



Análisis de la Calidad del Aire en Bogotá (2021-2024)

Andrés Felipe Arévalo Mogollón

201911412

Adriana Lourdes Abrego Pérez

Asesora

Resumen

Este proyecto de grado aborda la preocupante situación de la calidad del aire en Bogotá, centrándose en el análisis de los contaminantes clave: dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 2.5 micras (PM_{2.5}), y partículas menores a 10 micras (PM₁₀), durante el período comprendido entre enero de 2021 y mayo de 2024. Utilizando datos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), el estudio evalúa las concentraciones de estos contaminantes, identifica patrones estacionales y zonas con altos niveles de contaminación, y examina la influencia de variables meteorológicas como la temperatura, la radiación solar, la presión atmosférica y la velocidad del viento.

A través de la implementación de modelos estadísticos y econométricos, incluidos Modelos de Vectores Autorregresivos (VAR), Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM), Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL), y Random Forest, la investigación proporciona una comprensión detallada de las dinámicas que afectan la calidad del aire. Los resultados revelan una necesidad urgente de políticas públicas y acciones de mitigación efectivas para enfrentar el deterioro de la calidad del aire en la capital colombiana.

El estudio culmina con recomendaciones específicas para mejorar la gestión ambiental y reducir los niveles de contaminación, enfatizando la importancia de la tecnología limpia, regulaciones más estrictas de emisiones y la promoción de transportes menos contaminantes. Las conclusiones de esta investigación son fundamentales para los formuladores de políticas, los organismos de salud pública y la comunidad científica interesada en las soluciones sostenibles para los problemas ambientales urbanos.

Palabras clave: Calidad del aire, Contaminación, Bogotá, Modelos econométricos, Políticas de mitigación, PM_{2.5}, NO₂, PM₁₀, Random Forest.

Índice

Introducción y objetivos	1
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
Antecedentes.....	5
Metodología.....	7
Estructuración de datos	7
Diagrama de flujo.....	7
Variables y Unidades de Medida	8
Naturaleza de los Datos	8
Desafíos en la Recolección de Datos	9
Cobertura de Variables por Estación.....	9
Selección de variables para el Análisis.....	9
Exclusión de Variables.....	9
Inclusión de Variables.....	10
Datos y procesamiento.....	13
Estadísticas descriptivas	13
Proceso de Estequiometria	24
Análisis exploratorio de la correlación entre las variables.....	27
Análisis de Contaminantes Atmosféricos	30
Visualización Geoespacial de Contaminantes Atmosféricos.....	35
Mapa Global de PM2.5	36
Visualización de Estaciones de Monitoreo en Bogotá.....	36

Normalización de Variables.....	37
Modelos propuestos	38
Modelo Probit.....	38
Modelo de Vectoriales autorregresivos (VAR).....	50
Modelo de Vector Error Correction Model (VECM).....	54
Modelo de Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)	59
Random forest	63
Resultados y discusiones	66
Resultados de las estaciones de monitoreo	66
Resultados del Modelo Probit.....	73
Resultados Detallados por Contaminante	73
Influencia de la Velocidad del Viento.....	74
Implicaciones para Políticas Públicas	74
Resultados Modelo Vectorial Autorregresivo (VAR).....	75
Resultados Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM)	75
Resultados Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)	77
Resultados Random Forest.....	78
Conclusiones y recomendaciones	79
Referencias	90
Anexos	92

Introducción y objetivos

Introducción

En las últimas décadas, la calidad del aire urbano ha emergido como un tema crítico en la agenda de salud pública y desarrollo sostenible global, especialmente en megaciudades en desarrollo como Bogotá. Esta capital colombiana, caracterizada por su alta densidad poblacional y extensa actividad industrial y vehicular, enfrenta desafíos significativos en la gestión de su calidad del aire. La preocupación central de este estudio radica en la evaluación exhaustiva de los niveles de contaminantes atmosféricos específicos: dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 2.5 micras (PM_{2.5}) y partículas menores a 10 micras (PM₁₀), durante el período de enero de 2021 a mayo de 2024. Estos contaminantes son de particular interés debido a su probada capacidad para exacerbación de problemas de salud pública y deterioro ambiental. (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2024)

Diversos estudios anteriores han demostrado que la exposición a niveles elevados de estos contaminantes está asociada con incrementos en la morbilidad y mortalidad cardiovascular y respiratoria. Así, la investigación busca no solo diagnosticar el estado actual y evolución temporal de la contaminación, sino también entender las dinámicas y factores que influyen en estos patrones. Utilizando datos meticulosamente recolectados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), este trabajo aspira a identificar patrones estacionales, determinar las zonas con alta incidencia de contaminación y evaluar el impacto de variables meteorológicas como temperatura, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento sobre los niveles de contaminación.

Para lograr una comprensión detallada y robusta de estas interacciones, se implementaron varios modelos estadísticos y econométricos, incluyendo Modelos de Vectores Autorregresivos (VAR), Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM), Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) y técnicas de Random Forest. Cada uno de estos modelos ofrece perspectivas distintas y complementarias sobre la dinámica de los contaminantes, desde interacciones de corto plazo hasta equilibrios de largo plazo y la capacidad predictiva frente a fluctuaciones futuras en la calidad del aire.

Este estudio no solo se alinea con la necesidad de evidencia empírica para formular políticas públicas efectivas, sino que también aborda la urgencia de intervenciones basadas en datos para mitigar la contaminación del aire en Bogotá. Al correlacionar directamente los datos de calidad del aire con los modelos econométricos avanzados, la investigación proporciona una base cuantitativa para la toma de decisiones en la gestión ambiental y planificación urbana en Bogotá.

Este estudio proporciona una base sólida para la acción gubernamental y comunitaria, dirigida a mejorar la calidad de vida en una de las ciudades más grandes de América Latina.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es realizar un análisis exhaustivo de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá, específicamente durante el período comprendido entre enero de 2021 y mayo de 2024. Este análisis se centrará en evaluar las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos: dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 2.5 micras (PM_{2.5}), y partículas menores a 10 micras (PM₁₀), distribuidas en diversas zonas urbanas. Utilizando los datos recogidos por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), se pretende identificar patrones estacionales y geográficos de contaminación, zonas de alta incidencia y los principales factores ambientales que influyen en los niveles de contaminación. Con base en estos hallazgos, se desarrollarán recomendaciones concretas para la formulación de políticas públicas y acciones de mitigación dirigidas a mejorar sustancialmente la calidad del aire, la salud pública y el bienestar general de la población de Bogotá.

Objetivos específicos

1. Evaluar las Tendencias Temporales y Espaciales de los Contaminantes Atmosféricos:
 - a. Analizar la variación de las concentraciones de NO₂, PM_{2.5} y PM₁₀ en diferentes zonas de Bogotá, identificando patrones de distribución temporal y espacial.
 - b. Determinar las zonas con niveles críticos de contaminación que consistentemente exceden los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
2. Examinar el Impacto de Factores Meteorológicos sobre la Calidad del Aire:
 - a. Investigar cómo variables ambientales como la temperatura, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento influyen en las concentraciones de los contaminantes mencionados.
 - b. Utilizar modelos estadísticos y econométricos, como el modelo Probit, VAR, VECM y ARDL para cuantificar la relación entre estos factores meteorológicos y los niveles de contaminación.
3. Desarrollar un Marco de Modelización para Predecir Fluctuaciones en la Calidad del Aire:
 - a. Implementar y validar modelos predictivos que permitan anticipar episodios de alta contaminación, basándose en los patrones históricos y las interacciones entre variables identificadas.

- b. Evaluar la efectividad de estos modelos para ser utilizados en la planificación de intervenciones de mitigación y en la formulación de alertas de salud pública.
- 4. Proponer Estrategias de Mitigación y Políticas Públicas Basadas en Evidencia:
 - a. Formular recomendaciones para la implementación de tecnologías limpias y la regulación de emisiones en sectores críticos como el industrial y el vehicular.
 - b. Sugerir políticas para promover prácticas de transporte sostenible y la mejora de la infraestructura urbana para reducir la resuspensión de partículas.
- 5. Comparar los niveles promedio anuales de los contaminantes en Bogotá durante el año 2023 con los de estudios previos para identificar y analizar discrepancias significativas, evaluando las posibles causas y el impacto de las políticas ambientales implementadas.
 - a. Realizar una revisión exhaustiva de la literatura para identificar estudios previos que reporten niveles de contaminantes en Bogotá, asegurando que los datos sean comparables en términos de metodología y periodo de tiempo.

Antecedentes

La calidad del aire en áreas urbanas, particularmente en Bogotá, representa un tema de creciente preocupación tanto a nivel académico como en términos de salud pública y ambiental. Bogotá, siendo una de las ciudades más grandes y densamente pobladas de América Latina, enfrenta desafíos significativos relacionados con la contaminación atmosférica debido a diversas fuentes antropogénicas y naturales.

El estudio seminal de la Universidad de los Andes (Mauricio, Juliana, & Eduardo, 2007) proporciona una visión inicial de la situación de la calidad del aire en Bogotá. Gaitán encontró que, si bien las concentraciones de SO₂ y NO₂ generalmente cumplen con las normativas anuales establecidas, áreas como Puente Aranda muestran violaciones persistentes. Las mediciones de PM₁₀, aunque superan la norma en varias estaciones, no abordan exhaustivamente el impacto del PM_{2.5}, conocido por su severo riesgo para la salud humana.

Investigaciones más recientes, como la de Universidad Santo Tomás (Rodríguez Camargo, Sierra Parada, & Blanco Becerra, 2020), se centran específicamente en PM_{2.5} y su distribución espacial en Bogotá entre los años 2014 y 2015. El estudio destacó que la localidad de Kennedy exhibe las concentraciones más altas de PM_{2.5}, asociadas con aumentos significativos en la mortalidad cardiopulmonar a corto y largo plazo, según las directrices de la OMS. Sin embargo, la investigación no abordó de manera integral otros contaminantes relevantes.

Desde una perspectiva económica y de políticas públicas, (Bonilla Londoño, y otros, 2022) discute cómo la contaminación del aire afecta la salud y la economía en Colombia. El estudio del Departamento Nacional de Planeación revela que la contaminación urbana contribuye a miles de muertes prematuras anuales, con costos significativos para el PIB regional y nacional. A pesar de avances regulatorios desde la Ley 99 de 1993, las emisiones de vehículos diésel, industrias e incendios forestales continúan desafiando los estándares de calidad del aire, especialmente los de PM_{2.5} establecidos por la OMS.

En el informe más reciente de (IQ AIR, 2023), se destaca que la concentración promedio anual de PM_{2.5} en Colombia disminuyó un 10% en 2023, alcanzando los 14.1 µg/m³, lo que representa un avance hacia el objetivo intermedio 3 establecido por la OMS. Esta mejora fue impulsada por reducciones significativas en los niveles de PM_{2.5} en ciudades como Envigado, Medellín y la

capital, Bogotá. En particular, Bogotá experimentó una disminución del 11% en los niveles de PM2.5 con una concentración promedio anual de 13.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el valor más bajo reportado en los últimos cuatro años. Condiciones meteorológicas como inversiones térmicas contribuyeron a condiciones de baja calidad del aire en marzo, registrando los promedios mensuales más altos para la ciudad en 2023. La cobertura de la red de monitoreo casi triplicó el número de ciudades que reportaron datos en Colombia durante 2023, incorporando nueve nuevas ciudades al informe. A pesar de la mejora general en los niveles de calidad del aire a nivel nacional, ninguna ciudad cumplió con la guía anual de PM2.5 establecida por la OMS.

