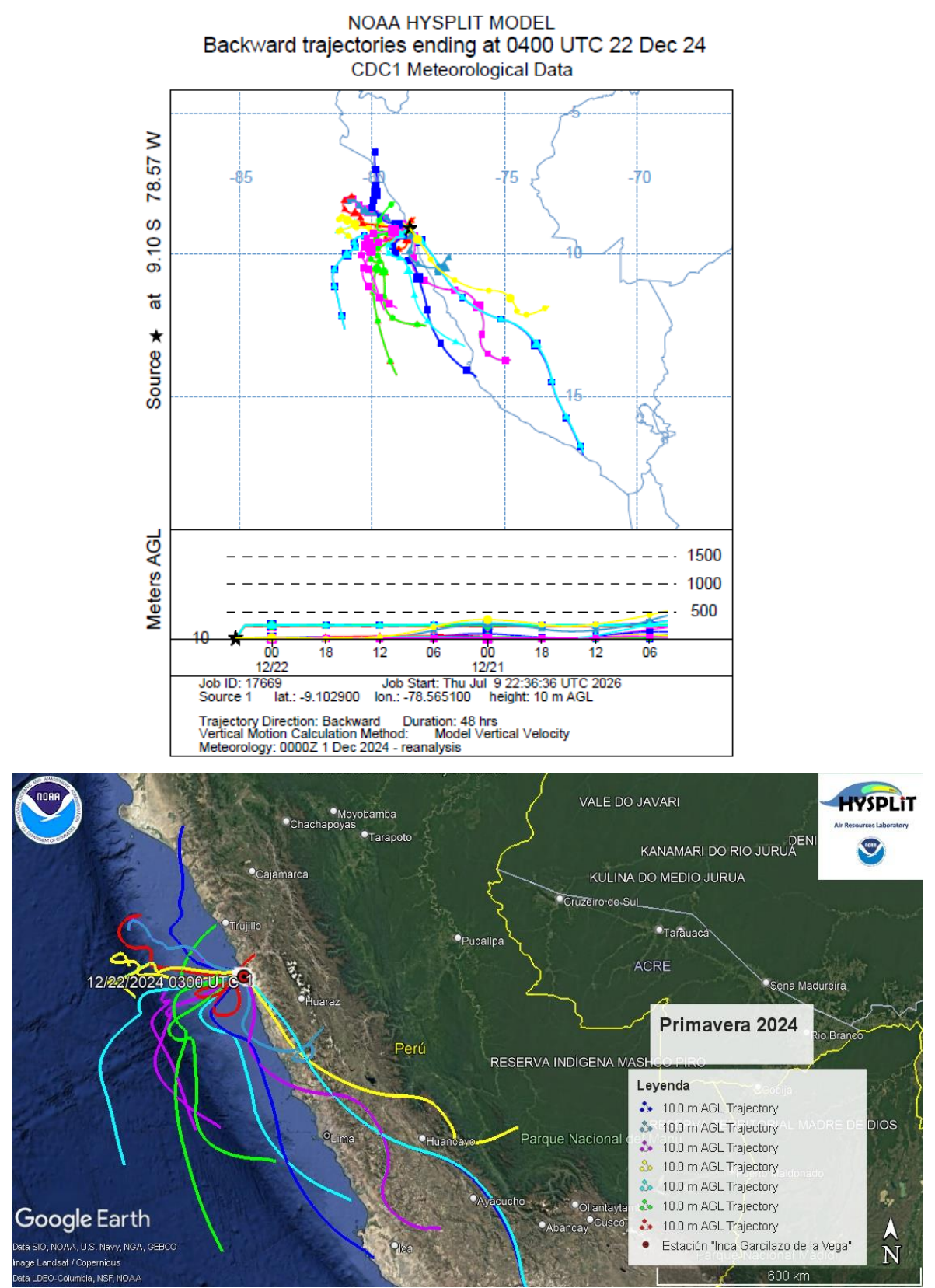


**Figura 59:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la Primavera de 2024, Chimbote



La figura 57 presenta las retrotrayectorias correspondientes al otoño de 2024. Se observa una mayor dispersión espacial de las trayectorias respecto al verano, evidenciándose rutas procedentes de los sectores sur, sureste y este del territorio peruano. Algunas trayectorias atraviesan zonas andinas y áreas continentales antes de llegar a Chimbote, mientras que otras mantienen recorridos paralelos a la costa. Este patrón indica una mayor variabilidad en los mecanismos de transporte atmosférico durante esta estación.

La figura 58 muestra las retrotrayectorias correspondientes al invierno de 2024. Las masas de aire presentan una procedencia predominante asociada a trayectorias costeras y oceánicas, observándose recorridos sobre el océano Pacífico antes de alcanzar el distrito de Chimbote. Asimismo, aunque también se identifican algunas trayectorias de menor frecuencia procedentes de sectores continentales ubicados al este y noreste. En comparación con el otoño, el invierno presenta una mayor influencia marítima y una menor dispersión continental, reflejando cambios estacionales en la circulación atmosférica regional.

La figura 59 presenta las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la primavera de 2024. Se observa una combinación de trayectorias provenientes de los sectores sur, sureste y este, incluyendo recorridos costeros, oceánicos y continentales. Algunas trayectorias muestran desplazamientos de largo alcance desde regiones andinas y del interior del país, mientras que otras se desarrollan principalmente sobre el océano Pacífico. Estos resultados evidencian una elevada variabilidad en los patrones de transporte atmosférico durante la primavera.

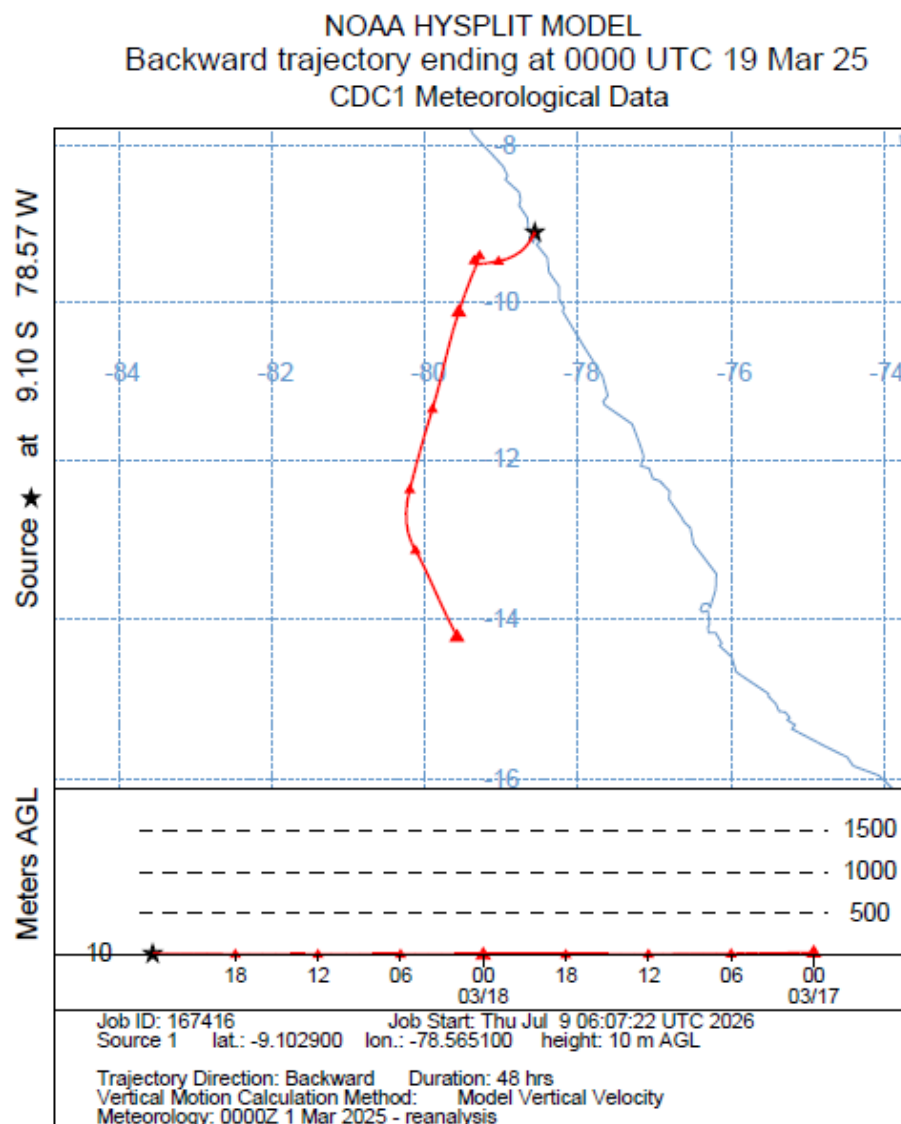
En conjunto, las retrotrayectorias estacionales correspondientes al año 2024 muestran que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia predominante desde los sectores sur, sureste y este del territorio peruano. Durante el verano predominó el transporte costero, mientras que el otoño presentó una mayor dispersión espacial de las trayectorias. En invierno se observó una mayor influencia de trayectorias oceánicas y costeras, mientras que la primavera mostró una combinación de trayectorias costeras, continentales y marítimas. Estos resultados evidencian una marcada variabilidad estacional en los patrones de transporte atmosférico que alcanzan el distrito de Chimbote.

#### ***4.5.2 Análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT para el año 2025***

##### **a) Retrotrayectorias de episodios críticos**

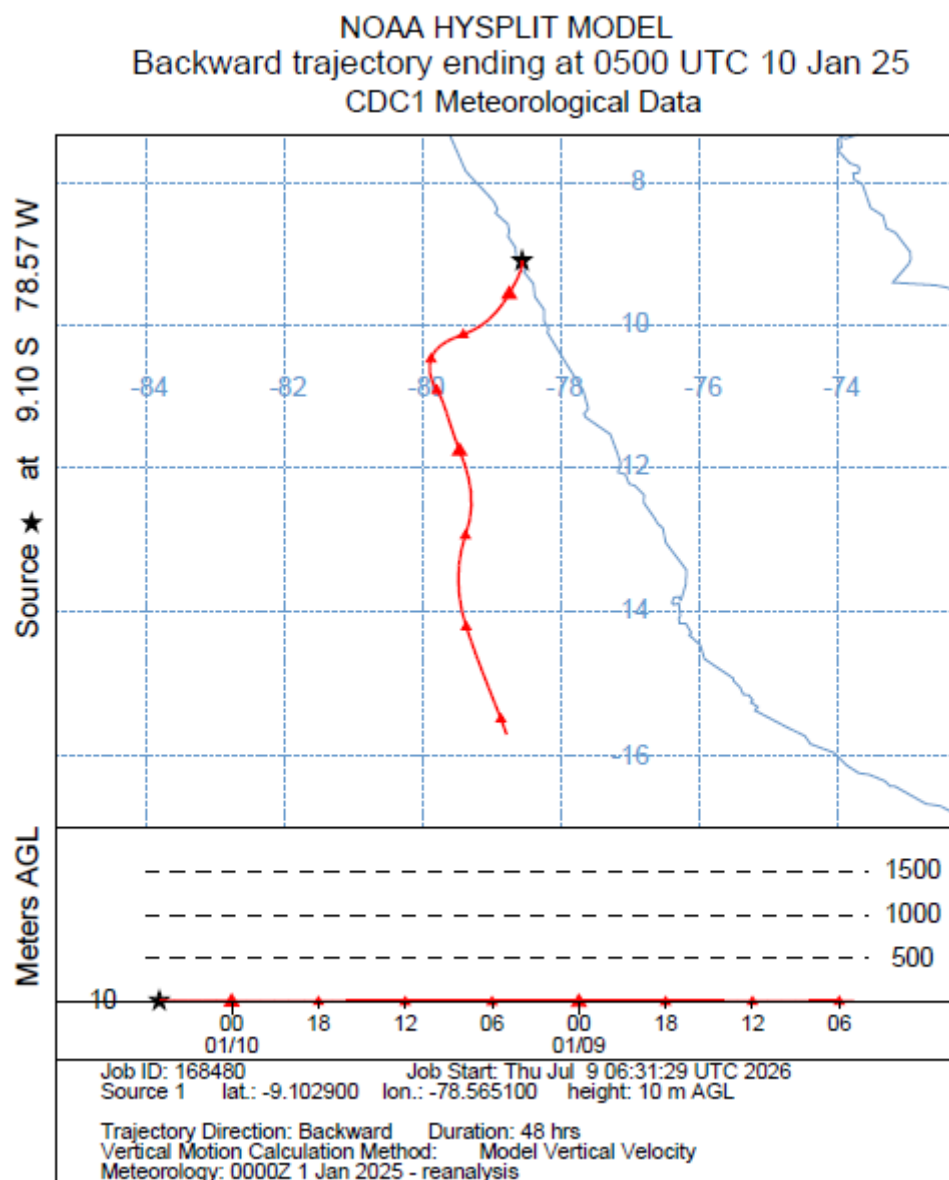
Con el fin de identificar las posibles áreas de procedencia de las masas de aire asociadas a los eventos de mayor concentración de contaminantes atmosféricos registrados en el distrito de Chimbote durante el año 2025, se aplicó el modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) de la NOAA. Para ello se seleccionaron los episodios críticos correspondientes a las máximas concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  identificadas en la base de datos de monitoreo. Las retrotrayectorias se calcularon para un periodo de 48 horas empleando datos meteorológicos REANALYSIS y una altura de llegada de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL), con el propósito de analizar la procedencia de las masas de aire durante los eventos de contaminación más representativos.