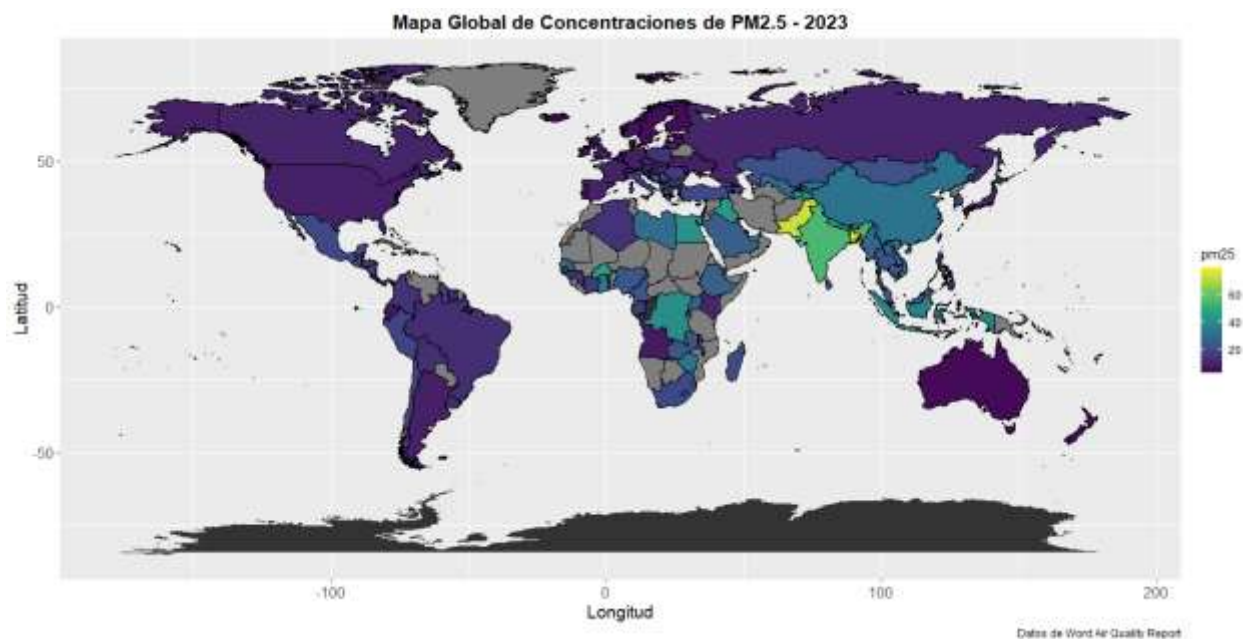


Ilustración 1. Mapa Global de PM2.5 (fuente: autor propio)

La importancia de abordar este problema radica en su impacto directo en la salud pública, los costos económicos asociados y la necesidad urgente de mejorar las políticas de gestión ambiental en Bogotá. Esta investigación busca llenar los vacíos identificados en la literatura al analizar exhaustivamente la calidad del aire en Bogotá, proporcionando recomendaciones específicas para mejorar la gestión y reducir los impactos adversos en la población y el medio ambiente.

Metodología

Estructuración de datos

Diagrama de flujo

Se presenta un diagrama de flujo que describe de manera estructurada los diversos procesos y decisiones fundamentales implementados para la realización de este proyecto de grado. Este diagrama facilita la comprensión visual de la secuencia y la interrelación entre las etapas del estudio, desde la conceptualización hasta la conclusión del mismo. En el diagrama, los puntos de inicio y fin están destacados en rojo, señalando claramente los límites del proceso investigativo. Los procedimientos y análisis realizados se indican en azul, representando las acciones y análisis sistemáticos llevados a cabo. Las decisiones críticas que orientaron el curso de la investigación se marcan en verde, subrayando los puntos donde se tomaron caminos fundamentales basados en los resultados obtenidos y los criterios metodológicos establecidos.

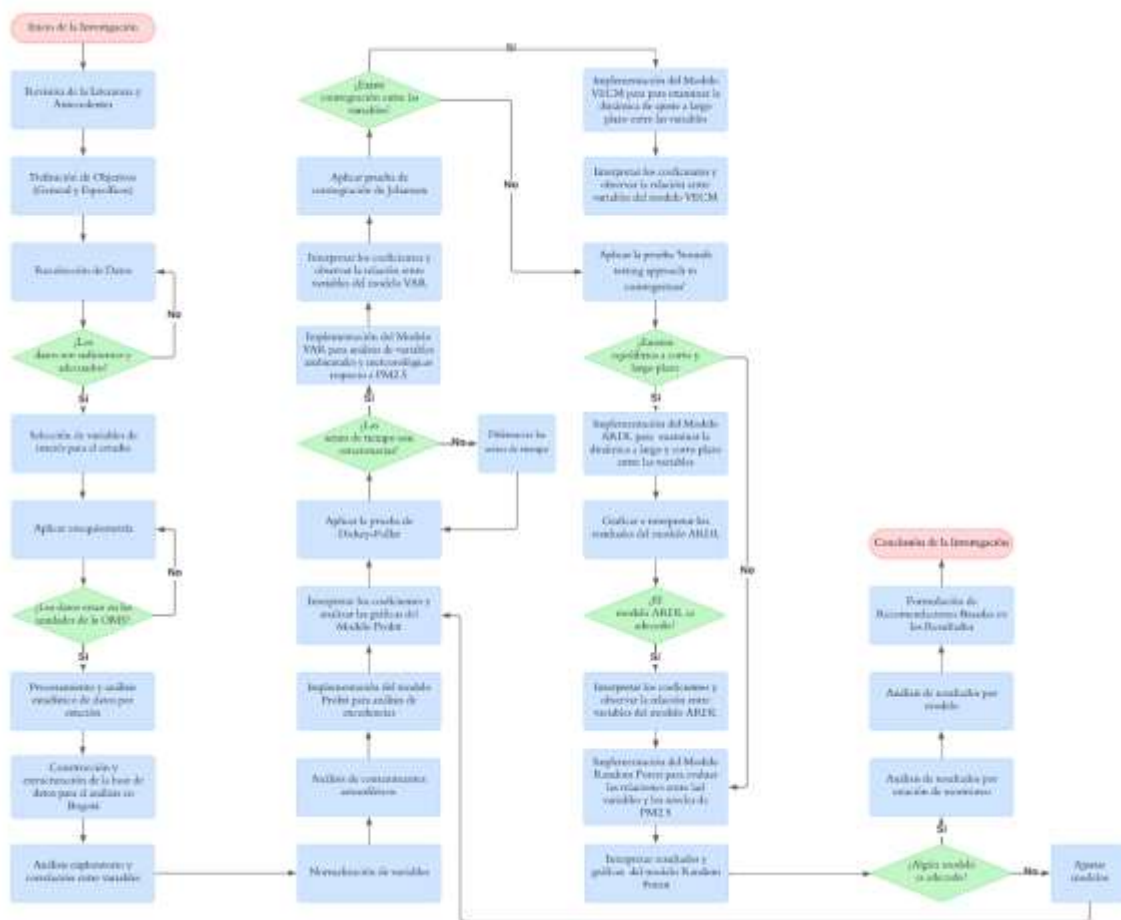


Ilustración 2. Diagrama de flujo

Variables y Unidades de Medida

El presente estudio se enfoca en la evaluación de la calidad del aire en Bogotá, Colombia, utilizando datos provenientes de la RMCAB (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, 2024). Para ello, se analizaron registros continuos desde el 1 de enero de 2021 hasta el 31 de mayo de 2024, obtenidos de trece estaciones de monitoreo distribuidas estratégicamente a lo largo de la ciudad. Las estaciones se localizan en las siguientes áreas:

- Zona norte: Guaymaral, Min Ambiente, Suba, Usaquén y Las Ferias.
- Zona sur: San Cristóbal y Tunal.
- Zona oeste: Bolivia, Carvajal-Sevillana, Fontibón, Kennedy y Puente Aranda.
- Zona centro: Centro de Alto Rendimiento.

Se obtuvieron datos correspondientes a las siguientes variables ambientales, cada una con sus respectivas unidades de medida:

- PM10, PM2.5, Black Carbon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- CO, CO2 (ppm)
- SO2, NO, NO2, NOX, O3 (ppb)
- Velocidad del Viento (m/s)
- Dirección del Viento (grados)
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- Presión Barométrica (mmHg)
- Radiación Solar (W/m^2)
- Precipitación (mm)
- Humedad Relativa (HR) (%)
- Precipitación Fronteriza en Masa (BBP) (%)

Naturaleza de los Datos

Los datos se estructuran en series de tiempo, con observaciones registradas cronológicamente e intervalos regulares de una hora. Cada estación proporcionó aproximadamente 30,000 observaciones por variable, sumando un total aproximado de 390,000 observaciones para cada variable a lo largo de todas las estaciones.

Desafíos en la Recolección de Datos

Los equipos de monitoreo, al estar expuestos a la intemperie, son susceptibles a daños físicos que pueden requerir la importación de piezas de repuesto o, en casos extremos, el envío del equipo al exterior para su reparación. Este proceso no solo implica un considerable tiempo de inactividad sino también la potencial pérdida de datos.

Además, los equipos requieren recalibraciones periódicas para asegurar la precisión de los datos, un proceso que puede variar desde algunas horas hasta varios días, dependiendo de la complejidad del ajuste y la capacidad técnica disponible, introduciendo otro factor de pérdida de datos.

Cabe resaltar que antes de la publicación en el sitio web de la RMCAB, los datos son rigurosamente verificados por ingenieros especializados para confirmar su fiabilidad.

Cobertura de Variables por Estación

No todas las estaciones cuentan con el equipo necesario para monitorear las 18 variables mencionadas, principalmente debido al alto costo de los equipos especializados. Sin embargo, cada zona cuenta con al menos una estación capaz de medir un mínimo de 17 de estas variables. Variables como PM10, PM2.5, velocidad del viento, precipitación, O3, CO, NO y NO2 son monitoreadas por todas las estaciones.

Selección de variables para el Análisis

En el proceso de determinar cuáles variables incorporar en el análisis de los contaminantes en Bogotá, se efectuó una cuidadosa selección basada tanto en la relevancia ambiental como en la consistencia de los datos disponibles. A continuación, se detallan las variables seleccionadas y las razones para excluir variables:

Exclusión de Variables

- **Dirección del Viento:** Esta variable fue excluida debido a que las mediciones se realizan a 10 metros del suelo, una altura que puede no reflejar adecuadamente las condiciones de dispersión de contaminantes a nivel de respiración humana. Estudios indican que la dirección del viento a esta altura puede ser significativamente diferente de la experimentada a nivel del suelo debido a efectos de edificación y otros obstáculos urbanos, lo que podría llevar a interpretaciones erróneas en el contexto de la calidad del aire urbana.