**Figura 60:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  registrado en el distrito de Chimbote



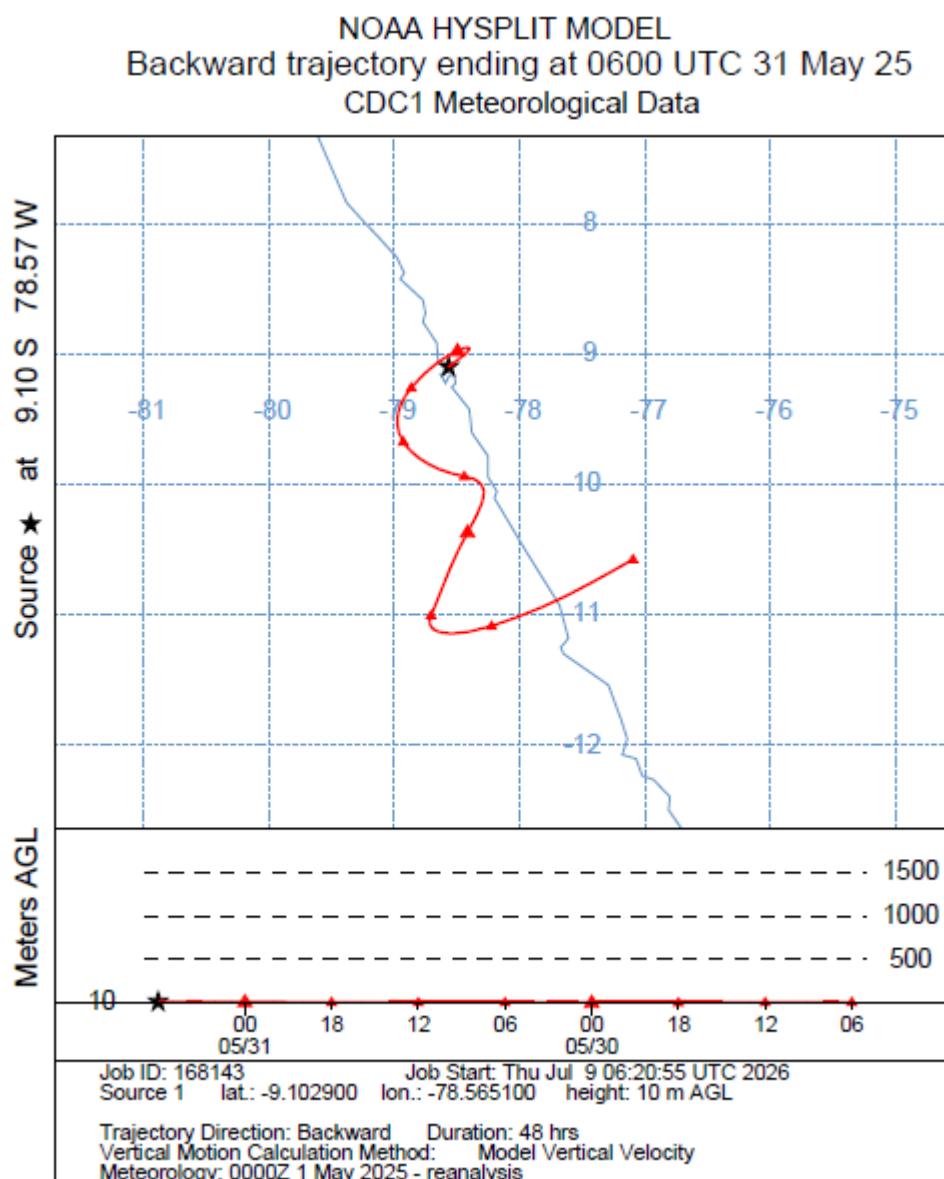
La Figura 60 muestra la retrotrayectoria correspondiente al episodio crítico de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  registrado el 18 de marzo de 2025, cuando se alcanzaron concentraciones máximas de  $104.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $102.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Se observa que las masas de aire presentaron una procedencia predominante desde el sector sur-sureste, desplazándose paralelamente a la costa peruana antes de arribar a la estación de monitoreo. Este comportamiento evidencia un patrón de transporte atmosférico regional asociado al desplazamiento de masas de aire desde el sector sur-sureste hacia la zona de estudio, mostrando una trayectoria similar a la observada durante el año 2024 para los episodios críticos de material particulado.

**Figura 61:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de  $\text{SO}_2$  registrado en el distrito de Chimbote



La Figura 61 muestra la retrotrayectoria correspondiente al episodio crítico de SO<sub>2</sub> registrado el 10 de enero de 2025, cuando se alcanzó una concentración máxima de 525.96 µg/m<sup>3</sup>. Se observa que las masas de aire presentaron una procedencia predominante desde el sector sur y sur-sureste, manteniendo un desplazamiento paralelo a la costa peruana durante las 48 horas previas al evento. Los resultados indican que las masas de aire asociadas al episodio crítico de SO<sub>2</sub> arribaron desde los sectores sur y sur-sureste, sugiriendo la posible participación de áreas ubicadas en dichas direcciones en el transporte atmosférico observado.

**Figura 62:** Retrotrayectoria de 48 horas correspondiente al episodio crítico de H<sub>2</sub>S registrado el 31 de mayo de 2025 en el distrito de Chimbote



La figura 62 presenta la retrotrayectoria asociada al episodio crítico de H<sub>2</sub>S registrado el 31 de mayo de 2025, durante el cual se alcanzó una concentración máxima de 114.33 µg/m<sup>3</sup>. La trayectoria muestra un comportamiento más complejo que el observado para el material particulado, presentando desplazamientos desde sectores continentales ubicados al sureste y este de la zona de estudio la presencia de cambios de dirección a lo largo de la trayectoria evidencia un patrón de transporte atmosférico más complejo que el observado para los demás contaminantes evaluados que favorecieron el transporte regional de masas de aire antes de su llegada a Chimbote. Este comportamiento pone en evidencia una dinámica de transporte distinta a la observada para el material particulado y el SO<sub>2</sub>.

En conjunto, las retrotrayectorias correspondientes a los episodios críticos del año 2025 evidencian diferencias en los patrones de transporte atmosférico asociados a cada contaminante. Los eventos máximos de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub> estuvieron relacionados principalmente con masas de aire procedentes del sector sur y sur-sureste, siguiendo trayectorias cercanas a la costa peruana. En contraste, el episodio crítico de H<sub>2</sub>S presentó una mayor influencia de trayectorias continentales y una dinámica de transporte más variable. Estos resultados sugieren que los procesos de transporte atmosférico que influyen en la calidad del aire de Chimbote difieren según el contaminante evaluado evidenciando diferencias en los patrones de transporte atmosférico asociados a cada contaminante evaluado. En términos generales, las trayectorias observadas evidencian que las masas de aire asociadas a los episodios críticos de 2025 procedieron principalmente de sectores ubicados al sur, sur-sureste y del interior continental del país, mostrando diferencias en los patrones de transporte atmosférico según el contaminante evaluado.

## **b) Análisis estacional de las retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT**

Con el propósito de evaluar los patrones estacionales de transporte atmosférico que influyeron en la calidad del aire del distrito de Chimbote durante el año 2025, se generaron retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT. Para cada estación del año se seleccionó una fecha representativa correspondiente al mayor índice de carga contaminante, calculado a partir de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Las retrotrayectorias fueron calculadas para un periodo de 48 horas hacia atrás, a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo (AGL) y con intervalos de 6 horas, utilizando datos meteorológicos REANALYSIS. Este análisis permitió identificar las principales rutas de transporte atmosférico y las regiones

de influencia de las masas de aire que arribaron a la estación de monitoreo Inca Garcilaso de la Vega durante las diferentes estaciones del año 2025.

La figura 63 muestra las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2025, calculadas para un periodo de 48 horas hacia atrás a una altura de 10 m AGL y con intervalos de 6 horas. Se observa que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia predominante desde los sectores sur y sur-sureste, siguiendo principalmente trayectorias costeras y oceánicas sobre el litoral peruano y el océano Pacífico. Asimismo, se identificaron algunas trayectorias de menor frecuencia procedentes de sectores continentales ubicados al este y noreste del país. En comparación con el verano de 2024, se observa una mayor concentración de trayectorias asociadas al transporte costero-oceánico, registrándose una menor participación de trayectorias procedentes del interior continental durante esta estación.

**Figura 63:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al verano de 2025, Chimbote

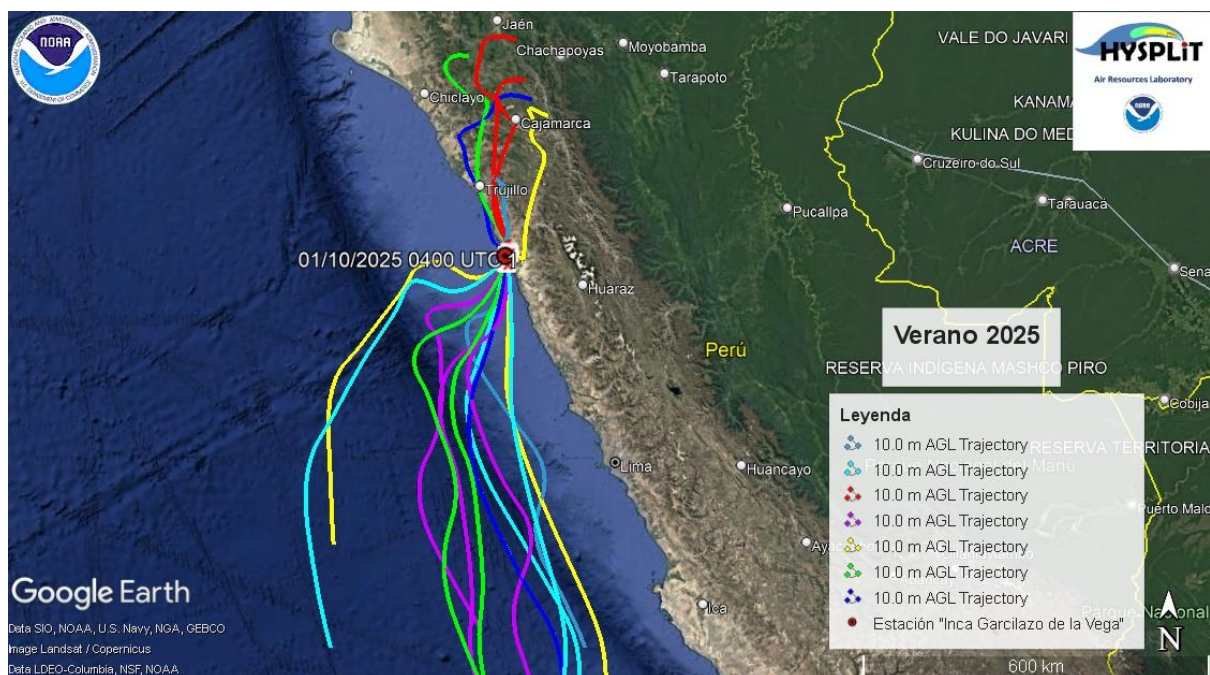
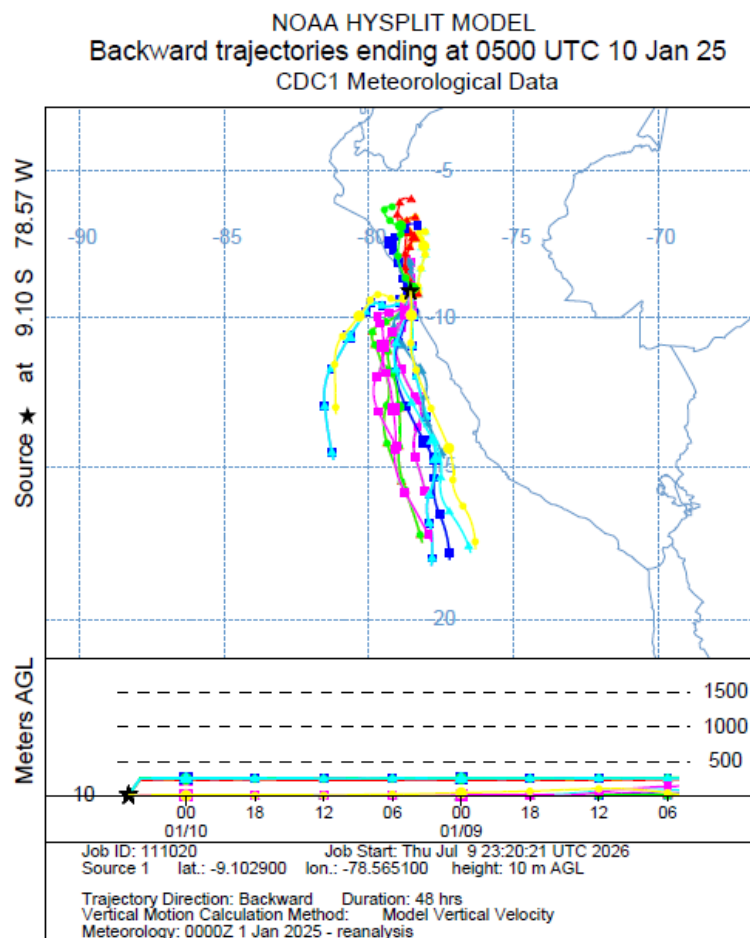