- **Precipitación Fronteriza en Masa (BBP):** Esta variable se excluyó debido a su escasa disponibilidad a través de las estaciones de monitoreo, lo que limita la capacidad para realizar análisis comparativos y de tendencias a largo plazo.
- **NOX:** Aunque NOX es un precursor clave en la formación de ozono y otras partículas finas, su inclusión fue considerada redundante dado que se optó por analizar NO y NO2 individualmente, ambos con límites estándar definidos en las nuevas Directrices Mundiales de la OMS sobre la calidad del aire (World Health Organization, 2021). Además, la desagregación en NO y NO2 permite un análisis más detallado del comportamiento y origen de estos óxidos en el ambiente urbano.

Inclusión de Variables

Los contaminantes seleccionados para el estudio incluyen CO, CO2, SO2, NO, NO2 y O3. Estas variables son esenciales por sus conocidos efectos adversos tanto para la salud humana como para el ambiente:

- **Monóxido de Carbono (CO):** es un gas incoloro e inodoro que se considera altamente tóxico. Su peligrosidad radica en su capacidad para unirse a la hemoglobina en la sangre, formando carboxihemoglobina, lo que reduce drásticamente la capacidad de transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos. Este fenómeno puede llevar a la hipoxia tisular, provocando asfixia y daño cerebral irreversible, e incluso la muerte en exposiciones prolongadas a altas concentraciones. A nivel ambiental, el CO contribuye a la contaminación del aire, participando en reacciones fotoquímicas que generan ozono troposférico, un componente nocivo del smog urbano. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007)
- **Dióxido de Azufre (SO2):** es un gas irritante que puede tener serios impactos en la salud y el medio ambiente. Desde el punto de vista de la salud, el SO2 puede causar problemas respiratorios, especialmente en personas con enfermedades pulmonares preexistentes como el asma. La exposición a altas concentraciones de SO2 puede provocar inflamación de las vías respiratorias y reducir la función pulmonar. Además, el SO2 contribuye a la formación de lluvia ácida, la cual tiene efectos perjudiciales sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres, y puede deteriorar edificios y monumentos históricos al reaccionar con materiales de construcción como la piedra caliza. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007)

- **Óxidos de Nitrógeno (NO y NO₂):** son contaminantes del aire que presentan serios riesgos para la salud humana y el medio ambiente. En términos de salud, la exposición a estos gases puede irritar las vías respiratorias y empeorar condiciones pulmonares preexistentes como el asma y la bronquitis. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007)
- **Ozono Troposférico (O₃):** a nivel del suelo, es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz solar. Este gas es especialmente dañino para la salud humana, causando problemas respiratorios en poblaciones vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas. La exposición al ozono troposférico puede resultar en inflamación y daño a los tejidos pulmonares, reduciendo la función pulmonar y exacerbando enfermedades como el asma. Además, el ozono troposférico contribuye a la degradación de materiales, afectando la durabilidad de edificios y otros bienes materiales. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007)
- **PM₁₀, PM_{2.5} y Black Carbón (BC):** Además, para el análisis de la calidad del aire en Bogotá, se utilizan variables de material particulado como. Según la EPA, el tamaño de las partículas está directamente relacionado con su potencial para causar problemas de salud. Las partículas pequeñas, de menos de 10 micrómetros de diámetro, son las más preocupantes, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones e incluso alcanzar el torrente sanguíneo. La exposición a estas partículas puede afectar tanto a los pulmones como al corazón. (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2024)

Numerosos estudios científicos han vinculado la exposición a la contaminación por partículas con una variedad de problemas de salud, incluyendo muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, infartos de miocardio no mortales, latidos cardíacos irregulares, agravamiento del asma, reducción de la función pulmonar y aumento de síntomas respiratorios, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar. (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2024)

La exposición a la contaminación por partículas tiende a afectar principalmente a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores. Por lo tanto, es un factor crucial a considerar en el análisis de la calidad del aire en Bogotá.

- **Velocidad del Viento (ws):** La velocidad del viento es una de las variables más críticas en estudios de calidad del aire, ya que una mayor velocidad puede dispersar rápidamente los

contaminantes, reduciendo su concentración en un área específica pero potencialmente aumentando la exposición en áreas más amplias. Inversamente, velocidades de viento bajas pueden llevar a una acumulación de contaminantes, elevando la concentración local y exacerbando los efectos nocivos sobre la salud y el ambiente. La dirección y velocidad del viento también son esenciales para la modelización de la dispersión de contaminantes y para entender las fuentes y sumideros de contaminación en áreas urbanas.

- **Presión Barométrica (pressure):** La presión barométrica influye en el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Cambios en la presión pueden alterar la dinámica de la capa límite atmosférica, que a su vez afecta la dispersión vertical de los contaminantes. Una presión alta generalmente se asocia con condiciones meteorológicas más estables, que pueden llevar a una acumulación de contaminantes cerca del suelo, mientras que una presión baja puede indicar condiciones más turbulentas, favoreciendo la dispersión de estos.
- **Temperatura (tmp):** La temperatura afecta las reacciones químicas en la atmósfera, incluyendo la formación de ozono y otros contaminantes secundarios. Temperaturas más altas pueden acelerar estas reacciones, aumentando la concentración de ciertos contaminantes durante episodios de calor. Además, la temperatura también influye en la estabilidad de la atmósfera; un gradiente de temperatura decreciente con la altura puede llevar a una mayor estabilidad atmosférica y menor mezcla vertical, atrapando contaminantes cerca del suelo.
- **Humedad Relativa (rh):** La humedad afecta la capacidad de la atmósfera para dispersar o retener contaminantes. Altos niveles de humedad pueden facilitar la formación de aerosoles y smog fotoquímico, especialmente en combinación con otros contaminantes como NO_x y compuestos orgánicos volátiles. La humedad también juega un papel crucial en la formación de lluvia ácida, al interactuar con contaminantes como el SO₂ y NO_x.
- **Radiación Solar (radsolar):** La radiación solar es un factor clave en la química atmosférica, particularmente en la producción de ozono a nivel del suelo a través de la fotólisis de contaminantes como NO y NO₂. Días soleados pueden llevar a mayores concentraciones de ozono, mientras que condiciones nubladas pueden reducir este efecto.
- **Precipitación (rain):** La precipitación juega un papel crucial en el lavado de los contaminantes atmosféricos, reduciendo su concentración en el aire.

Datos y procesamiento

Dado que las observaciones se registraron en intervalos horarios, el primer paso en el procesamiento consistió en calcular el promedio diario de cada una de las variables seleccionadas para cada una de las 13 bases de datos. Esto permitió transformar los datos de series de tiempo de alta frecuencia en una forma más manejable y representativa de las condiciones promedio diarias.

Posteriormente, las 13 bases de datos fueron consolidadas en una única base de datos. Este paso fue crucial para permitir un análisis integrado y comparativo de las dinámicas de contaminación a lo largo de toda la ciudad. La unificación de los datos facilitó el cálculo de promedios diarios agregados y proporcionó una base robusta para análisis estadísticos y modelado posterior.

Estadísticas descriptivas

Para cada una de las 13 bases de datos, se calcularon estadísticas descriptivas básicas, incluyendo la media, mediana, desviación estándar, valores mínimos y máximos, y rangos intercuartílicos. Estas estadísticas proporcionan una visión inicial del comportamiento de los contaminantes y las condiciones meteorológicas en cada zona de la ciudad, permitiendo identificar patrones, tendencias y posibles anomalías en los datos.

Estadísticas descriptivas por zona

En la zona de Guaymaral, las estadísticas descriptivas muestran que los contaminantes principales presentan niveles variables pero significativos. El PM_{2.5} tiene una media de 14.373 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un pico máximo registrado de 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, el PM₁₀ exhibe un promedio de 28.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un máximo de 69.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, revelando una variabilidad mayor en sus niveles. En cuanto al ozono (O₃), la media es de 11.015 ppb, alcanzando un máximo de 35.133 ppb. El dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un promedio de 9.96 ppb, con un máximo registrado de 27.857 ppb. Respecto al monóxido de carbono (CO), la media es de 0.3265 ppm, con un máximo de 0.8111 ppm. [Ver Salida de la consola 1. Estadísticas descriptivas Guaymaral]

En términos de variables meteorológicas, Guaymaral experimenta temperaturas que oscilan entre 11.64°C y 17.93°C, con una media que indica un clima moderado. La humedad relativa promedio es del 68.66%, con variaciones entre 45.27% y 84.28%, indicando condiciones de humedad moderada a alta. La precipitación media registrada es de 0.115343 mm, con un máximo de 2.183333 mm. La radiación solar promedio es de 160.024 W/m², alcanzando hasta 330.5 W/m² en ciertos momentos, lo que sugiere una exposición solar significativa durante el día. La presión

barométrica media es de 563.9 mmHg, con variaciones mínimas entre 561.7 y 566.2 mmHg, indicando condiciones atmosféricas estables. Finalmente, la velocidad del viento presenta un promedio de 1.2367 m/s, con un máximo registrado de 3.3792 m/s, mostrando condiciones de viento moderadas en la zona.

En la zona de Min Ambiente, los niveles de contaminantes principales muestran una variabilidad considerable. El PM_{2.5} presenta una media de 14.267 µg/m³, alcanzando un máximo de 48.875 µg/m³, indicando fluctuaciones significativas en la concentración de partículas finas en el aire. Por otro lado, el PM₁₀ registra un promedio de 22.239 µg/m³, con un pico máximo de 77.833 µg/m³, lo que sugiere una presencia notable de partículas más gruesas. En cuanto al ozono (O₃), se observa una media de 13.071 ppb, con un máximo de 30.921 ppb, indicando niveles moderados con episodios esporádicos de mayor concentración. El dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un promedio de 15.127 ppb, con un máximo registrado de 40.450 ppb, señalando una presencia significativa de este contaminante, posiblemente asociado al tráfico vehicular. En términos de monóxido de carbono (CO), se registra una media de 0.7371 ppm, con un máximo de 1.7044 ppm. [Ver Salida de la consola 2. Estadísticas descriptivas Min Ambiente]

En cuanto a las variables meteorológicas, la zona de Min Ambiente experimenta una media de precipitación de 0.134503 mm, con un máximo de 2.166667 mm, señalando condiciones de lluvia moderadas, pero con posibles eventos intensos. La velocidad del viento muestra un promedio de 1.2350 m/s, con un máximo registrado de 2.6417 m/s, indicando condiciones de viento relativamente bajas, lo que podría contribuir a la acumulación de contaminantes en la zona.

Es importante destacar que se observa una cantidad significativa de valores faltantes (NA's) en varias variables, como SO₂, black carbon, temperatura, humedad relativa, radiación solar, CO₂ y presión atmosférica.