**Figura 64:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al otoño de 2025, Chimbote

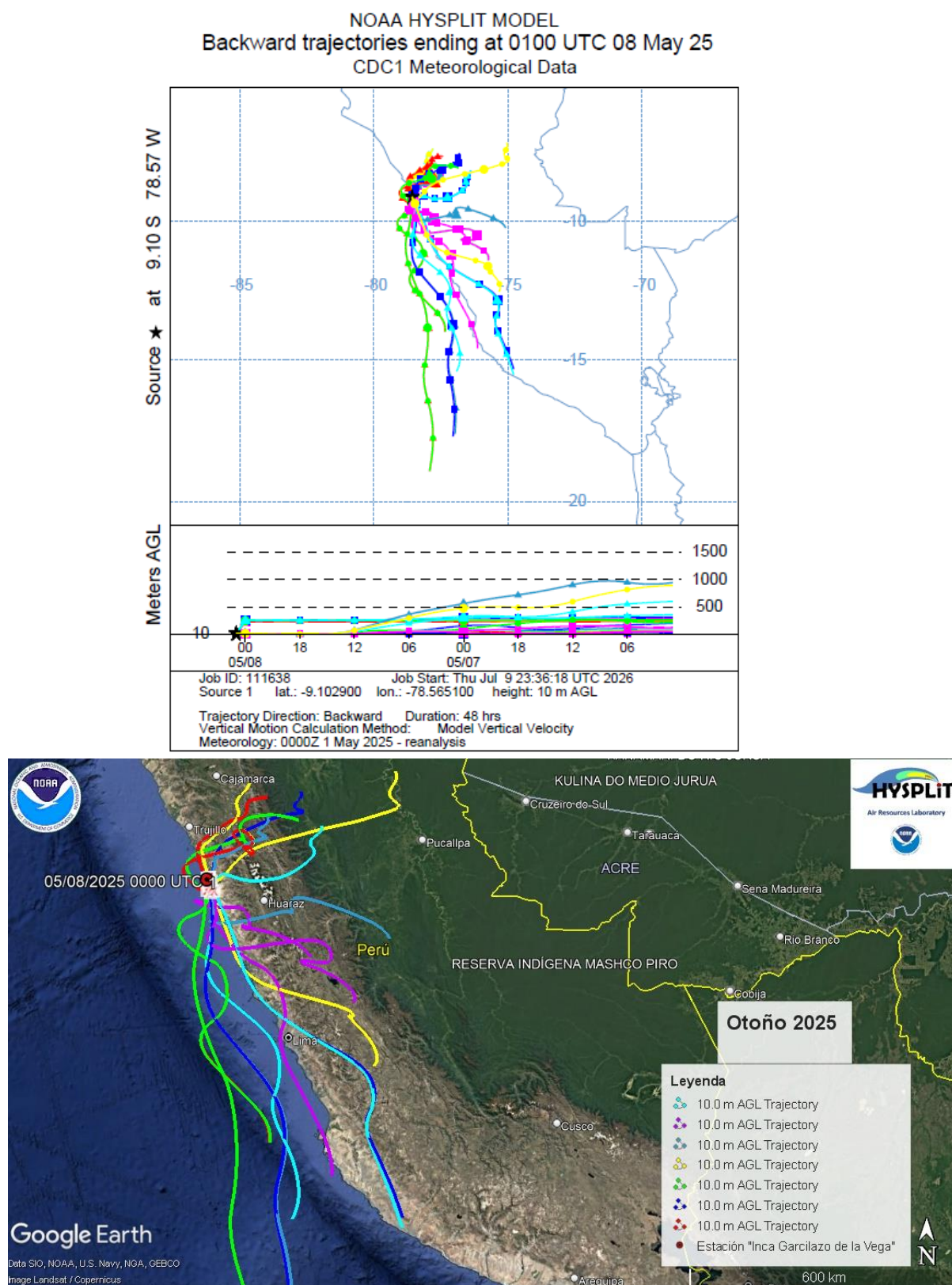


**Figura 65:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al invierno de 2025, Chimbote

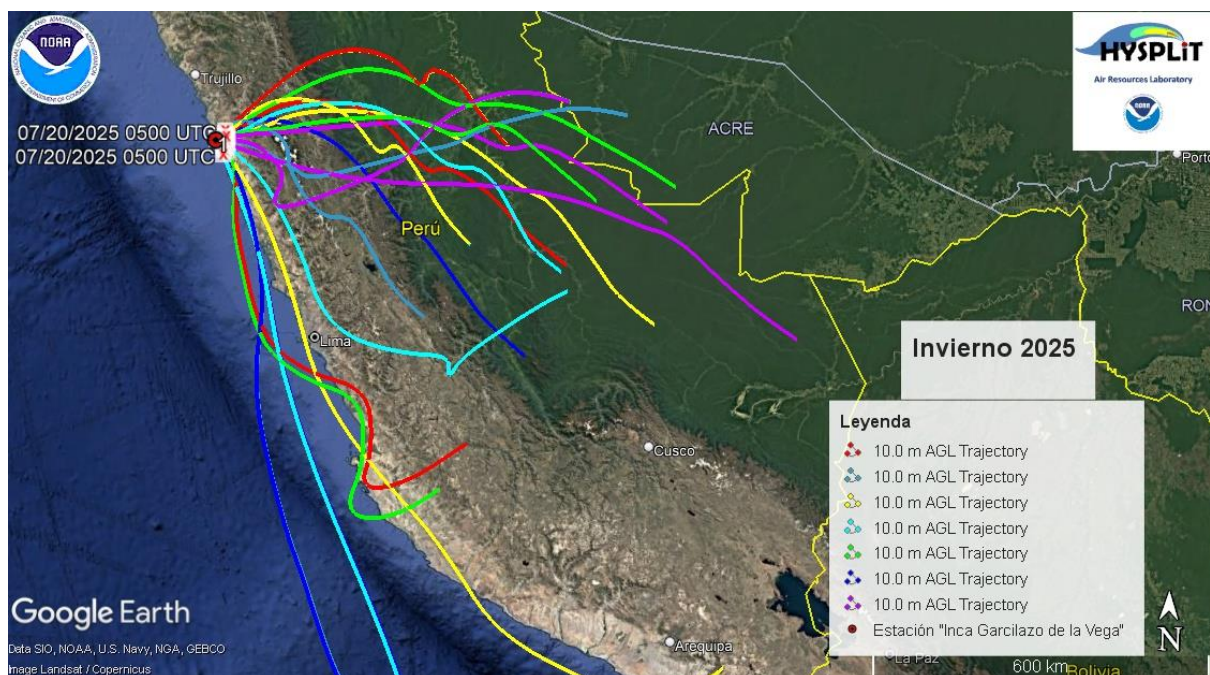
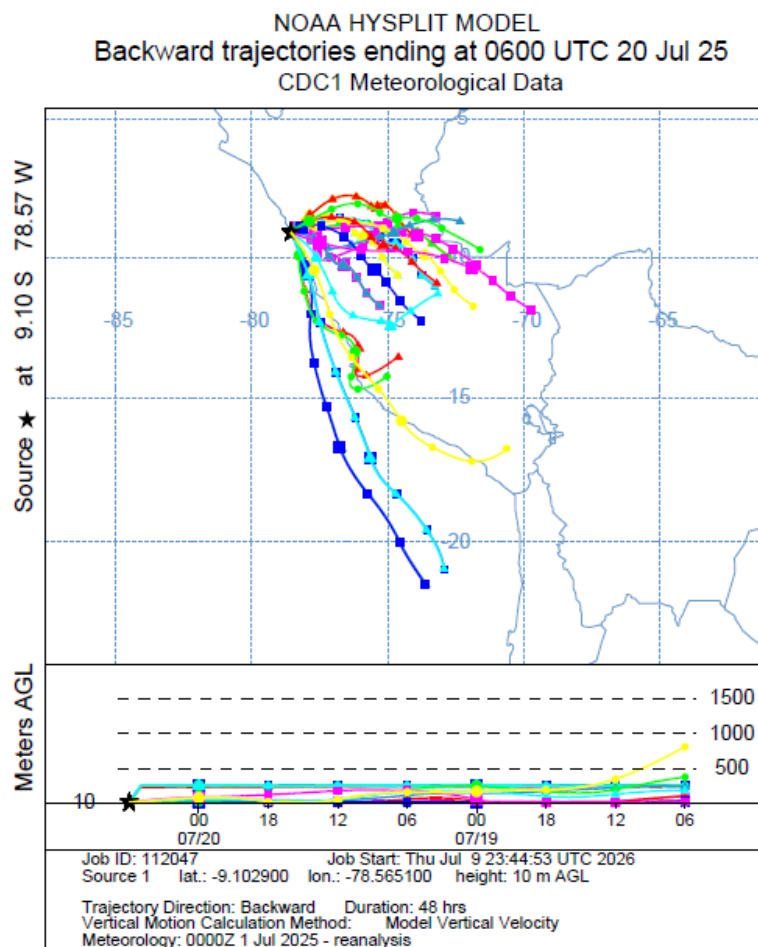
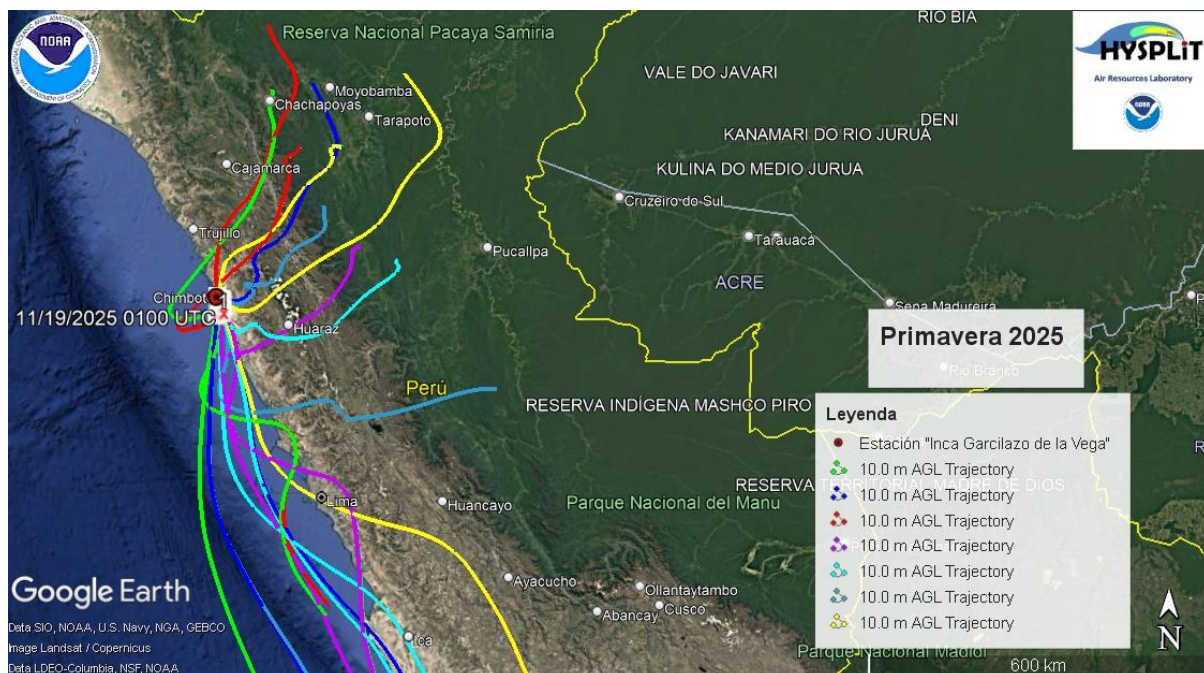
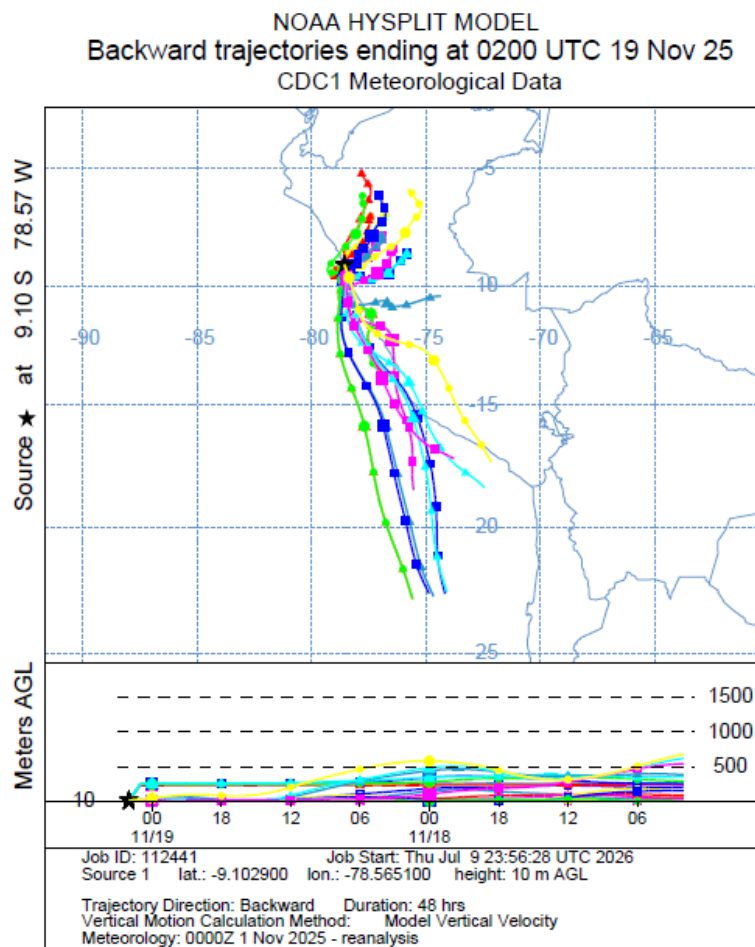