En la zona de Suba, los niveles de contaminantes principales muestran una variabilidad notable. El PM_{2.5} presenta una media de 15.154 µg/m³, con un máximo registrado de 44.792 µg/m³. Por otro lado, el PM₁₀ registra un promedio de 33.39 µg/m³, alcanzando hasta 80.61 µg/m³ en momentos pico, lo que sugiere presencia de partículas más gruesas. En cuanto al ozono (O₃), se observa una media de 11.183 ppb, con un máximo de 31.488 ppb, indicando niveles moderados con episodios esporádicos de concentraciones elevadas. El dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un promedio de 12.085 ppb, con un máximo registrado de 24.106 ppb, mostrando concentraciones

variables. En términos de monóxido de carbono (CO), se registra una media de 0.4515 ppm, con un máximo de 0.8833 ppm, indicando niveles moderados. [Ver Salida de la consola 3. Estadísticas descriptivas Suba]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura oscila entre 10.67°C y 18.20°C, con una media de 14.76°C, reflejando las típicas variaciones climáticas de Bogotá. La precipitación media es de 0.154056 mm, con un máximo de 3.033333 mm, indicando un patrón variable con algunos eventos de lluvia intensa. La velocidad del viento muestra un promedio de 1.4205 m/s, con un máximo registrado de 3.2792 m/s, lo que sugiere condiciones moderadas que podrían favorecer la dispersión de contaminantes en la zona.

Es importante mencionar que se observan valores faltantes (NA's) en varias variables, como black carbon, humedad relativa, radiación solar y CO₂, lo cual limita el análisis detallado sobre cómo estas condiciones meteorológicas específicas influyen en los niveles de contaminación en Suba.

En la zona de Usaquén en Bogotá, se observan niveles variables de contaminantes atmosféricos y condiciones meteorológicas significativas. El PM_{2.5} presenta una media de 11.6842 µg/m³, con un máximo registrado de 43.6667 µg/m³. Por otro lado, el PM₁₀ muestra un promedio de 22.097 µg/m³, con un pico máximo de 62.809 µg/m³, sugiriendo una presencia notable de partículas más gruesas. En cuanto al ozono (O₃), se registra una media de 17.9344 ppb, alcanzando un máximo de 58.2923 ppb, indicando niveles más altos en comparación con otras zonas y episodios esporádicos de concentraciones elevadas. El dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un promedio de 10.375 ppb, con un máximo registrado de 31.846 ppb, mostrando concentraciones variables, pero generalmente moderadas. En términos de monóxido de carbono (CO), se observa una media de 0.4655 ppm, con un máximo de 1.5791 ppm, indicando niveles moderados. [Ver Salida de la consola 4. Estadísticas descriptivas Usaquén]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura varía entre 11.53°C y 20.5°C, con una media de 14.52°C, reflejando las típicas fluctuaciones climáticas de Bogotá. La precipitación media es de 0.13708 mm, con un máximo registrado de 15.67083 mm, señalando un patrón variable con algunos eventos de lluvia intensa. La velocidad del viento muestra un promedio de 1.2907 m/s, alcanzando un máximo notable de 7.3417 m/s, lo que sugiere condiciones variables que podrían influir en la dispersión de contaminantes en la zona.

Es importante mencionar que se observan valores faltantes (NA's) en varias variables, como black carbon, humedad relativa, radiación solar, CO₂ y presión atmosférica, lo cual limita el análisis detallado sobre cómo estas condiciones meteorológicas específicas afectan los niveles de contaminación en Usaquén.

En la zona de las Ferias en Bogotá, se observan niveles variables de contaminantes atmosféricos y condiciones meteorológicas significativas. El monóxido de carbono (CO) muestra niveles relativamente bajos, con un máximo registrado de 1.59500 ppm. Las partículas gruesas (PM₁₀) exhiben niveles moderados, alcanzando un máximo de 137.144 µg/m³, mientras que las partículas finas (PM_{2.5}) varían de moderadas a altas, con un máximo de 50.833 µg/m³. [Ver Salida de la consola 5. Estadísticas descriptivas Las Ferias]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura oscila entre 11.77°C y 18.79°C, con una media de 14.75°C, reflejando un clima templado característico de la altitud de Bogotá. La humedad relativa varía del 23.50% al 81.25%, con una media de 63.40%, indicando condiciones de humedad moderada. La presión barométrica se mantiene estable alrededor de 564 mmHg, lo cual sugiere una ubicación elevada. La velocidad del viento muestra un promedio de 1.7971 m/s, con máximos registrados de hasta 13.3917 m/s, indicando condiciones variables que pueden influir en la dispersión de contaminantes.

En la zona de San Cristóbal al sur de Bogotá, se observa una variabilidad en los niveles de contaminantes atmosféricos y condiciones meteorológicas significativas. El monóxido de carbono (CO) muestra niveles bajos, con un máximo registrado de 1.2208 ppm. El dióxido de azufre (SO₂) se presenta con datos lógicos, posiblemente indicando presencia o ausencia sin especificar niveles numéricos. Las partículas gruesas (PM₁₀) alcanzaron un máximo de 167.458 µg/m³, mientras que las partículas finas (PM_{2.5}) varían de moderadas a altas, con un máximo de 46.7692 µg/m³. [Ver Salida de la consola 6. Estadísticas descriptivas San Cristóbal]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura varía entre 10.35°C y 16.58°C, con una media de 13.88°C, reflejando un clima templado característico de la altitud de Bogotá. La humedad relativa oscila entre el 37.33% y el 91.00%, con una media de 69.70%, indicando condiciones de humedad moderada a alta. La presión barométrica se presenta como datos lógicos, lo cual es inusual y podría indicar un error en los datos o en su presentación. La velocidad del viento muestra un promedio de 1.3930 m/s, con máximos registrados de hasta 2.7583 m/s.

Otros datos como el ozono (O₃) muestran niveles moderados, con un máximo de 27.637 ppb, y el dióxido de nitrógeno (NO₂) alcanzó un máximo de 32.871 ppb. La radiación solar varía de 0 a 333.0 W/M², indicando condiciones variables de exposición solar.

Es importante destacar la presencia de datos faltantes (NA's) en varias variables, lo que puede sugerir interrupciones en la recolección de datos o problemas con los sensores utilizados para monitorear la calidad del aire y las condiciones meteorológicas en San Cristóbal.

Comparado con la zona de Las Ferias, San Cristóbal parece mostrar niveles ligeramente más bajos de algunos contaminantes como PM_{2.5} y NO₂, pero niveles similares o incluso más altos de otros como PM₁₀. Las temperaturas son comparables, aunque San Cristóbal parece tener una humedad relativa ligeramente mayor y vientos menos intensos, lo que puede influir en la dispersión de contaminantes en la zona.

En la zona de Tunal, ubicada en el sur de Bogotá, el monóxido de carbono (CO) tiene un promedio de 0.8826 ppm, con un máximo registrado de 1.7797 ppm. El dióxido de azufre (SO₂) presenta un promedio de 2.058 ppb, alcanzando un máximo de 5.707 ppb. Las partículas gruesas (PM₁₀) muestran un promedio de 37.107 µg/m³, con un máximo de 109.625 µg/m³, mientras que las partículas finas (PM_{2.5}) tienen un promedio de 17.625 µg/m³ y un máximo de 58.000 µg/m³. El ozono (O₃) tiene un promedio de 13.820 ppb, con un máximo de 35.837 ppb, y el dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un promedio de 13.597 ppb, con un máximo de 35.829 ppb. El carbono negro (BC) muestra un promedio de 4.573 µg/m³, con un máximo de 13.287 µg/m³. [Ver Salida de la consola 7. Estadísticas descriptivas Tunal]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura promedio es de 15.10°C, con un rango que va desde 8.85°C hasta 18.87°C. La humedad relativa tiene un promedio de 62.81%, oscilando entre el 31.61% y el 81.66%. La presión barométrica promedio es de 563.3 mmHg, con variaciones entre 561.2 y 566.0 mmHg, reflejando la altitud de Bogotá. La velocidad del viento presenta un promedio de 1.2106 m/s, con un máximo registrado de 2.1375 m/s. La radiación solar promedio es de 153.1 W/m², con un pico máximo de 296.2 W/m², mostrando variaciones significativas en la exposición solar.

Los datos indican que la zona de Tunal experimenta niveles moderados de contaminación atmosférica, con episodios esporádicos de alta contaminación, especialmente para PM₁₀ y PM_{2.5}.

Las condiciones meteorológicas muestran un clima templado con variaciones notables en la humedad y la radiación solar, mientras que la presión barométrica confirma la altitud de la ciudad de Bogotá.

En la zona de Bolivia, ubicada al oeste de Bogotá, se observan niveles variados de contaminantes atmosféricos y limitaciones en la presentación de variables meteorológicas. El PM_{2.5} presenta un promedio de 15.467 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango que va desde 2.454 hasta 42.767 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El monóxido de carbono (CO) tiene un promedio de 0.4330 ppm, con un máximo registrado de 1.6250 ppm. El dióxido de azufre (SO₂) muestra un promedio de 1.9332 ppb, alcanzando un máximo considerable de 44.8792 ppb. Las partículas gruesas (PM₁₀) tienen un promedio de 34.830 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de 90.392 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El ozono (O₃) presenta un promedio de 6.37736 ppb, con un máximo de 17.15000 ppb, mientras que el dióxido de nitrógeno (NO₂) tiene un promedio de 18.579 ppb, con un máximo de 30.350 ppb. [Ver Salida de la consola 8. Estadísticas descriptivas Bolivia]

En cuanto a las variables meteorológicas, como temperatura (tmp), humedad relativa (rh), presión barométrica (pressure), velocidad del viento (ws) y radiación solar (radsolar), se presentan como (NAs), lo cual indica una falta de instrumentos meteorológicos para la recolección y el procesamiento de datos en la estación de monitoreo de Bolivia. Esta limitación dificulta la interpretación precisa de las condiciones meteorológicas en la zona.

En comparación con otras zonas analizadas, los niveles de PM_{2.5} son similares a los de Tunal y ligeramente inferiores a los de Las Ferias. Sin embargo, los niveles de NO₂ son más altos que en las otras zonas estudiadas, y el ozono (O₃) muestra niveles más bajos en Bolivia.

En la zona de Carvajal, ubicada al oeste de Bogotá, se registran niveles significativos de contaminantes atmosféricos y limitaciones en la presentación de variables meteorológicas. El PM_{2.5} presenta un promedio de 34.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores que oscilan entre 10.50 y 81.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las partículas gruesas (PM₁₀) tienen un promedio de 70.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando un máximo de 140.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El monóxido de carbono (CO) muestra un promedio de 1.9090 ppm, con un máximo registrado de 4.3833 ppm. El dióxido de azufre (SO₂) presenta un promedio de 5.3324 ppb, alcanzando un máximo de 20.5250 ppb. El ozono (O₃) tiene un promedio de 6.440 ppb, con un máximo de 17.908 ppb, mientras que el dióxido de nitrógeno (NO₂) registra un promedio de 24.50 ppb, con un máximo de 42.20 ppb. [Ver Salida de la consola 9. Estadísticas descriptivas Carvajal]

En cuanto a las variables meteorológicas, la temperatura promedio es de 16.09°C, con un rango entre 12.67°C y 19.35°C. La velocidad del viento promedio es de 1.9635 m/s, con un máximo de 3.5208 m/s. Sin embargo, la humedad relativa (rh), presión barométrica (pressure) y radiación solar (radsolar) se presentan como (NAs), dado que la estación de monitoreo no mide, lo cual limita su interpretación y análisis.

Observando los patrones de contaminación, se destaca que los niveles de PM2.5 y PM10 son altos, indicando una significativa contaminación por partículas en la zona de Carvajal.

Comparando con otras zonas analizadas, Carvajal presenta niveles significativamente más altos de PM2.5 y PM10 en comparación con Las Ferias, Tunal y Bolivia. Asimismo, los niveles de CO son más elevados que en las otras estaciones evaluadas. Los niveles de NO2 son similares a los de Bolivia, pero más altos que en Las Ferias y Tunal.

La calidad del aire en la zona de Carvajal parece estar más deteriorada, posiblemente debido a una mayor actividad industrial o tráfico vehicular en el área. La falta de datos numéricos para algunas variables meteorológicas limita un análisis más detallado de las condiciones ambientales, aunque se observa una velocidad del viento ligeramente mayor que podría influir en la dispersión de contaminantes.

En la zona de Fontibón, ubicada al oeste de Bogotá, se observan variaciones significativas en los niveles de contaminantes atmosféricos y condiciones meteorológicas. El PM2.5 tiene un promedio de 19.00 µg/m³. Sin embargo, se registró un máximo de 55.75 µg/m³, lo cual indica episodios de alta concentración que podrían afectar la calidad del aire durante esos períodos. El mínimo de 0.96 µg/m³ refleja condiciones relativamente limpias en momentos de baja contaminación. El monóxido de carbono (CO) muestra un promedio de 0.54212 ppm, con un máximo de 1.24583 ppm y un mínimo de 0.05556 ppm. El dióxido de azufre (SO2) tiene un promedio de 1.6310 ppb, con un máximo de 7.5792 ppb y un mínimo de 0.1286 ppb. Los valores máximos sugieren variabilidad en la concentración de SO2, posiblemente influenciada por factores como la actividad industrial o la combustión de combustibles fósiles. El ozono (O3) presenta un promedio de 16.68 ppb, con un máximo de 48.16 ppb. Aunque el mínimo registrado es 0.00 ppb, lo cual es inusual y podría indicar períodos sin presencia detectable de ozono. [Ver Salida de la consola 10. Estadísticas descriptivas Fontibón]

En términos de condiciones meteorológicas, la temperatura promedio es de 15.45°C, con un rango entre -12.80°C (un valor inusualmente bajo, posiblemente un error de medición) y 18.38°C. La humedad relativa varía entre un mínimo del 30.29% y un máximo del 86.62%, reflejando cambios significativos en la humedad ambiental. La precipitación promedio es baja, con 0.1378 mm, y los datos de radiación solar no fueron proporcionados, mientras que la presión barométrica promedio es de 564.6 mmHg, indicando condiciones estables acordes con la altitud de Bogotá.

En la zona de Kennedy, ubicada al oeste de Bogotá, los datos revelan condiciones ambientales que presentan tanto desafíos como características típicas de la ciudad. El PM_{2.5}, que indica la concentración de material particulado fino, tiene un promedio de 21.300 µg/m³. Este valor promedio es significativamente alto y sugiere una exposición considerable a partículas finas en la zona. El máximo registrado alcanza los 56.842 µg/m³, indicando episodios de alta contaminación que pueden afectar la calidad del aire durante períodos específicos. Por otro lado, el mínimo de 1.875 µg/m³ refleja condiciones más limpias en momentos de menor contaminación. El monóxido de carbono (CO) muestra un promedio de 0.8361 ppm, con un máximo de 2.05750 ppm y un mínimo de 0.06667 ppm. Estos niveles indican presencia moderada de CO, con algunos picos que podrían estar asociados con el tráfico vehicular u otras fuentes locales de emisión. El dióxido de azufre (SO₂) tiene un promedio de 2.3020 ppb, con un máximo de 9.0435 ppb y un mínimo de 0.1565 ppb. Los valores máximos muestran variabilidad en la concentración de SO₂, posiblemente influenciada por actividades industriales o la combustión de combustibles. El ozono (O₃) presenta un promedio de 13.651 ppb, con un máximo de 39.608 ppb y un mínimo de 1.562 ppb. Aunque el ozono es un contaminante secundario que se forma por reacciones químicas en presencia de luz solar y es menos preocupante que las partículas finas, los picos altos pueden impactar la salud respiratoria durante períodos prolongados de exposición. [Ver Salida de la consola 11. Estadísticas descriptivas Kennedy]

En cuanto a las condiciones meteorológicas, la temperatura promedio es de 15.69°C, con un rango entre 9.05°C y 20.16°C. Estas variaciones son típicas de Bogotá y reflejan cambios estacionales y diurnos normales. La humedad relativa varía considerablemente, con un promedio de 63.79% y valores que oscilan entre 30.88% y 82.50%, lo cual es común en áreas urbanas con influencias climáticas variadas. La precipitación promedio es baja, con 0.0614 mm, y la radiación solar presenta un promedio de 143.04 W/m², con picos que alcanzan los 354.50 W/m².

En la zona de Puente Aranda, ubicada al oeste de Bogotá, el PM_{2.5}, que indica la concentración de material particulado fino, tiene un promedio de 16.730 µg/m³. Este valor promedio sugiere una exposición moderada a partículas finas en la zona, con un máximo registrado de 48.429 µg/m³ y un mínimo de 1.279 µg/m³. Estos datos indican variaciones significativas en la calidad del aire, con episodios de contaminación que pueden afectar la salud pública durante los picos más altos de concentración. El monóxido de carbono (CO) muestra un promedio de 0.7373 ppm, con un máximo de 3.7542 ppm y un mínimo de 0.1042 ppm. Estos niveles sugieren presencia moderada de CO en el área, con algunos. El dióxido de azufre (SO₂) tiene un promedio de 1.2878 ppb, con un máximo de 4.7571 ppb y un mínimo de 0.2583 ppb. Aunque los niveles son relativamente bajos en promedio. El ozono (O₃) presenta un promedio de 8.5172 ppb, con un máximo de 27.1375 ppb y un mínimo de 0.4143 ppb. [Ver Salida de la consola 12. Estadísticas descriptivas Puente Aranda]

En términos de condiciones meteorológicas, la temperatura promedio es de 15.46°C, con máximos y mínimos que reflejan las variaciones diurnas y estacionales típicas de Bogotá. La humedad relativa es alta en promedio, alcanzando un máximo del 96.79%, lo cual puede ser común en áreas urbanas que pueden experimentar variaciones climáticas rápidas. La radiación solar muestra un promedio considerable de 165.926 W/m², con picos que alcanzan los 313.708 W/m².

En el Centro de Alto Rendimiento, ubicado en el centro de Bogotá, el PM_{2.5} tiene un promedio de 14.191 µg/m³. Este valor promedio sugiere una exposición moderada a material particulado fino, con un máximo registrado de 47.611 µg/m³ y un mínimo de 0.700 µg/m³. El monóxido de carbono (CO) muestra un promedio de 0.5384 ppm, con un máximo de 1.5833 ppm y un mínimo de 0.1167 ppm. Estos niveles indican una presencia moderada de CO en el área, posiblemente asociada con el tráfico vehicular y otras fuentes de combustión urbana. El dióxido de azufre (SO₂) tiene un promedio de 0.9686 ppb, con un máximo de 6.5667 ppb y un mínimo de 0.04286 ppb. Aunque los niveles son relativamente bajos en promedio, los picos altos pueden estar relacionados con actividades industriales o locales específicas. El ozono (O₃) presenta un promedio de 12.847 ppb, con un máximo de 34.083 ppb y un mínimo de 2.567 ppb. El PM₁₀, que mide partículas más gruesas, tiene un promedio de 24.133 µg/m³, con un máximo de 66.063 µg/m³ y un mínimo de 1.956 µg/m³. [Ver Salida de la consola 13. Estadísticas descriptivas Centro de Alto Rendimiento]

En términos de condiciones meteorológicas, la temperatura promedio es de 14.920°C, con máximos y mínimos típicos de Bogotá que reflejan variaciones diurnas y estacionales. La humedad

relativa es alta en promedio (68.45%), alcanzando un máximo del 86.83%, lo cual es común en áreas urbanas densamente pobladas. La radiación solar muestra un promedio de 150.03 W/m², con picos que alcanzan los 357.29 W/m². Esto indica una exposición adecuada al sol, con variaciones normales a lo largo del día que pueden influir en la formación de ozono y otros procesos atmosféricos.

Finalmente, los niveles de CO₂ son notables, con un promedio de 509.5 ppm y un máximo de 627.2 ppm, lo cual sugiere una influencia significativa de actividades urbanas en la zona.

Estadísticas descriptivas de Bogotá

Se examinan estadísticas descriptivas de contaminantes clave como PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, CO, SO₂ y Black Carbon (BC), así como variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento, presión barométrica y radiación solar. Se realizó un análisis de estos resultados. [Ver Salida de la consola 14. Estadísticas descriptivas Bogotá]

- **PM_{2.5} (µg/m³):** El promedio de PM_{2.5} es de 16.57 µg/m³, lo cual está por encima de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que sugieren un límite de 15 µg/m³ para la media diaria (World Health Organization, 2021). Esto indica una preocupación constante por la calidad del aire en Bogotá, con niveles que podrían tener efectos adversos en la salud de la población. El valor máximo registrado es de 48.88 µg/m³, un nivel alarmante que podría exacerbar problemas respiratorios y cardiovasculares, mientras que el mínimo es de 3.23 µg/m³, lo que muestra una variabilidad considerable en los niveles de contaminación por partículas finas.
- **PM₁₀ (µg/m³):** El PM₁₀ presenta un promedio de 31.90 µg/m³, superando el límite anual recomendado por la OMS de 20 µg/m³. Esto subraya la presencia de una contaminación significativa por partículas más grandes que también pueden tener efectos perjudiciales en la salud. El valor máximo de 77.775 µg/m³ y el mínimo de 6.597 µg/m³ reflejan picos de contaminación que podrían estar relacionados con episodios específicos, como alta actividad vehicular o condiciones meteorológicas desfavorables.
- **O₃ (ppb):** El ozono (O₃) troposférico muestra un promedio de 12.136 ppb, con un rango que va desde 3.420 ppb hasta un máximo de 27.848 ppb. Aunque los niveles promedio de ozono son moderados, los picos máximos podrían ser preocupantes, especialmente durante

episodios de alta radiación solar que facilitan la formación de ozono troposférico, un contaminante secundario conocido por sus efectos negativos en la salud respiratoria.