**Figura 66:** Retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la primavera de 2025, Chimbote



La figura 64 muestra las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al otoño de 2025, calculadas para un periodo de 48 horas hacia atrás a una altura de 10 m AGL y con intervalos de 6 horas. Se observa que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia predominante desde los sectores sur y sureste, siguiendo principalmente trayectorias asociadas al litoral peruano y al océano Pacífico. Asimismo, se identificaron algunas trayectorias de menor frecuencia procedentes de sectores continentales ubicados al este y sureste del país, atravesando zonas andinas antes de alcanzar el área de estudio. En comparación con el otoño de 2024, se observa una menor dispersión espacial de las trayectorias y una mayor concentración de rutas asociadas al transporte costero-oceánico.

La figura 65 muestra las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes al invierno de 2025, calculadas para un periodo de 48 horas hacia atrás a una altura de 10 m AGL y con intervalos de 6 horas. Se observa que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia diversa, destacando trayectorias provenientes de los sectores este, noreste y sureste del territorio peruano. Varias trayectorias atravesaron regiones andinas y continentales antes de llegar a la zona de estudio, mientras que otras siguieron recorridos sobre el océano Pacífico y la franja costera. En comparación con el verano y otoño de 2025, el invierno evidencia una mayor dispersión espacial y una influencia continental más marcada, evidenciando una mayor diversidad en los patrones de transporte atmosférico respecto a las estaciones anteriores en los patrones regionales de transporte atmosférico.

La figura 66 muestra las retrotrayectorias de masas de aire correspondientes a la primavera de 2025, calculadas para un periodo de 48 horas hacia atrás a una altura de 10 m AGL y con intervalos de 6 horas. Se observa que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia diversa, destacando trayectorias provenientes de los sectores este, noreste y sur del territorio peruano. Varias trayectorias atravesaron regiones andinas y continentales antes de alcanzar la zona de estudio, mientras que otras siguieron recorridos paralelos al litoral peruano y al océano Pacífico. Estos resultados evidencian que durante la primavera coexistieron mecanismos de transporte continental, costero y oceánico, reflejando una elevada variabilidad en los patrones de circulación atmosférica regional.

En comparación con el verano y otoño de 2025, el invierno evidencia una mayor dispersión espacial y una influencia continental más marcada, sugiriendo una variabilidad estacional importante en los patrones regionales de transporte atmosférico y una mayor participación de masas de aire procedentes del interior del territorio peruano.

Estos resultados evidencian que durante la primavera coexistieron mecanismos de transporte continental, costero y oceánico, reflejando una elevada variabilidad en los patrones de circulación atmosférica regional y una mayor complejidad en las rutas de transporte de masas de aire que alcanzaron la estación de monitoreo.

En conjunto, las retrotrayectorias estacionales correspondientes al año 2025 evidencian que las masas de aire que arribaron al distrito de Chimbote presentaron una procedencia predominante desde los sectores sur, sureste, este y noreste del territorio peruano. Durante el verano y otoño predominaron trayectorias asociadas al transporte costero y oceánico, mientras que en invierno se observó una mayor dispersión espacial y una influencia más marcada de trayectorias continentales procedentes del interior del país. Por su parte, la primavera presentó una combinación de trayectorias costeras, oceánicas y continentales. Estos resultados evidencian una marcada variabilidad estacional en los patrones de transporte atmosférico que alcanzan el distrito de Chimbote durante el año 2025.

#### **4.6 Discusión**

Los resultados obtenidos mostraron que la concentración media anual de  $PM_{10}$  en el distrito de Chimbote fue de  $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante 2024 y  $13.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante 2025, mientras que la concentración media anual de  $PM_{2.5}$  fue de  $15.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2024 y  $11.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2025. Estos resultados evidencian una disminución de las concentraciones promedio de ambos contaminantes durante el segundo año de estudio.

Al comparar estos valores con los Estándares de Calidad Ambiental para Aire del Perú (D.S. N.º 003-2017-MINAM), se observa que las concentraciones medias anuales de  $PM_{10}$  registradas durante 2024 y 2025 se encontraron por debajo del valor de referencia de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , al igual que las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , las cuales se mantuvieron por debajo del estándar anual de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos resultados indican que, en términos de promedio anual, la calidad del aire del distrito de Chimbote cumplió con la normativa peruana durante ambos años de evaluación.

Respecto a la normativa internacional, las concentraciones anuales de  $PM_{10}$  registradas en 2024 ( $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 2025 ( $13.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) también se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Resolução CONAMA N.º 491/2018 de Brasil ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y por el Decreto Supremo N.º 59/1998 de Chile ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De manera similar, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  registradas durante ambos años fueron inferiores a los valores de referencia establecidos por la

Resolução CONAMA N.º 491/2018 ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y por el Decreto Supremo N.º 12/2011 de Chile ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Sin embargo, al comparar los resultados con las Directrices Mundiales sobre la Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), se observó que el promedio anual de  $\text{PM}_{10}$  durante 2024 ( $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) superó el valor guía anual de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el promedio de 2025 ( $13.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se mantuvo por debajo de dicho límite. En el caso del  $\text{PM}_{2.5}$ , tanto el promedio anual de 2024 ( $15.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como el de 2025 ( $11.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) superaron el valor guía anual establecido por la OMS de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , evidenciando que, aun cuando se cumplió la normativa nacional y la de otros países de la región, las concentraciones registradas continúan representando niveles superiores a los recomendados para la protección de la salud humana.

Estos resultados son similares a los reportados por Espinoza (2019) para Lima Metropolitana, quien encontró que las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  cumplían parcialmente con los estándares nacionales, pero superaban las recomendaciones establecidas por la OMS, mostrando que esta situación es común en ciudades urbanas con influencia de actividades industriales y de transporte. Asimismo, Rojas et al. (2022) señalaron que las concentraciones de material particulado en Lima estuvieron influenciadas por las condiciones meteorológicas locales, particularmente por la velocidad del viento y la humedad relativa, factores que favorecen o limitan los procesos de dispersión atmosférica.

La reducción observada en las concentraciones promedio de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  entre 2024 y 2025 podría estar asociada a diferencias en las condiciones meteorológicas registradas durante ambos años, especialmente en los patrones de viento y en los mecanismos de transporte atmosférico identificados mediante CBPF e HYSPLIT. Los resultados obtenidos mostraron que las trayectorias atmosféricas y los sectores de contribución variaron entre años y estaciones, lo que podría haber favorecido una mayor dispersión de los contaminantes durante determinados periodos. No obstante, pese a la disminución observada, la persistencia de concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  superiores a las recomendaciones de la OMS indica la necesidad de continuar fortaleciendo las estrategias de vigilancia y gestión de la calidad del aire en el distrito de Chimbote.

Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones medias anuales de  $\text{PM}_{10}$  disminuyeron de  $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2024 a  $13.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2025, mientras que las concentraciones medias de  $\text{PM}_{2.5}$  disminuyeron de  $15.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $11.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el mismo periodo.

Asimismo, se observó que ambos contaminantes presentaron comportamientos temporales semejantes a escala trimestral y estacional. Durante 2024 las mayores concentraciones promedio de  $PM_{10}$  se registraron en el periodo enero-marzo ( $25.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y durante la estación de verano ( $22.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras que para  $PM_{2.5}$  los mayores valores se registraron también durante enero-marzo ( $17.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y en otoño ( $16.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De forma similar, durante 2025 las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se observaron en el primer trimestre y durante la estación de otoño, evidenciando una tendencia temporal semejante entre ambas fracciones particuladas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Espinoza (2019), quien encontró variaciones estacionales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Lima Metropolitana asociadas a cambios en las condiciones atmosféricas, así como con Rojas et al. (2022), quienes observaron que la dispersión del material particulado se encuentra influenciada por variables meteorológicas como la humedad relativa y la velocidad del viento. La disminución observada en Chimbote durante 2025 podría estar relacionada con condiciones más favorables para la dispersión atmosférica o con una menor influencia de las fuentes emisoras presentes en el área de estudio.

La elevada asociación entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  observada en la presente investigación ( $r_s = 0.784-0.972$ ) evidencia que ambas fracciones particuladas mostraron una dinámica temporal similar. Este resultado es consistente con lo reportado por Jurado et al. (2023), quienes identificaron fuertes correlaciones entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en ambientes urbanos, atribuyéndolas a fuentes comunes de emisión y a la influencia compartida de factores meteorológicos. De manera complementaria, el cociente  $PM_{2.5}/PM_{10}$  presentó valores medios de 0.77 en 2024 y 0.86 en 2025, superiores a los reportados por Cabello et al. (2024) para Lima Metropolitana ( $\approx 0.33$ ), lo que sugiere una mayor contribución relativa de partículas finas en Chimbote.

Asimismo, el  $PM_{10}$  presentó correlaciones significativas con la dirección del viento ( $\rho = 0.818$ ), temperatura ( $\rho = 0.758$ ) y humedad relativa ( $\rho = -0.794$ ), resultados que coinciden con los hallazgos de Xiao et al. (2023) y Rojas et al. (2022), quienes identificaron a la temperatura, la humedad relativa y las condiciones de viento como factores determinantes en la variabilidad temporal del material particulado. Esta influencia meteorológica también fue respaldada por los análisis CBPF e HYSPLIT, los cuales identificaron contribuciones predominantes desde los sectores sur y sur-sureste. En conjunto, estos resultados sugieren que las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Chimbote estuvieron condicionadas tanto por fuentes locales como por procesos de transporte regional.

#### *Variación temporal del $SO_2$*

El SO<sub>2</sub> fue el contaminante que presentó la mayor variabilidad temporal durante el periodo de estudio, registrando concentraciones medias anuales de 24.48 µg/m<sup>3</sup> en 2024 y 19.61 µg/m<sup>3</sup> en 2025, además de episodios extremos que alcanzaron 861.69 µg/m<sup>3</sup> y 525.96 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Asimismo, las mayores concentraciones se registraron principalmente durante verano y otoño, mientras que los análisis de correlación no evidenciaron asociaciones estadísticamente significativas con la temperatura, humedad relativa ni velocidad del viento. Estos resultados sugieren que las variaciones observadas estuvieron relacionadas principalmente con emisiones puntuales provenientes de fuentes específicas más que con la influencia de las condiciones meteorológicas locales.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Uria y Carslaw (2014), quienes señalan que los contaminantes gaseosos asociados a fuentes industriales suelen presentar distribuciones altamente variables y episodios de concentración elevados vinculados a direcciones específicas del viento más que a variaciones meteorológicas generales. De manera complementaria, los resultados obtenidos mediante CBPF e HYSPLIT mostraron una contribución predominante desde los sectores sur y sur-sureste, así como trayectorias de masas de aire procedentes de dichas direcciones, lo que refuerza la hipótesis de una influencia importante de fuentes localizadas y procesos de transporte atmosférico regional sobre las concentraciones de SO<sub>2</sub> registradas en Chimbote.

El H<sub>2</sub>S presentó una disminución de su concentración media anual entre los años 2024 y 2025, pasando de 10.98 µg/m<sup>3</sup> a 8.74 µg/m<sup>3</sup>. Asimismo, las mayores concentraciones se registraron durante el verano en ambos años de evaluación, observándose una reducción progresiva hacia invierno y primavera. A diferencia del SO<sub>2</sub>, este contaminante mostró un comportamiento temporal más estable, aunque con episodios puntuales de incremento que evidencian la influencia de fuentes de emisión persistentes en el área de estudio.

Los resultados de correlación mostraron que durante 2025 el H<sub>2</sub>S presentó asociaciones estadísticamente significativas con la dirección del viento ( $\rho = 0.601$ ;  $p = 0.039$ ), la temperatura ( $\rho = 0.860$ ;  $p < 0.001$ ) y la humedad relativa ( $\rho = -0.629$ ;  $p = 0.028$ ), evidenciando una influencia importante de las condiciones meteorológicas sobre su comportamiento temporal. Este resultado coincide con lo señalado por Xiao et al. (2025), quienes identificaron la temperatura como uno de los principales factores meteorológicos asociados a la variabilidad de diversos contaminantes atmosféricos. Asimismo, las gráficas polares, los resultados de CBPF y las retrotrayectorias HYSPLIT mostraron una contribución predominante desde los

sectores sur, sureste y suroeste, lo que sugiere que las concentraciones registradas en Chimbote estuvieron influenciadas tanto por fuentes locales como por procesos de transporte atmosférico regional.

#### *PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> vs variables meteorológicas*

Los resultados evidenciaron que el PM<sub>10</sub> presentó una mayor dependencia de las condiciones meteorológicas que el PM<sub>2.5</sub>, especialmente durante el año 2024. A nivel anual, el PM<sub>10</sub> mostró correlaciones significativas con la dirección del viento ( $\rho=0.818$ ;  $p=0.004$ ), la temperatura ( $\rho=0.758$ ;  $p=0.011$ ) y la humedad relativa ( $\rho=-0.794$ ;  $p=0.006$ ), mientras que el PM<sub>2.5</sub> no presentó relaciones estadísticamente significativas. Este comportamiento sugiere que las concentraciones de PM<sub>10</sub> estuvieron fuertemente condicionadas por las condiciones locales de dispersión atmosférica, particularmente por la circulación predominante de vientos provenientes del sur y sur-sureste identificada en las rosas de viento de los años 2024 y 2025 (Figuras 19, 21, 23 y 25), así como por los cambios estacionales de temperatura y humedad relativa. Estos resultados coinciden con lo reportado por Picoy (2022), quien encontró que la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa influyen directamente en la dispersión y acumulación del material particulado en zonas de influencia minera. De manera similar, Pereira et al. (2022) determinaron que en regiones costeras la humedad relativa y la temperatura constituyen factores determinantes en la variabilidad temporal de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Las gráficas polares mostraron que durante 2024 las mayores concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se registraron bajo temperaturas comprendidas entre 20 y 25 °C, humedades relativas entre 60 y 70 % y velocidades de viento cercanas a 1 m/s (Figuras 26 y 27), mientras que durante 2025 las mayores concentraciones se asociaron principalmente a velocidades entre 1 y 2 m/s y direcciones procedentes de los sectores oeste-noroeste y sur-sureste (Figuras 30 y 31). Este comportamiento concuerda con Zambrano et al. (2023), quienes señalaron que las mayores concentraciones de material particulado suelen registrarse bajo condiciones de baja velocidad del viento debido a una menor capacidad de dispersión atmosférica. Asimismo, Xiaorui et al. (2024) indican que en ciudades costeras las masas de aire marinas, combinadas con condiciones de estabilidad atmosférica, pueden favorecer la permanencia y acumulación de partículas finas y gruesas.

A escala trimestral y estacional se identificó uno de los hallazgos más importantes de la investigación: la existencia de correlaciones muy altas entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante todo el periodo evaluado. Los coeficientes trimestrales oscilaron entre  $r_s=0.866$  y  $r_s=0.934$  durante

2024 y entre  $r_s=0.821$  y  $r_s=0.972$  durante 2025 (Tablas 23 y 24). Del mismo modo, a nivel estacional las correlaciones variaron entre  $r_s=0.784$  y  $r_s=0.966$  en 2024 y entre  $r_s=0.912$  y  $r_s=0.972$  en 2025 (Tablas 27 y 28). Estos resultados evidencian que ambas fracciones particuladas respondieron de manera similar a las condiciones atmosféricas predominantes y posiblemente compartieron fuentes de emisión comunes. Pen (2025) señala que correlaciones elevadas entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  suelen asociarse a la presencia de fuentes compartidas y a patrones meteorológicos comunes de transporte y dispersión.

La influencia de las condiciones meteorológicas también se observó en el comportamiento estacional de las concentraciones. Tanto  $PM_{10}$  como  $PM_{2.5}$  registraron sus mayores concentraciones durante verano y otoño de ambos años, coincidiendo con temperaturas más elevadas y humedades relativas relativamente menores respecto al invierno. Además, la velocidad media del viento fue menor durante el invierno de ambos años (1.62 m/s en 2024 y 1.84 m/s en 2025), condición que favorece procesos de acumulación local cuando existen emisiones persistentes. Estos resultados coinciden con los reportados por Pereira et al. (2022) y Picoy (2022), quienes señalan que la combinación entre baja velocidad del viento, temperatura elevada y humedad relativa moderada favorece la permanencia del material particulado en la atmósfera.

Finalmente, los análisis CBPF mostraron que durante ambos años las mayores probabilidades de concentración para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  estuvieron asociadas recurrentemente a los sectores sur, sur-sureste, oeste-noroeste y este, dependiendo de la estación y trimestre evaluado (Figuras 38-52). La coincidencia entre los patrones observados en las gráficas polares, las rosas de viento y los resultados CBPF sugiere que las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Chimbote estuvieron influenciadas simultáneamente por factores meteorológicos locales y por la contribución de fuentes localizadas en los sectores predominantes de transporte atmosférico.

#### *SO<sub>2</sub> vs variables meteorológicas*

A diferencia del material particulado, el  $SO_2$  presentó una relación mucho más débil con las variables meteorológicas. A nivel anual, las correlaciones obtenidas durante 2024 y 2025 fueron bajas o muy bajas para todas las variables evaluadas, sin alcanzar significancia estadística. Sin embargo, las gráficas polares mostraron patrones espaciales bien definidos, observándose durante 2024 las mayores concentraciones asociadas a humedades relativas entre 80 y 90 %, velocidades de viento entre 3 y 4 m/s y contribuciones procedentes principalmente de los sectores noroeste, norte-noroeste y sur-sureste (Figura 28). Durante 2025, los mayores

valores se concentraron bajo velocidades de viento entre 1 y 2 m/s y direcciones procedentes principalmente de los sectores sur, sur-sureste y sureste (Figura 32).

Estos resultados coinciden parcialmente con Zapana (2021), quien encontró que las concentraciones de SO<sub>2</sub> presentan una mayor dependencia de las características de emisión que de las condiciones meteorológicas locales. Del mismo modo, Pereira et al. (2022) señalan que los contaminantes gaseosos suelen mostrar respuestas más complejas frente a la meteorología, especialmente en entornos costeros donde los patrones de circulación pueden modificar significativamente las trayectorias de dispersión.

El análisis estacional mostró que durante verano y otoño de 2025 el SO<sub>2</sub> presentó correlaciones negativas moderadas con la temperatura ( $r_s=-0.561$  y  $r_s=-0.533$ ), mientras que las mayores concentraciones se registraron precisamente durante dichas estaciones. Este comportamiento podría estar asociado a un incremento de emisiones provenientes de fuentes específicas localizadas al sur y sureste de la estación de monitoreo, más que a un efecto directo de las condiciones meteorológicas. En este sentido, Xiao et al. (2025) señalan que en ciudades costeras con actividad industrial y portuaria las concentraciones de gases como SO<sub>2</sub> suelen estar controladas principalmente por la localización de las fuentes emisoras y las trayectorias de transporte atmosférico.

Los resultados CBPF respaldan esta interpretación. Durante 2024 se identificaron contribuciones predominantes desde los sectores norte, noreste, noroeste, este y sur-sureste, mientras que durante 2025 las probabilidades más elevadas se concentraron recurrentemente en los sectores sur, sureste, suroeste y oeste. Esta persistencia espacial, conjuntamente con la ausencia de correlaciones anuales significativas, sugiere que la variabilidad temporal del SO<sub>2</sub> estuvo condicionada principalmente por la influencia de fuentes emisoras localizadas y por la dirección de transporte de las masas de aire más que por variaciones meteorológicas locales.

#### *H<sub>2</sub>S vs variables meteorológicas*

El H<sub>2</sub>S fue el contaminante que presentó la relación más consistente con las variables meteorológicas durante el periodo de estudio. En 2025 se identificaron correlaciones significativas con la dirección del viento ( $\rho=0.601$ ;  $p=0.039$ ), la temperatura ( $\rho=0.860$ ;  $p<0.001$ ) y la humedad relativa ( $\rho=-0.629$ ;  $p=0.028$ ), siendo esta última la asociación más fuerte observada entre todos los contaminantes evaluados. Estos resultados indican que los incrementos de temperatura tendieron a favorecer el aumento de las concentraciones de H<sub>2</sub>S,

mientras que mayores niveles de humedad relativa estuvieron asociados a una disminución de sus concentraciones.

A nivel trimestral y estacional, el H<sub>2</sub>S mostró patrones relativamente consistentes. Durante 2024 y 2025 predominó una correlación negativa con la velocidad del viento y la temperatura, así como una relación positiva con la humedad relativa en gran parte de los trimestres y estaciones evaluadas. De manera similar, las gráficas polares mostraron que las mayores concentraciones se registraron bajo velocidades de viento reducidas, generalmente entre 1 y 3 m/s, y asociadas a corrientes procedentes de los sectores sur, sur-suroeste, noroeste y oeste-noroeste (Figuras 29 y 33).

Los resultados coinciden con lo reportado por Traven et al. (2023), quienes observaron que las concentraciones de H<sub>2</sub>S próximas a instalaciones de disposición de residuos y actividades industriales estaban fuertemente condicionadas por la dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa. Asimismo, Pereira et al. (2022) concluyeron que la disminución de la velocidad del viento favorece la acumulación temporal de contaminantes gaseosos en ciudades costeras debido a una menor capacidad de dispersión atmosférica.

El comportamiento estacional también resulta relevante. Las mayores concentraciones de H<sub>2</sub>S se registraron principalmente durante verano y otoño, coincidiendo con las temperaturas más elevadas de ambos años y con una mayor influencia de vientos procedentes del sur y sur-sureste. Estos patrones también fueron identificados por los análisis CBPF, donde las contribuciones predominantes se concentraron recurrentemente en los sectores sur, sureste, suroeste y noroeste. La coincidencia entre los análisis estadísticos, las gráficas polares, las rosas de viento y los resultados CBPF evidencia que la meteorología desempeñó un papel determinante en la variabilidad temporal del H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote.

#### *Discusión del análisis de retrotrayectorias de masas de aire mediante HYSPLIT*

El análisis de retrotrayectorias mediante el modelo HYSPLIT permitió identificar los principales patrones de transporte atmosférico que influyeron sobre las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el distrito de Chimbote durante los años 2024 y 2025. De manera general, las trayectorias asociadas a los episodios críticos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> mostraron una procedencia predominante desde los sectores sur y sur-sureste en ambos años (Figuras 53 y 60), siguiendo recorridos paralelos a la franja costera peruana antes de arribar al área de estudio. Este comportamiento coincide con las rosas de viento, donde predominaron vientos procedentes de los sectores sur y sur-sureste durante todo el periodo evaluado (Figuras 19, 21,

23 y 25), así como con los resultados obtenidos mediante CBPF, que identificaron recurrentemente contribuciones potenciales desde estos mismos sectores. La concordancia entre HYSPLIT, CBPF y las condiciones meteorológicas observadas sugiere que el transporte atmosférico regional desempeñó un papel importante en la variabilidad temporal del material particulado registrado en Chimbote.

Estos resultados son consistentes con lo señalado por Stein et al. (2015), quienes indican que una de las principales aplicaciones de HYSPLIT es la identificación de relaciones fuente-receptor y la determinación del origen de masas de aire asociadas al transporte de contaminantes atmosféricos. Asimismo, Trošić y Filipčić (2022) demostraron que las trayectorias de retroceso permiten identificar rutas costeras de transporte de  $PM_{10}$  y establecer la influencia de regiones emisoras localizadas a decenas de kilómetros del punto receptor.

En el caso del  $SO_2$ , las retrotrayectorias correspondientes a los episodios críticos registrados en diciembre de 2024 y enero de 2025 mostraron una procedencia predominante desde los sectores sur, sur-sureste y sur-suroeste (Figuras 54 y 61). Este comportamiento resulta particularmente relevante debido a que las concentraciones máximas de  $SO_2$  fueron las más elevadas registradas durante toda la investigación, alcanzando  $861.69 \mu g/m^3$  en 2024 y  $525.96 \mu g/m^3$  en 2025. Asimismo, las direcciones identificadas mediante HYSPLIT coinciden con los sectores de mayor probabilidad obtenidos mediante CBPF para este contaminante, especialmente durante verano y primavera, cuando se registraron contribuciones predominantes desde los sectores sur, sureste y suroeste. Esta coincidencia metodológica fortalece la interpretación de que las concentraciones de  $SO_2$  estuvieron asociadas a fuentes localizadas al sur del área de estudio y no exclusivamente a procesos meteorológicos locales.