- **NO₂ (ppb):** El dióxido de nitrógeno (NO₂) tiene un promedio de 15.10 ppb, con un valor máximo de 29.46 ppb y un mínimo de 4.36 ppb. Estos niveles indican una exposición moderada a este contaminante, principalmente generado probablemente por las emisiones de vehículos y actividades industriales. Los picos altos sugieren la necesidad de estrategias para mitigar la contaminación vehicular, especialmente en áreas de alta congestión.
- **CO (ppm):** El monóxido de carbono (CO) presenta un promedio de 0.6380 ppm, con un valor máximo de 1.9417 ppm y un mínimo de 0.2417 ppm. Estos niveles son relativamente bajos y dentro de los límites de seguridad establecidos, lo cual es positivo en términos de exposición a este gas tóxico. Sin embargo, los picos podrían indicar áreas locales de alta emisión que requieren monitoreo.
- **SO₂ (ppb):** El dióxido de azufre (SO₂) tiene un promedio de 1.7835 ppb, con un rango de 0.5799 ppb a 8.0799 ppb. Los niveles bajos de SO₂ son favorables, ya que este gas puede contribuir a problemas respiratorios y la formación de lluvia ácida. La presencia de valores máximos relativamente bajos sugiere una fuente de emisiones controlada o limitada.
- **Black Carbon (µg/m³):** El black carbon tiene un promedio de 3.769 µg/m³, con un máximo de 11.160 µg/m³ y un mínimo de 1.113 µg/m³. Esta variable muestra niveles moderados de contaminación por material carbonoso, aunque presenta 1002 datos faltantes (NAs), puesto que se comenzó a tomar en 2023. La falta de datos puede afectar la precisión del análisis.
- **Temperatura (°C):** La temperatura promedio es de 15.04°C, con un rango de -12.16°C a 34.79°C. La gran variabilidad, incluyendo extremos inusuales. Las temperaturas extremas podrían influir en la formación y dispersión de contaminantes.
- **Humedad Relativa (%):** La humedad relativa promedio es de 66.88%, con un rango de 33.70% a 85.49%. Estos niveles moderados a altos son típicos de Bogotá y pueden influir en la dispersión y concentración de contaminantes, especialmente partículas.
- **Precipitación (mm):** La precipitación promedio es de 0.13469 mm, con un rango de 0.000000 mm a 1.823333 mm. La variabilidad en la precipitación refleja períodos secos y lluviosos, lo que puede afectar la eliminación de contaminantes atmosféricos a través de la deposición húmeda.

- **Velocidad del Viento (m/s):** La velocidad del viento promedio es de 1.4522 m/s, con un máximo de 2.4644 m/s y un mínimo de 0.6051 m/s. Una velocidad del viento moderada puede influir en la dispersión de contaminantes, mitigando la acumulación en áreas específicas.
- **Presión Barométrica (mmHg):** La presión barométrica promedio es de 563.8 mmHg, con un rango de 561.6 mmHg a 566.0 mmHg. Estos valores son consistentes con la altitud de Bogotá y pueden tener implicaciones en la formación y dispersión de contaminantes.
- **Radiación Solar (W/m²):** La radiación solar promedio es de 155.79 W/m², con un rango de 36.43 W/m² a 283.30 W/m². La variabilidad en la radiación solar refleja los patrones diurnos y estacionales, que pueden influir en la formación de ozono troposférico y otros procesos fotoquímicos.

En un primer análisis, los datos indican problemas de contaminación del aire en Bogotá, especialmente con partículas finas (PM2.5 y PM10) y otros contaminantes como NO₂ y O₃. Las condiciones meteorológicas, como la velocidad del viento moderada y la variabilidad en la precipitación, pueden influir en la acumulación y dispersión de contaminantes. Por lo cual, se realizó un análisis más detallado de las tendencias temporales y la relación entre variables meteorológicas y contaminantes para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y control de la contaminación atmosférica en Bogotá.

Proceso de Estequiometría

Los datos referentes a la concentración de diversos contaminantes atmosféricos como ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) fueron obtenidos de la RMCAB (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, 2024), sin embargo, estos datos se encuentran inicialmente expresados en partes por billón (ppb). Sin embargo, para realizar una comparación adecuada con los estándares de calidad del aire recomendados por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2021), que están expresados en microgramos por metro cúbico (µg/m³), como se puede observar en Tabla 1. Niveles de AQG recomendados, fue necesario convertir las unidades de medida de los contaminantes de ppb a µg/m³ mediante procedimientos de estequiometría.

Contaminante	Tiempo promedio	Nivel AQG (24 h)	Nivel AQG (Anual)
PM _{2.5} , $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	24 horas	15	5
PM ₁₀ , $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	24 horas	45	15
O ₃ , $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	8 horas	100	60
NO ₂ , $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	24 horas	25	10
SO ₂ , $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	24 horas	40	40
CO, $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$	24 horas	4	4

Tabla 1. Niveles de AQG recomendados (World Health Organization, 2021)

La conversión de las unidades se llevó a cabo utilizando el siguiente proceso para los contaminantes ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂):

1. Fundamento Teórico de la Conversión de Unidades

La conversión de unidades de los contaminantes gaseosos de partes por billón (ppb) a microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) se fundamenta en la ley de los gases ideales, que relaciona la presión, el volumen y la temperatura. Dicha ley establece que $P * V = n * R * T$, donde:

- P es la presión atmosférica en atmósferas (atm),
- V es el volumen en litros (L),
- n es la cantidad de sustancia en moles,
- R es la constante universal de los gases ideales, $0.082 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$,
- T es la temperatura en Kelvin (K)

A partir de esta relación, el volumen se expresa como:

$$V = \frac{n * R * T}{P}$$

2. Conversión de la Presión Barométrica a Atmósferas

Aunque los datos obtenidos están en presión barométrica (mmHg), la fórmula de los gases ideales requiere la presión en atmósferas. Por lo tanto, es esencial convertir estos valores utilizando la equivalencia entre mmHg y atm:

$$P (\text{atm}) = \frac{P (\text{mmHg})}{760 (\text{mmHg})}$$

donde 760 mmHg equivale a 1 atm.

3. Ajuste de la Temperatura a Escala Kelvin

La fórmula de los gases ideales también requiere que la temperatura esté en grados Kelvin.

Para convertir grados Celsius (C) a Kelvin (K), se utiliza la siguiente relación:

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$

4. Cálculo de Concentraciones en ppb

Para calcular la concentración de contaminantes en partes por billón, se utiliza la siguiente relación, considerando la densidad y el peso molecular de cada gas:

$$ppb = \frac{\text{partes de contaminante}_i}{10^9 \text{ partes de aire}}$$

5. Cálculo de la masa molar

El cálculo de la masa molar es fundamental para la conversión de las concentraciones de contaminantes de partes por billón (ppb) a microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se inicia con el ozono (O_3), que consiste en tres átomos de oxígeno. Dado que la masa atómica del oxígeno es de 16 gramos por mol, la masa molar del O_3 se calcula como sigue:

$$\text{Masa molar de } \text{O}_3 = 3 \text{ átomos} * \frac{16 \text{ g}}{\text{mol}} = \frac{48 \text{ g}}{\text{mol}}$$

De manera similar, calculamos la masa molar para los siguientes gases:

- **Dióxido de nitrógeno (NO_2):** Compuesto por un átomo de nitrógeno (14 g/mol) y dos átomos de oxígeno (16 g/mol cada uno), resultando en:

$$\text{Masa molar de } \text{NO}_2 = \frac{14 \text{ g}}{\text{mol}} + 2 * \frac{16 \text{ g}}{\text{mol}} = \frac{46 \text{ g}}{\text{mol}}$$

- **Dióxido de azufre (SO_2):** Compuesto por un átomo de azufre (32 g/mol) y dos átomos de oxígeno (16 g/mol cada uno), resultando en:

$$\text{Masa molar de } \text{SO}_2 = \frac{32 \text{ g}}{\text{mol}} + 2 \times \frac{16 \text{ g}}{\text{mol}} = \frac{64 \text{ g}}{\text{mol}}$$

6. Conversión de unidades

Para realizar la conversión de las concentraciones de contaminantes de ppb a $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se utiliza la siguiente relación que incorpora la ley de los gases ideales y los ajustes de las unidades de medida:

$$V = \frac{n * R * T}{P} = \frac{1 (\text{mol}) * 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} * T(^{\circ}K)}{P (\text{atm})} = V (\text{L})$$

Luego se realiza la conversión de unidades:

$$Contaminante_i(ppb) = \frac{Contaminante_i(m^3_{contaminante_i})}{10^9(m^3_{aire})} * \frac{1000(L)}{1(m^3)} * \frac{1(mol)}{V(L)} * \frac{Masa\ molar_{contaminante_i}(g)}{(mol)} * \frac{10^6 \mu g}{1(g)}$$

$$Contaminante_i(ppb) = Contaminante_i\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$$

Adicionalmente, los datos nos proporcionan los niveles de los contaminantes CO y CO2 están en partes por millón (ppm). Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un proceso similar al descrito anteriormente, donde para calcular la concentración de contaminantes en partes por millón, se utiliza la siguiente relación, considerando la densidad y el peso molecular de cada gas:

$$ppb = \frac{partes\ de\ contaminante_i}{10^6 partes\ de\ aire}$$

Además, de realizar el cálculo de la masa molar:

- **Monóxido de carbono (CO):** Formado por un átomo de carbono (12 g/mol) y un átomo de oxígeno (16 g/mol), resultando en:

$$Masa\ molar\ de\ CO = \frac{12\ g}{mol} + \frac{16\ g}{mol} = \frac{28\ g}{mol}$$

- **El dióxido de carbono (CO2):** Formado por un átomo de carbono (12 g/mol) y dos átomos de oxígeno (16 g/mol), resultando en:

$$Masa\ molar\ de\ CO_2 = \frac{12\ g}{mol} + 2 * \frac{16\ g}{mol} = \frac{44\ g}{mol}$$

Una vez convertidas las concentraciones de los contaminantes a $\mu g/m^3$ o mg/m^3 , se puede proceder a comparar estos valores con los límites establecidos por la OMS para determinar si los niveles de contaminación superan los estándares de calidad del aire, lo cual indicaría un problema ambiental significativo.

Análisis exploratorio de la correlación entre las variables

El análisis de correlación entre las variables es un paso fundamental en la comprensión de las interrelaciones y dinámicas dentro del conjunto de datos ambientales y de calidad del aire. La matriz de correlación de Pearson se utiliza para cuantificar la intensidad y la dirección de las relaciones lineales entre las variables. Esta herramienta estadística permite identificar asociaciones potenciales que pueden guiar posteriores análisis y modelos econométricos. El coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una fuerte

correlación positiva, valores cercanos a -1 una fuerte correlación negativa, y valores cercanos a 0 una correlación débil o inexistente. En este estudio, la matriz de correlación ayudará a entender cómo se relacionan entre sí diversos contaminantes y factores meteorológicos, lo cual es crucial para el desarrollo del modelo Probit.