De manera similar, el análisis desarrollado por Yassin et al. (2018) demostró que las retrotrayectorias permiten identificar regiones potenciales de aporte y diferenciar las áreas de procedencia de contaminantes transportados atmosféricamente a escala regional. Dichos autores concluyeron que la combinación entre HYSPLIT y variables meteorológicas constituye una herramienta eficaz para reconocer áreas potenciales de influencia sobre los puntos receptores.

El comportamiento del  $H_2S$  fue diferente al observado para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $SO_2$ . Durante el episodio crítico de 2024 (Figura 55) las trayectorias mostraron una procedencia predominante desde el este-noreste, atravesando zonas continentales antes de llegar a Chimbote. De manera similar, durante el episodio crítico de 2025 (Figura 62) se identificó una

influencia importante de trayectorias procedentes del este y sureste, evidenciando una dinámica de transporte más compleja que la observada para los demás contaminantes. Este resultado coincide con los análisis estacionales de 2025 (Figuras 65 y 66), donde el invierno y la primavera mostraron una mayor participación de trayectorias continentales procedentes del interior del territorio peruano. Estas observaciones respaldan los resultados estadísticos obtenidos en el análisis de correlación, donde el  $\text{H}_2\text{S}$  fue el contaminante que presentó la relación más consistente con la dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa.

A nivel estacional se observó una variabilidad importante en los patrones de transporte atmosférico. Durante el verano y otoño de ambos años predominaron trayectorias costeras y oceánicas procedentes principalmente de los sectores sur y sur-sureste (Figuras 56, 57, 63 y 64). En contraste, el invierno y la primavera mostraron una mayor diversidad de trayectorias, incorporando contribuciones procedentes de regiones continentales localizadas al este y noreste del país (Figuras 58, 59, 65 y 66). Esta variabilidad estacional coincide con los cambios observados en la dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa a lo largo del periodo de estudio, evidenciando que los procesos de transporte atmosférico regional estuvieron condicionados por las condiciones meteorológicas predominantes de cada estación.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Cui, Xiaoquan y Zhong (2021), quienes señalan que el análisis de trayectorias atmosféricas agrupadas mediante HYSPLIT constituye una herramienta ampliamente utilizada para identificar rutas de transporte y áreas potenciales de origen de contaminantes atmosféricos. Asimismo, Stein et al. (2015) indican que las retrotrayectorias permiten evaluar la influencia de procesos regionales y de larga distancia sobre la calidad del aire en un punto receptor.

En conjunto, los resultados de HYSPLIT evidencian que la calidad del aire en Chimbote no depende exclusivamente de fuentes locales de emisión. Las trayectorias identificadas muestran una influencia recurrente de masas de aire procedentes de los sectores sur, sur-sureste, sureste, este y noreste, observándose diferencias según el contaminante y la estación del año. La coincidencia entre las retrotrayectorias, los patrones identificados mediante CBPF y las direcciones predominantes observadas en las rosas de viento permite concluir que el transporte atmosférico regional constituye un factor importante en la variabilidad de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  registradas en el distrito de Chimbote durante los años 2024 y 2025.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Se determinó que las concentraciones medias anuales de  $PM_{10}$  fueron de  $20.57 \mu g/m^3$  en 2024 y  $13.62 \mu g/m^3$  en 2025; las de  $PM_{2.5}$  fueron de  $15.60$  y  $11.64 \mu g/m^3$ ; las de  $SO_2$  alcanzaron  $24.48$  y  $19.61 \mu g/m^3$ ; y las de  $H_2S$  fueron de  $10.98$  y  $8.74 \mu g/m^3$ , respectivamente. Todos los contaminantes presentaron una disminución de sus concentraciones medias entre ambos años. Asimismo, las concentraciones anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se mantuvieron por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental del Perú; sin embargo, los niveles de  $PM_{2.5}$  registrados durante ambos años superaron los valores guía anuales establecidos por la Organización Mundial de la Salud.
- Se determinó que las condiciones meteorológicas del distrito de Chimbote estuvieron caracterizadas por temperaturas medias de  $20.37^\circ C$  durante 2024 y  $19.89^\circ C$  durante 2025, humedades relativas elevadas superiores al 80 % durante ambos años y velocidades medias del viento cercanas a 2 m/s, clasificadas principalmente como vientos flojos. Asimismo, las rosas de viento evidenciaron un predominio de corrientes procedentes de los sectores sur y sur-sureste durante los años 2024 y 2025, constituyendo el patrón dominante de circulación atmosférica en el área de estudio.
- Se determinó que la variabilidad temporal de los contaminantes atmosféricos presentó patrones diferenciados. Las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se registraron principalmente durante verano y otoño, observándose una fuerte relación temporal entre ambas fracciones particuladas ( $r_s=0.784-0.972$ ). El  $SO_2$  presentó la mayor variabilidad del periodo evaluado, registrando episodios críticos de  $861.69 \mu g/m^3$  en 2024 y  $525.96 \mu g/m^3$  en 2025. Por su parte, el  $H_2S$  presentó concentraciones más elevadas durante verano y una disminución progresiva hacia invierno y primavera, evidenciando una dinámica temporal distinta a la observada para los demás contaminantes.
- Se evaluó que las variables meteorológicas influyeron de manera diferenciada sobre los contaminantes atmosféricos. Durante 2024, el  $PM_{10}$  presentó correlaciones significativas con la dirección del viento ( $\rho=0.818$ ), la temperatura ( $\rho=0.758$ ) y la humedad relativa ( $\rho=-0.794$ ), mientras que durante 2025 el  $H_2S$  presentó correlaciones significativas con la dirección del viento ( $\rho=0.601$ ), la temperatura ( $\rho=0.860$ ) y la humedad relativa ( $\rho=-0.629$ ). En contraste,  $PM_{2.5}$  y  $SO_2$  no presentaron correlaciones anuales estadísticamente significativas. Sin embargo, los análisis trimestrales y

estacionales evidenciaron asociaciones importantes entre los contaminantes y las variables meteorológicas, especialmente con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

- Se determinaron probables fuentes de origen y patrones de transporte atmosférico mediante los análisis CBPF e HYSPLIT. Los resultados del método CBPF identificaron contribuciones recurrentes desde los sectores sur, sur-sureste, sureste, oeste-noroeste y este, dependiendo del contaminante y del periodo analizado. Asimismo, las retrotrayectorias HYSPLIT mostraron que los episodios críticos de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub> estuvieron asociados principalmente a masas de aire procedentes del sur y sur-sureste que siguieron trayectorias costeras a lo largo del litoral peruano, mientras que el H<sub>2</sub>S presentó una mayor influencia de trayectorias continentales procedentes del este, sureste y noreste. Ambos métodos evidenciaron que la calidad del aire en Chimbote estuvo influenciada tanto por fuentes locales como por procesos de transporte atmosférico regional.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda fortalecer y ampliar la red de monitoreo de calidad del aire en el distrito de Chimbote mediante la incorporación de nuevas estaciones en sectores identificados como potenciales zonas de contribución por los análisis CBPF y HYSPLIT, particularmente hacia los sectores sur, sur-sureste, sureste y oeste-noroeste, con la finalidad de mejorar la cobertura espacial y la identificación de fuentes de emisión atmosférica.
- Se recomienda desarrollar estudios complementarios de especiación química y caracterización fisicoquímica de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, con el propósito de identificar con mayor precisión las fuentes de origen de las partículas atmosféricas y verificar la contribución relativa de actividades industriales, pesqueras, portuarias, vehiculares y procesos de transporte regional identificados en la presente investigación.
- Se recomienda mantener un programa continuo de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> debido a que, aunque las concentraciones registradas cumplieron los Estándares de Calidad Ambiental del Perú, los valores anuales obtenidos durante 2024 y 2025 superaron las Directrices Mundiales de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud, lo que evidencia la necesidad de continuar evaluando sus posibles efectos sobre la salud de la población del distrito de Chimbote.

- Se recomienda profundizar la investigación de las fuentes asociadas a las elevadas concentraciones de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S identificadas durante los episodios críticos, especialmente en los sectores sur, sureste y suroeste del área de estudio, mediante campañas específicas de monitoreo de emisiones atmosféricas y estudios de dispersión que permitan identificar los principales focos emisores responsables de estos contaminantes.
- Se recomienda incorporar herramientas avanzadas de modelamiento atmosférico y análisis de trayectorias, integrando información satelital, modelos de dispersión y datos meteorológicos de alta resolución, con el fin de evaluar con mayor detalle la influencia del transporte regional y de larga distancia sobre la calidad del aire de Chimbote.
- Se recomienda desarrollar investigaciones orientadas a evaluar la influencia de la actividad portuaria, pesquera e industrial sobre la calidad del aire del distrito de Chimbote, considerando que los análisis CBPF y HYSPLIT evidenciaron contribuciones recurrentes provenientes de sectores asociados a dichas actividades económicas.
- Se recomienda realizar estudios epidemiológicos y de evaluación de riesgo sanitario que relacionen las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S con posibles efectos sobre la salud de la población expuesta, especialmente en grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias preexistentes.
- Se recomienda ampliar futuros estudios incorporando otros contaminantes atmosféricos criterio y precursores fotoquímicos, tales como NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO y compuestos orgánicos volátiles (COV), con la finalidad de obtener una evaluación integral de la calidad del aire y de los procesos atmosféricos que ocurren en el distrito de Chimbote.

## REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [US EPA]. (2025). Conceptos básicos sobre el material particulado. *Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.* : <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- Althuwaynee, O. F., Pokharel, B., Aydda, A., Lateef, B. A. Wan, K. S., & Hyuck, J. P. (2021). Spatial identification and temporal prediction of air pollution sources using conditional bivariate probability function and time series signature. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*: <https://doi.org/10.1038/s41370-020-00271-8>
- Alvarez, D., & Suarez, L. (2020). Aporte cuantitativo de las fuentes de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en sitios urbanos del valle del Mantaro, Perú. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*: <https://doi.org/10.20937/RICA.53473>
- Arkian, F. & Morey, S. (2024). Investigating the role of coastal atmospheric processes and fumigation phenomenon in air pollutant dispersion along the Gulf of Mexico coast. *Adsabs* *Harvard:*  
<https://ams.confex.com/ams/104ANNUAL/webprogram/Paper435826.html>
- Ascanio, J., Tarazona, B., & Betancur, L. (2021). Desarrollo de un prototipo de monitoreo de variables climáticas con proyección online y adquisición de datos. *ResearchGate*:: <https://www.researchgate.net/publication/353234632>
- Batterman, S., Grant, A., & Hee, S. (2023). Low level exposure to hydrogen sulfide: a review of emissions, community exposure, health effects, and exposure guidelines. *Critical Reviews in Toxicology*: <https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2229925>
- Begum, B., Biswas, S., Markwitz, A., & Hopke, P. (2010). Identification of Sources of Fine and Coarse Particulate Matter in Dhaka, Bangladesh. *Aerosol and Air Quality Research*: <https://aaqr.org/articles/aaqr-09-12-0a-0082>
- Cabello, R., Carbo, N., Romero, E., Ureta, J., Torres, E., Turpo, J., López, J. (2024). An exploratory analysis of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio during spring 2016-2018 in Metropolitan Lima: *Scientific Reports* <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11039682/>

- Carn, S., Fioletov, V., MvLinden, C., Li, C., & Krotkov, N. (2017). A decade of global volcanic SO<sub>2</sub> emissions measured from space. *Scientific Reports*: <https://www.nature.com/articles/srep44095>
- Carslaw, D. & Ropkins, K. (2013). Tools for the Analysis of Air Pollution Data *Package "openair"*: <https://cran.r-project.org/web/packages/openair/openair.pdf>
- Córdoba, P., Barrios, T., & Córdoba, I. (Marzo de 2021). Primera caracterización de emisiones contaminantes y la calidad del aire en Ica, Perú. *Redalyc*: <https://www.redalyc.org/journal/4435/443566346008/>
- Cui, L., Xiaoquan, S., & Zhong, G. (2021). Comparative Analysis of Three Methods for HYSPLIT Atmospheric Trajectories Clustering. *Atmosphere*: <https://doi.org/10.3390/atmos12060698> [mdpi.com]
- Dozzo, M., Aiuppa, A., Bilotta, G., Capello, A., & Ganci, G. (2025). Global-scale quantification of volcanic SO<sub>2</sub> using Sentinel-5P. *Remote Sensing*: <https://doi.org/10.3390/rs17030534>
- Dozzo, M., Aiuppa, A., Bilotta, G., Capello, A., & Ganci, G. (2025). A New Algorithm for the Global-Scale Quantification of Volcanic SO<sub>2</sub> Exploiting the Sentinel-5P TROPOMI and Google Earth Engine. *Remote Sensing*: <https://doi.org/10.3390/rs17030534>
- Ebere, C., Wirnkor, A., Wang, Y., & Ohiagu, O. (2020). An overview of emerging pollutants in air: Method of analysis and potential public health concern from human environmental exposure. *Trends in Environmental Analytical Chemistry [online]*: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214158820300350>
- Espinoza, J. (2019). Evaluación espacial y temporal del material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.*: [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA\\_cd4be5c6a2556efb34a1f3bdc9a83e32](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_cd4be5c6a2556efb34a1f3bdc9a83e32)
- Gao, X., An, C., Ji, Y., Wei, W., Xue, L., Gao, R., Shang, F., Li, J., Tan, L., & Li, H. (2025). NO<sub>2</sub> impacts in a petrochemical coastal city, Bohai Bay. *Toxics*: <https://doi.org/10.3390/toxics13030208>

- Gudelj, A., Bojić, F., & Bošnjak, R. (2023). An analytical model for estimating ship-related emissions in port areas. *Journal of Marine Science and Engineering*: <https://doi.org/10.3390/jmse11122377>
- Gurgatz, B., Bufato, C., Natalino, L. & Chagas, J. (2025). Assessment and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in a major Latin American port. *Atmosphere & Health*: <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01677-1>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2023). Metodología de la investigación (7ª ed.). *McGraw-Hill Interamericana*.: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Hu, T., & Ryuichiro, Y. (2020). Effect of atmospheric stability on air pollutant concentration and its generalization for real and idealized urban block models based on field observation data and wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104380>
- Huacani, W., Zuloaga, R., Sánchez, D., Meza, N., Aguirre, F., Yari, H., Vilca, E., & Luque, E. (2025). Analysis of atmospheric air pollutants (CO, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub>), through Sentinel-5P images in Apurímac region, Peru, period 2020–2023. *Preprints.org*: <https://doi.org/10.20944/preprints202508.0712.v1>
- Ilizarbe, G., Rojas, J., Cabello, R., Ugarte, C., Reynoso, P., & Valdiviezo, L. (2020). Caracterización química e identificación de fuentes PM<sub>10</sub> en dos distritos de Lima, Perú. *DYNA*: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.83688>
- Institute for Environmental Research and Education. (2025). Sulfur Dioxide Affect the Environment. <https://iere.org/how-does-sulfur-dioxide-affect-the-environment/>
- Jianghanyang, L., Michalski, G., Joy, E., Welp, L., Larrea, A., Reyes, J., Zapata, F., & Morales, L. (2021). Geochemical characterization and heavy metal sources in PM<sub>10</sub> in Arequipa, Peru. *Atmosphere*: <https://doi.org/10.3390/atmos12050641>
- Jurado, X., Reiminger, N., Maurer, L., Vázquez, J., & Wemmert, C. (2023). Sobre las correlaciones entre la materia particulada: comparación entre las concentraciones anuales/mensuales y PM<sub>10</sub> /PM<sub>2.5</sub>. *Atmosphere*.: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/2/385>

- Kharol, S., Fioletov, V., McLinden, C., Shephard, M., Sioris, C., Li, C., & Krotkov, N. (2020). Ceramic industry at Morbi as a large source of SO<sub>2</sub> emissions in India. *Atmospheric Environment*: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117243>
- Kota, S., Guo, H., Myllyvirta, L., Hub, J., Kumar, S., Garaga, R., Ying, Q., Gao, A., Dahiya, S., Wang, Y., & Zhang, H. (2018). Year-long simulation of gaseous and particulate air pollutants in India. *Atmospheric Environment* : <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.003>
- López, M., Callén, S., Murillo, R., García, T., Navarro, M., De La Cruz, M., & Mastral, A. (2005). Levels of selected metals in ambient air PM<sub>10</sub> in an urban site of Zaragoza (Spain). *Environmental Research*: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16053928/>
- López, R., Castillo, I., Collazo, A., Martínez, R. (2024). Relación entre factores meteorológicos y contaminantes criterio en La Habana. *Revista Cubana de Meteorología, Vol. 31, No. 1, enero-marzo 2025, ISSN: 2664-0880*: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcm/v31n1/2664-0880-rcm-31-01-e07.pdf>
- Luo, M., Hou, X., Gub, Y., Cheung, N., Hung, S. (2018). Trans-boundary air pollution in a city under various atmospheric conditions. *Science of the Total Environment* : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717330590>
- Maldonado, E., & Aguirre, P. (2024). Calidad de aire y sostenibilidad: revisión de la contaminación atmosférica por PM<sub>2.5</sub> en ciudades de América Latina y Europa. *Universitat Bonn*: <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/11313>
- Masiol, M., Squizzato, S., Cheng, M., Rich, D., & Rich, P. (2019). Differential Probability Functions for Investigating Long-term Changes in Local and Regional Air Pollution Sources. *Aerosol and Air Quality Research*: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0327>
- Mcdonald, K. (2012). Air pollution in the urban atmosphere: sources and consequences. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857090461500114>
- Morera, & Yasser. (2018). Chemical characterization of PM<sub>10</sub> samples collected simultaneously at a rural and an urban site in the Caribbean coast: Local and long-range source apportionment. *Atmospheric Environment*: <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2018.08.058>

- Moretti, L., Tafur, V., & Valiente, Y. (2023). Contaminación del aire en la ciudad de Lima, Perú. *Revista Koinonía*, 8(Supl.2): [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2542-30882023000400822](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2542-30882023000400822)
- Morozeck, M., Souza, L., Fernandes, M., & Soares, D. (2021). Airborne particulate matter in an iron mining city: Characterization, cell uptake and cytotoxicity effects of nanoparticles from PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>20</sub> on human lung cells. *Environmental Advances*: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100125>
- Murriel, F., & Eschenhagen, M. (2025). La contaminación atmosférica como problema multidimensional: aporte de las universidades peruanas durante el periodo 2001–2020. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 2(16): <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/Kawsaypacha/article/download/28948/27963/129310>
- Nguyen, T., Du, N., & Hoa, N. (2023). Emission Source Areas of Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmosphere*: <https://doi.org/10.3390/atmos14030579>
- Organización Mundial de Salud [OMS]. (2023). Ambient (outdoor) air pollution. *Organización Mundial de la Salud*: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de Salud [OMS]. (2021). Directrices mundiales sobre la calidad del aire. *Organización Mundial de la Salud*: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Opacka, B., Stavrakou, T., Müller, J., De Smedt, I., Geffen, J., Marais, E., Horner, R., Millet, D., Wells, K., & Guenther, A. (2025). Natural NO<sub>x</sub> emissions over Africa constrained by TROPOMI. *Atmospheric Chemistry and Physics*: <https://doi.org/10.5194/acp-25-2863-2025>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] . (Enero de 2022). Evaluación ambiental de seguimiento de la calidad del aire en el ámbito de la zona industrial Gran Trapecio, ubicada en el distrito Chimbote, provincia Santa, departamento Áncash, de enero a octubre de 2022. *OEFA*: <https://repositorio.oefa.gob.pe/items/13be4d86-fb37-43a6-be67-81e8aaf8fa15/full>

- Pen, Y. (2025). A Review on PM<sub>2.5</sub> Sources, Mass Prediction, and Association Analysis. *Sustainability*: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/3/1101>
- Pereira, E., Palmeira, A., Ferreira, P., Viegas, L., & Moreira, D. (2022). Long-term correlations and cross-correlations in meteorological variables and air pollution in a coastal urban region. *Sustainability*: <https://doi.org/10.3390/su142114470>
- Picoy, J. (2022). Dispersión del material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), con interrelación a los factores meteorológicos en el centro poblado de Champamarca, distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco – 2018. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio UNDAC.: [http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2513/1/T026\\_75629485\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2513/1/T026_75629485_T.pdf)
- Ramos, S., Bautista, R., & Valdez, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia*: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792010000100005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000100005)
- Rangel, F., Anaya, M., Lannacone, J., & Romero, L.(2022). Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos: *Revisión sistemática*. *Revista Campus, Universidad de San Martín de Porres*: <https://usmp.edu.pe/campus/pdf/revista33/articulo2.pdf>
- Reyes, Y. (2025). La contaminación atmosférica como factor desencadenante en el desequilibrio salud-enfermedad. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2221-24502025000100027](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2221-24502025000100027)
- Rodrigues, A., & Bustamante, M. (2013). Land Use Change, Air Pollution and Climate Change—Vegetation Response in Latin America. *Developments in Environmental Science*: [https://www.researchgate.net/publication/286394462\\_Land\\_Use\\_Change\\_Air\\_Pollution\\_and\\_Climate\\_Change-Vegetation\\_Response\\_in\\_Latin\\_America](https://www.researchgate.net/publication/286394462_Land_Use_Change_Air_Pollution_and_Climate_Change-Vegetation_Response_in_Latin_America)
- Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Scientific methods of surveying and building knowledge*: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revista/article/view/1647>

- Rojas, F., Pacsi, S., & Sánchez, O. (2022). Simulación computacional e influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Lima Metropolitana. *Información Tecnológica*: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000300223>
- Salvador, P. (2005). Caracterización de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en Madrid. *Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones*: <http://hdl.handle.net/20.500.14352/55800>
- Schraufnagel, D., Balmes, J., Cowl, T., De Matteis, S., Jung, S., Mortimer, K., Pérez, R., Rice, M., Riojas, H., Sood, A., Thurston, G., A, T., Vanker, V., & Wubbles, D. (2018). Air Pollution and Noncommunicable Diseases. *World Health Organization*: <https://www.emro.who.int/noncommunicable-diseases/publications/air-pollution.html>
- Sistema Nacional de Información Ambiental [SINIA]. (2018). Contaminación atmosférica. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/contaminacion-atmosferica>
- Souza, I., Arribavene, H., Azevedo, V., Duarte, I., Rocha, L., Matsumoto, S., Franco, A., Elliott, M., Wunderlin, D., Monferrán, M., & Fernandes, M. (2021). Different trophodynamics between two proximate estuaries with differing degrees of pollution. *Science of the Total Environment*: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144651>
- Sposob, G. (2025). Contaminación atmosférica. *Enciclopedia Concepto*: <https://concepto.de/contaminacion-atmosferica/>
- Squizzato, S. (2017). Urban air quality in a mid-size city — PM<sub>2.5</sub> composition, sources and identification of impact areas: From local to long range contributions. *Atmospheric Research*: <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2016.11.011>
- Stein, A., Draxler, R., Rolph, G., Stunder, B., Cohen, M., & Ngan, F. (2015). NOAA'S HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Traven, L., Linšak, Z., Crvelin, G., & Baldigara, A., (2023). Atmospheric parameters and H<sub>2</sub>S concentrations near waste facilities. *Environmental Monitoring and Assessment*: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12047-2>

- Trošić, L., & Filipčić, A. (2022). Lagrangian particle dispersion (HYSPLIT) model analysis of the sea breeze case with extreme mean daily PM<sub>10</sub> concentration in Split, Croatia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 73071–73084. : <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20918-3>
- Uria-Tellaetxe, & Carslaw, D. (2014). Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling & Software*: <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2014.05.002>
- Vongruang, P., Suppoung, K., Kirtsaeng, S., Prueksakorn, K., Bich, P., Pimonsree, S. (2024). Development of meteorological criteria for classifying PM<sub>2.5</sub> risk in a coastal industrial province in Thailand. *Aerosol and Air Quality Research*: <https://aaqr.org/articles/aaqr-23-12-oa-0321>
- Xiaorui, W., Kong, Q., Lan, Y., Sng, J., & Yu, L. (2024). Refined sea salt markers for coastal PM<sub>2.5</sub> apportionment. *Environmental Science & Technology*: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c10142>
- Xiao, G., Cong, A., Yongxin, Y., Yuan, Y., Wei, W., Likun, X., Rui, G., Fanyi, S., Ji, D., Luyao, T., & Hong, L. (2025). NO<sub>2</sub> impacts in a petrochemical coastal city, Bohai Bay. *Toxics*: <https://doi.org/10.3390/toxics13030208>
- Yassin, M., Almutairi, S., & Al-Hemoud, A., (2018). Dust storms backward Trajectories' and source identification over Kuwait. *Atmospheric Research*: <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2018.05.020>
- Zambrano, J., Orellana, M., Coro, A., & Heras, S. (2023). Análisis de la Calidad de las Asociaciones de Contaminantes y Variables Meteorológicas por Estacionalidad. *Revista Tecnológica - ESPOL*: <https://www.researchgate.net/publication/374744979>
- Zapana, V. (2021). Relación de las variables meteorológicas en la dispersión espacio temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) del distrito de Pacocha, Moquegua, 2019–2020. [Tesis de licenciatura, Universidad Continental] *Repositorio Institucional Continental*: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11366>