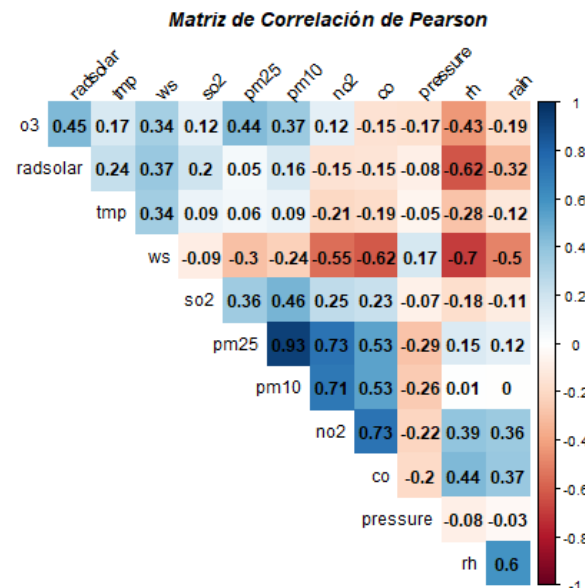


Ilustración 3. Matriz de correlación de Pearson (fuente: autor propio)

Al observar la matriz de correlación, se identificaron varias relaciones significativas entre las variables de estudio.

1. Correlaciones fuertes positivas

- PM2.5 y PM10 (0.93): Se encontró una fuerte relación positiva entre las partículas finas (PM2.5) y las partículas más gruesas (PM10). Esta alta correlación es esperada, ya que ambas variables son medidas de contaminación del aire por partículas, y es común que coexistan en la atmósfera debido a fuentes de emisión similares.
- NO2 y PM10 (0.71), NO2 y PM2.5 (0.73): Estas correlaciones indican una fuerte asociación entre el dióxido de nitrógeno y las partículas en suspensión. Esta relación probablemente se deba a fuentes comunes de emisión, como el tráfico vehicular, que es una fuente significativa tanto de NO2 como de partículas.

2. Correlaciones moderadas positivas

- SO₂ y PM_{2.5} (0.46), SO₂ y PM₁₀ (0.46): Se observa una relación moderada entre el dióxido de azufre y las partículas en suspensión. Esta correlación sugiere que ambas variables pueden tener fuentes industriales comunes, como la quema de combustibles fósiles en plantas industriales.
- O₃ y radiación solar (0.45): Esta correlación es esperada, ya que la radiación solar contribuye a la formación de ozono troposférico a través de reacciones fotoquímicas.

3. Correlaciones negativas notables

- Velocidad del viento (WS) y PM₁₀ (-0.55), WS y PM_{2.5} (-0.55): La velocidad del viento muestra una correlación negativa significativa con las partículas en suspensión, lo que sugiere que mayores velocidades de viento ayudan a dispersar estas partículas, reduciendo su concentración en el aire.
- WS y NO₂ (-0.62): De manera similar, la velocidad del viento también dispersa el dióxido de nitrógeno, resultando en una correlación negativa con esta variable.

4. Correlaciones débiles o no significativas:

- Muchas variables muestran correlaciones débiles entre sí (valores cercanos a 0), indicando la ausencia de relaciones lineales fuertes. Por ejemplo, la temperatura (tmp) tiene correlaciones débiles con la mayoría de los contaminantes, exceptuando una correlación negativa débil con SO₂ (-0.21).
- La presión atmosférica muestra correlaciones débiles con la mayoría de las variables, sugiriendo que no es un factor determinante en los niveles de contaminación en este conjunto de datos.
- La humedad relativa (rh) presenta una correlación moderada positiva con el monóxido de carbono (CO) (0.6), lo cual podría indicar que condiciones más húmedas están asociadas con mayores niveles de CO, posiblemente debido a cambios en la dispersión y reactividad química en el aire.

La matriz de correlación revela patrones importantes en la interrelación de contaminantes atmosféricos y factores meteorológicos. Las correlaciones más fuertes se observan entre diferentes tipos de partículas y entre NO₂ y partículas, mientras que la velocidad del viento muestra un efecto dispersor significativo. Estos resultados son valiosos para comprender la dinámica de la contaminación del aire.

Análisis de Contaminantes Atmosféricos

Un objetivo del presente estudio es evaluar la calidad del aire en Bogotá, con especial atención en cómo ciertos contaminantes atmosféricos exceden los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para este propósito, se han analizado datos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2021 y el año 2024. Este análisis incluye la medición de varios contaminantes como el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas finas PM_{2.5} y PM₁₀, dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), y carbono negro (BC), aunque este último no cuenta con un límite establecido por la OMS.

Para visualizar y analizar los niveles de contaminantes, se realizaron gráficos de series de tiempo que muestran las concentraciones diarias de cada contaminante. En cada gráfico, se ha trazado una línea roja representativa del límite máximo recomendado por la OMS para cada contaminante, excepto para el BC y el dióxido de carbono (CO₂), donde el CO₂ no cuenta con un límite OMS establecido y para el BC, el interés reside en observar su comportamiento a lo largo del tiempo. Cabe destacar que los datos de CO₂ se dejaron de recopilar a comienzos de 2022 y los datos de BC están disponibles solo desde mediados de 2023.

- **Análisis del Monóxido de Carbono (CO) desde 2021 hasta 2024**

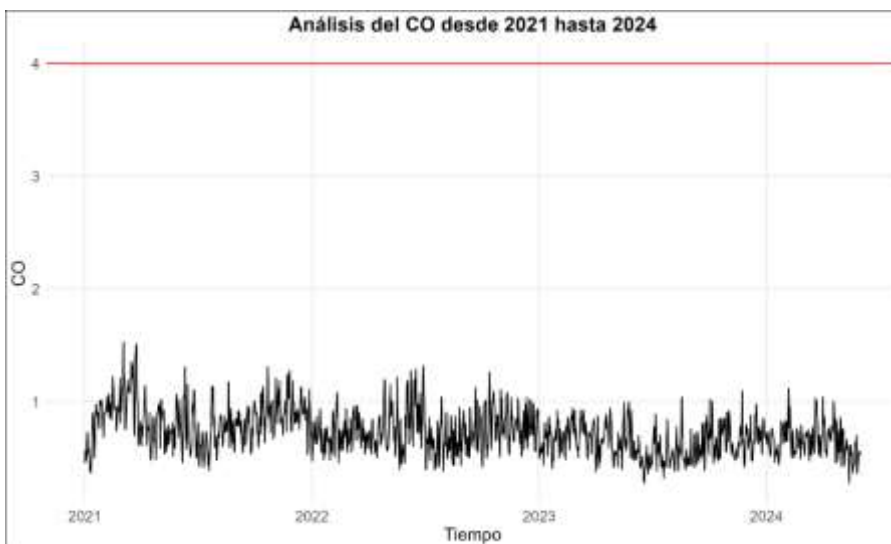


Ilustración 4. Análisis del CO desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

En la gráfica de CO, observamos que los niveles se mantienen por debajo del umbral de la OMS, fijado en $4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Esto indica un control general

efectivo de este contaminante en el periodo analizado, aunque existen algunos picos esporádicos que sugieren incidentes de corta duración con niveles elevados.

- **Análisis del Dióxido de Nitrógeno (NO₂) desde 2021 hasta 2024**

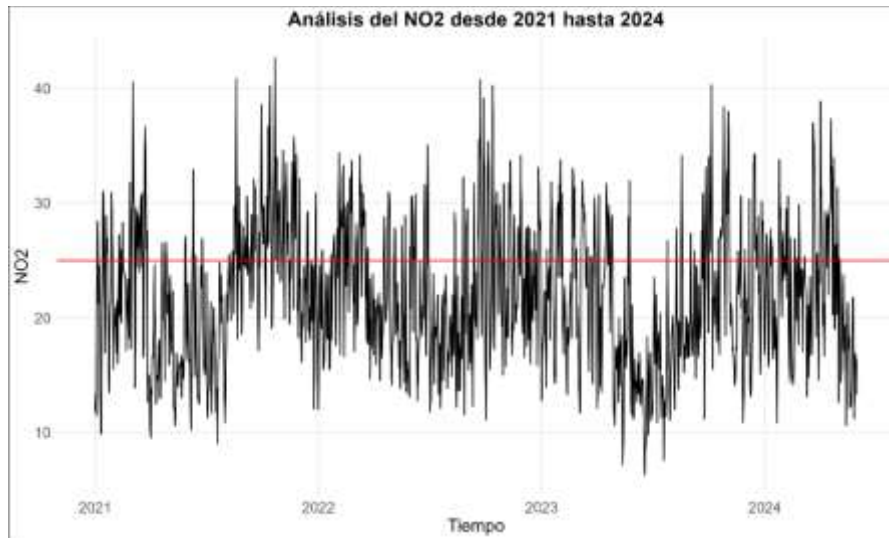


Ilustración 5. Análisis del NO₂ desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

La gráfica del NO₂ muestra numerosos picos que superan el límite establecido por la OMS de $25 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Este patrón sugiere episodios recurrentes de alta contaminación por NO₂ en Bogotá, lo que podría conllevar a graves problemas de salud pública relacionados con este contaminante.

- **Análisis del PM_{2.5} desde 2021 hasta 2024**

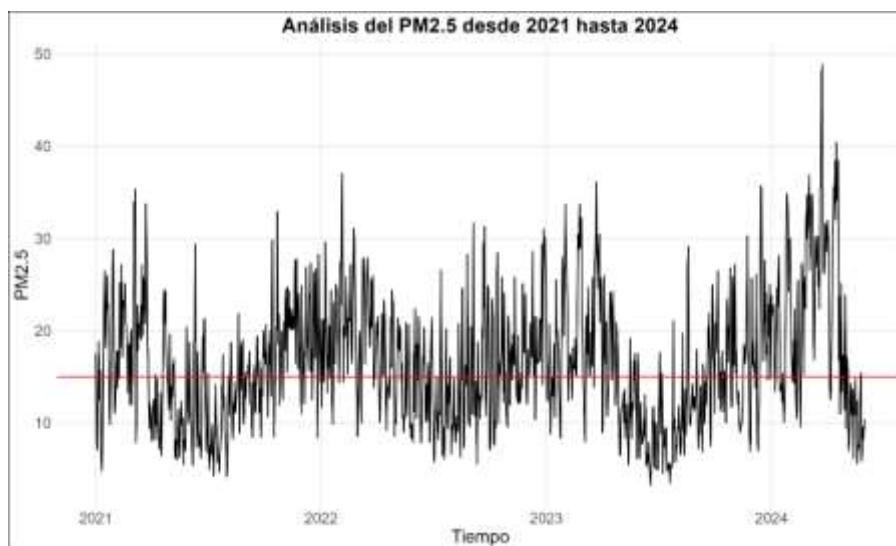


Ilustración 6. Análisis del PM_{2.5} desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

En la serie temporal de PM2.5, se aprecia una variabilidad significativa, con múltiples instancias donde las concentraciones exceden el límite de la OMS de $15 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Esto refleja la presencia continua de partículas finas en el aire de Bogotá, posiblemente atribuible a fuentes como la combustión de vehículos y actividades industriales.