## **ANEXOS**

### **Anexo 1: Matriz de Consistencia**

| Título                                                                                                                                                                                                                                                              | Problema                                                                                                                                                                                                                                                                           | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Hipótesis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Variables independientes                                                                    | Variable dependiente                                                                                                    | Diseño                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Técnica                                     | Instrumentos                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Evaluación temporal de contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) y su relación con variables meteorológicas e identificación de fuentes mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024–2025) | ¿Cuál es la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ), su relación con las variables meteorológicas y sus fuentes de origen mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024–2025)? | <p><b>Objetivo General</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Evaluar la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), su relación con las variables meteorológicas y sus fuentes de origen mediante HYSPLIT y CBPF en Chimbote, Santa, Áncash (2024 – 2025).</li></ul> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Determinar la concentración de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> en la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.</li><li>- Determinar las características meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento que presenta la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.</li><li>- Determinar la variabilidad temporal de la concentración de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> en la atmósfera del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.</li><li>- Evaluar la relación de las variables meteorológicas con los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>) del distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.</li><li>- Determinar las probables fuentes de origen de los contaminantes aplicando el método CBPF, y retrotrayectorias de masas de aire mediante el modelo HYSPLIT en el distrito de Chimbote, Santa, Áncash, 2024-2025.</li></ul> | <p><b>Ha1:</b> Existe una relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, así como patrones de origen local y regional identificados mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.</p> <p><b>Ho1:</b> No existe relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y la variación temporal de los contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) en el distrito de Chimbote durante el periodo 2024–2025, ni se identifican patrones de origen mediante los modelos HYSPLIT y CBPF.</p> | Variables meteorológicas (temperatura, humedad, velocidad del viento, dirección del viento) | Concentración de Contaminantes atmosféricos (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ) | <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>No experimental</b>: no hay manipulación de variables; se estudian en su contexto natural.</li><li>- <b>Correlacional</b>: se busca determinar correlaciones entre variables meteorológicas y contaminantes, sin establecer causalidad.</li><li>- <b>Longitudinal</b>: se recopilan datos a lo largo del tiempo (2024–2025), permitiendo analizar cambios estacionales y temporales.</li></ul> | Observación indirecta, análisis estadístico | Sensor de temperatura; sensor de humedad; sensor de velocidad de viento; sensor de dirección de viento; analizador automático de partículas, de H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> ; HYSPLIT, openair; CBPF, openair |

## Anexo 2: Procesamiento de datos en programa RStudio

**Figura 67:** Manejo de procesamiento de datos para los contaminantes atmosféricos

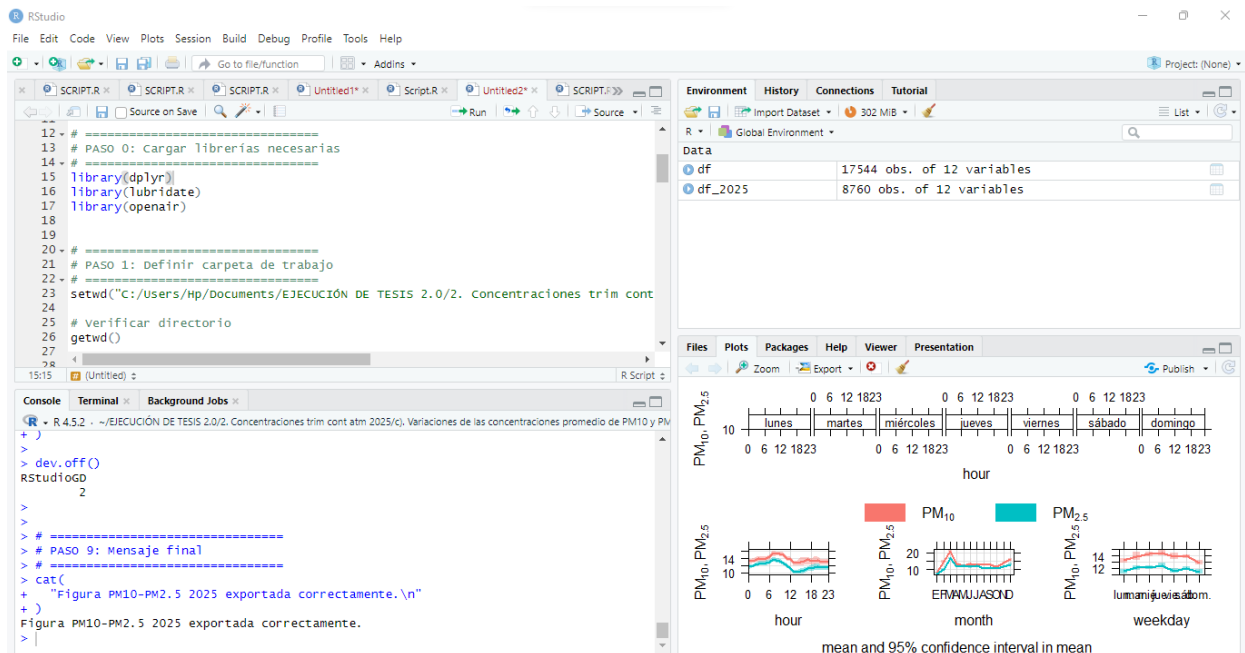


**Figura 68:** Manejo de procesamiento de datos para análisis trimestral mediante rosas de viento

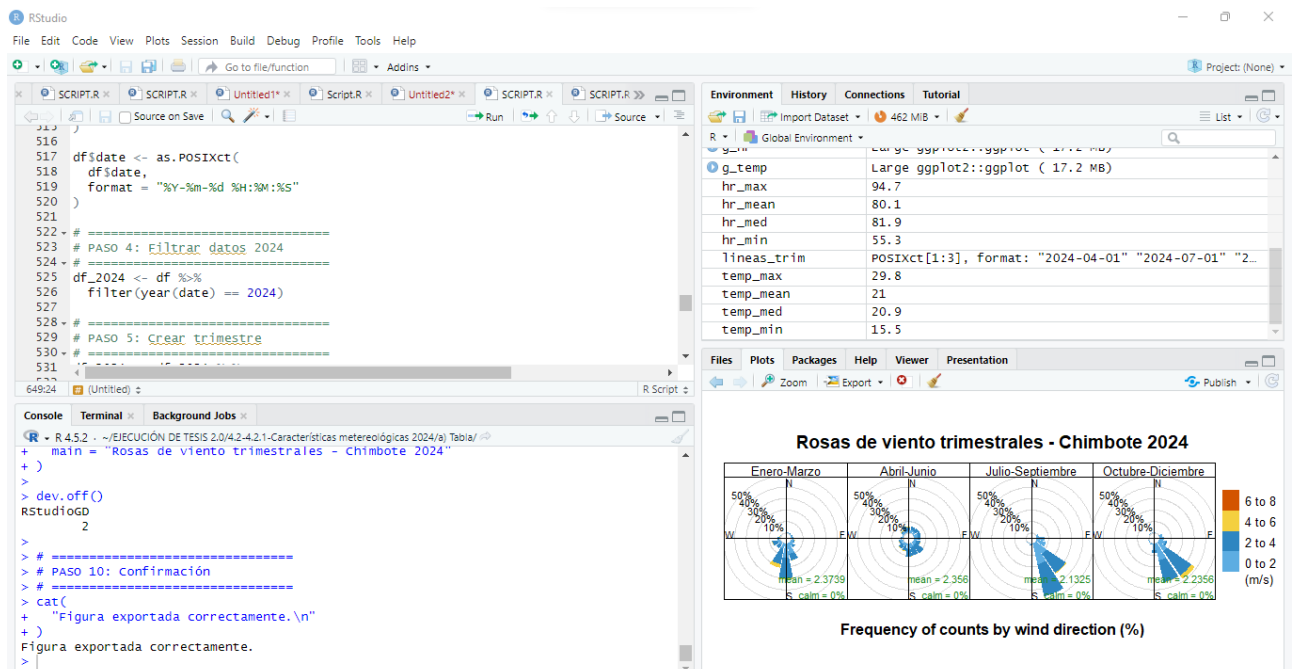
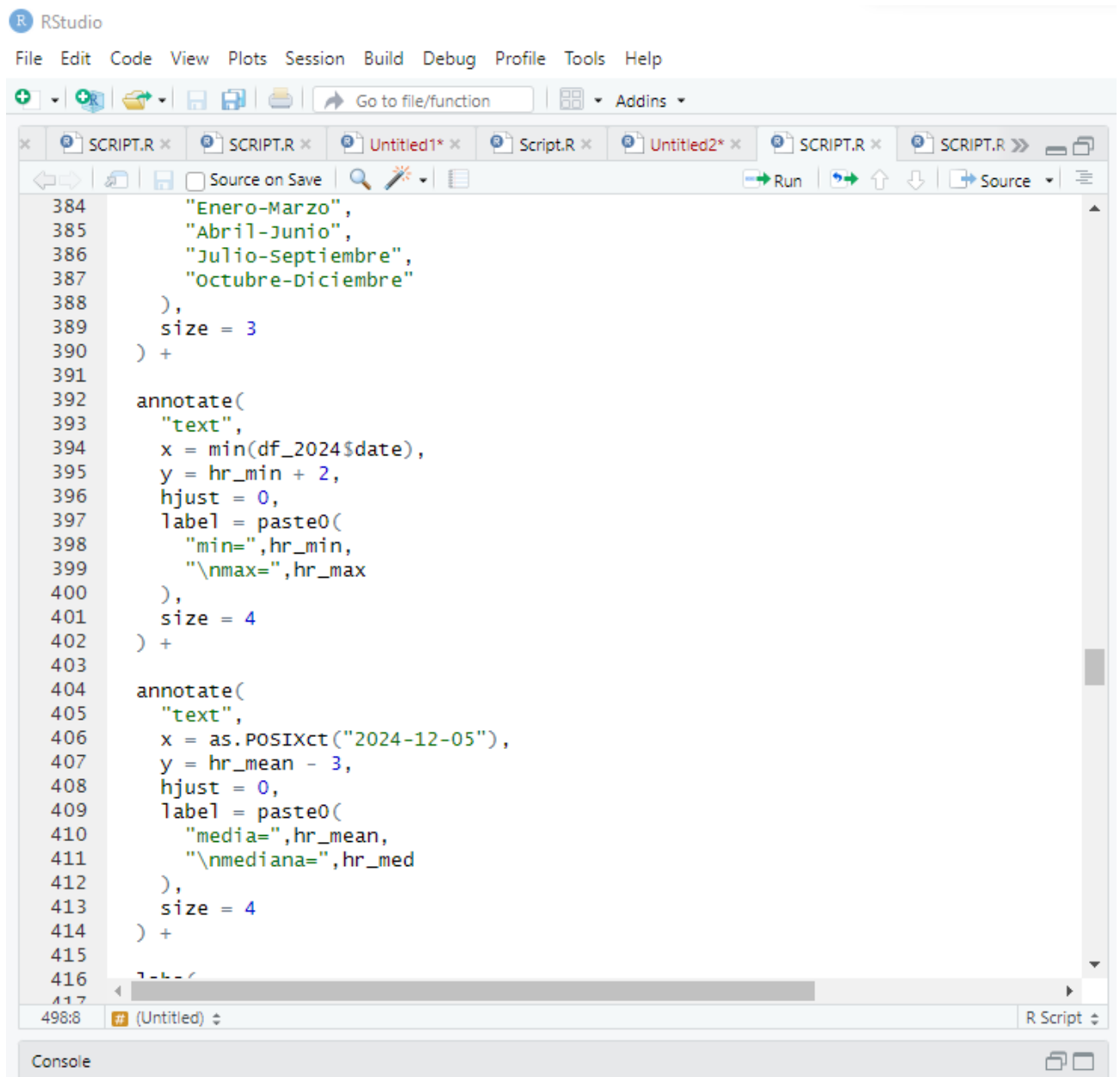


**Figura 69:** *R script desarrollados para el procesamiento de datos en RStudio*



The screenshot displays the RStudio interface with a script editor containing R code. The code is organized into several sections, with line numbers visible on the left margin. The script includes a list of months, a function call to 'annotate' with various parameters, and another 'annotate' call for a specific date. The console at the bottom is currently empty.

```
384     "Enero-Marzo",
385     "Abril-Junio",
386     "Julio-Septiembre",
387     "Octubre-Diciembre"
388   ),
389   size = 3
390 ) +
391
392 annotate(
393   "text",
394   x = min(df_2024$date),
395   y = hr_min + 2,
396   hjust = 0,
397   label = paste0(
398     "min=", hr_min,
399     "\nmax=", hr_max
400   ),
401   size = 4
402 ) +
403
404 annotate(
405   "text",
406   x = as.POSIXct("2024-12-05"),
407   y = hr_mean - 3,
408   hjust = 0,
409   label = paste0(
410     "media=", hr_mean,
411     "\nmediana=", hr_med
412   ),
413   size = 4
414 ) +
415
416 # ...
417
498:8 # (Untitled) R Script
```

### Anexo 3: Modelamiento de datos en HYSPLIT

Figura 70: Modelamiento de datos en HYSPLIT