- **Análisis del PM10 desde 2021 hasta 2024**

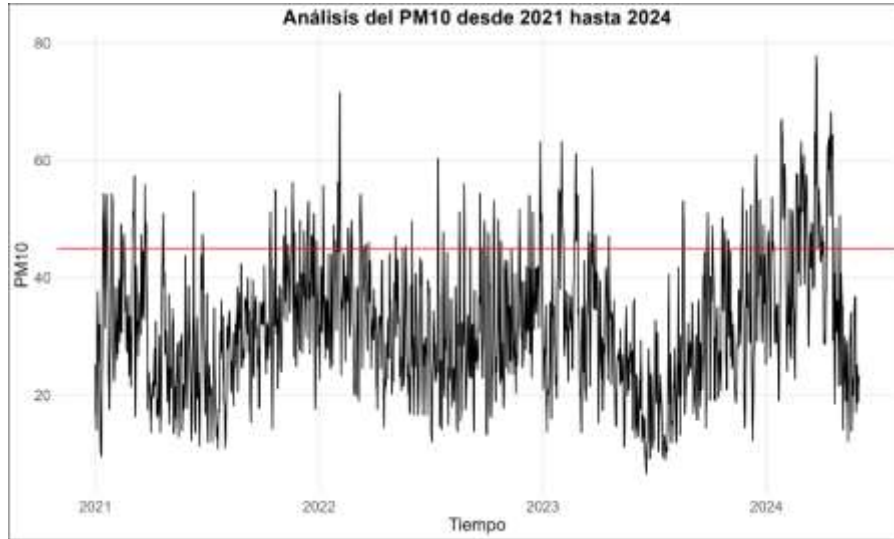


Ilustración 7. Análisis del PM10 desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

Similar al PM2.5, el PM10 también exhibe fluctuaciones significativas y frecuentemente sobrepasa el límite de la OMS de $45 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Esto resalta la problemática persistente de partículas más gruesas en el ambiente, que pueden provenir de la construcción, el tráfico, y otras fuentes de polvo.

- **Análisis del Dióxido de Azufre (SO₂) desde 2021 hasta 2024**

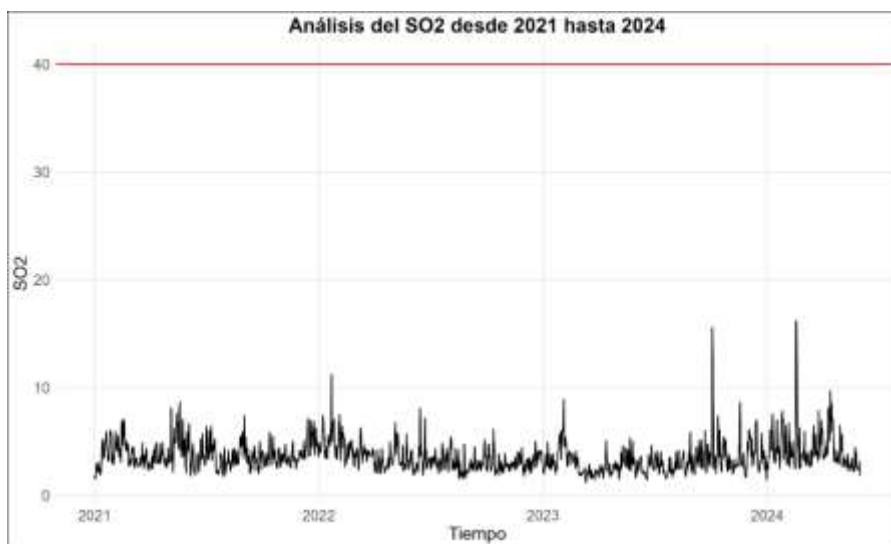


Ilustración 8. Análisis del SO₂ desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

El SO₂ muestra niveles bajos y controlados, permaneciendo en por debajo del límite de la OMS de $40 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Los picos observados pueden estar vinculados a actividades industriales específicas y son eventos relativamente aislados.

- **Análisis del Ozono (O₃) desde 2021 hasta 2024**

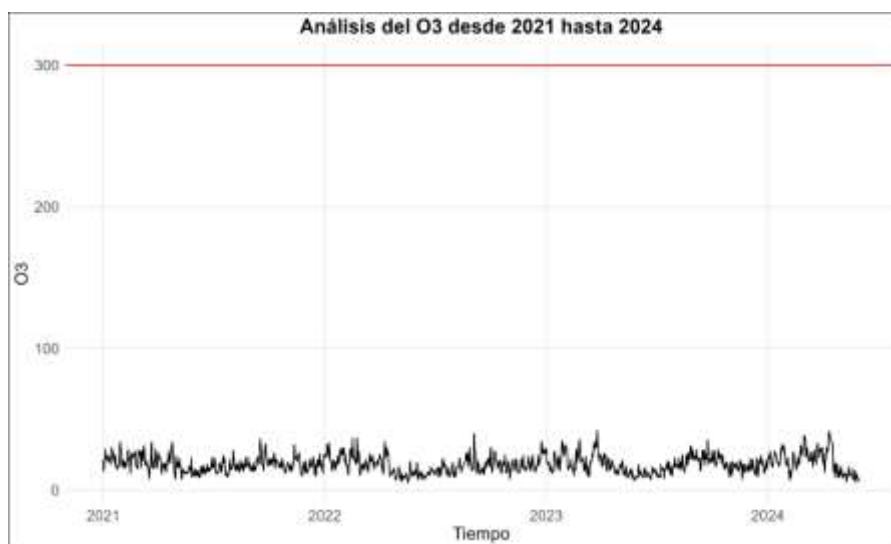


Ilustración 9. Análisis del O₃ desde 2021 hasta 2024 (fuente: autor propio)

La gráfica del O₃ destaca por mantenerse siempre por debajo del límite de la OMS de $300 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ (World Health Organization, 2021). Esto sugiere que, aunque el ozono puede ser un

contaminante preocupante en muchos entornos urbanos, no parece ser un problema mayor en términos de exceder las directrices de la OMS en Bogotá durante el periodo estudiado.

- **Análisis del Dióxido de Carbono (CO₂) desde 2021 hasta comienzos de 2022**

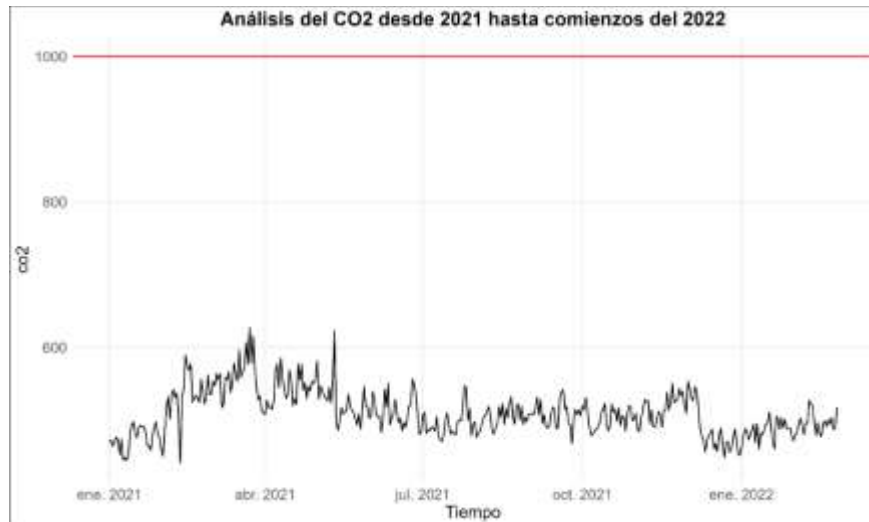


Ilustración 10. Análisis del CO₂ desde 2021 hasta 2022 (fuente: autor propio)

Aunque el CO₂ no cuenta con un límite establecido por la OMS, es importante monitorear sus concentraciones por su relación con el cambio climático y la calidad del aire interior. La serie termina a comienzos de 2022, y los niveles mostrados no representan un riesgo directo para la salud bajo directrices de la OMS, por otro lado, empresas especializadas en ventilación establecen un límite de 1000 mg/m (Siber, 2024); sin embargo, este límite está muy lejos de alcanzarse en Bogotá.

- **Análisis del Carbono Negro (BC) desde mediados de 2023 hasta comienzos de 2024**

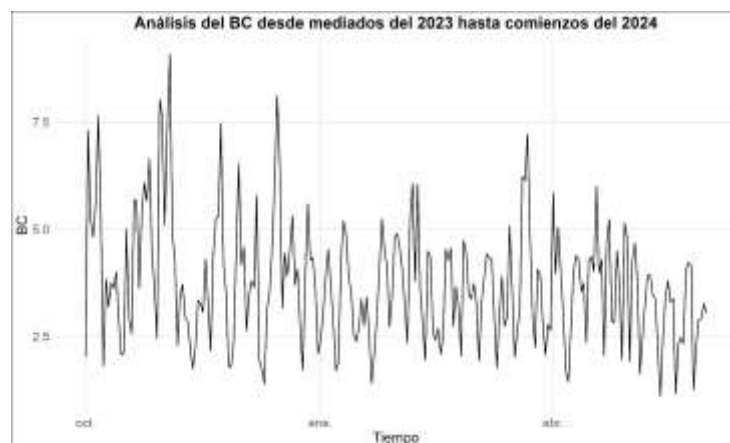


Ilustración 11. Análisis del BC desde 2023 hasta 2024 (fuente: autor propio)

El BC no tiene un umbral establecido por la OMS, pero su monitoreo es crucial dado su impacto potencial en la salud respiratoria y cardiovascular. Los datos muestran una variabilidad considerable, lo que puede indicar fuentes de emisión no constante como el tráfico vehicular pesado y la quema de biomasa.

A través de las gráficas de series de tiempo, se observa que los niveles de varios contaminantes frecuentemente exceden los límites recomendados por la OMS, indicando periodos de alta contaminación que podrían representar un riesgo significativo para la salud pública en Bogotá. La variabilidad en las concentraciones sugiere la influencia de factores estacionales, así como de eventos específicos que pueden aumentar temporalmente la contaminación. El PM2.5, el PM10 y el NO2 muestran picos significativos que superan los límites establecidos, lo que refleja episodios de alta contaminación.

El análisis de las series temporales de los contaminantes en Bogotá ha mostrado que los niveles de PM2.5, PM10 y NO2 a menudo superan los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esta observación ha motivado centrar el estudio en estos tres contaminantes, dado su impacto significativo en la salud pública. La elección se justifica por la necesidad de comprender a fondo los factores ambientales y meteorológicos que contribuyen a la superación de estos umbrales y el comportamiento de estos contaminantes. Por lo tanto, enfocarse en PM2.5, PM10 y NO2 permitirá un análisis más exhaustivo sobre las dinámicas específicas que los caracterizan.

Visualización Geoespacial de Contaminantes Atmosféricos

En el contexto de la evaluación del impacto ambiental y la gestión de la calidad del aire, la visualización geoespacial desempeña un papel crucial al permitir la identificación visual de patrones de distribución y concentración de contaminantes a lo largo de áreas geográficas definidas. Este análisis es esencial para comprender cómo los contaminantes, como el PM2.5, NO2 y PM10, se comportan en diferentes entornos urbanos y cómo estos niveles se comparan a escala global. En este estudio, se emplearon técnicas de cartografía para representar y comparar los niveles de contaminantes en Bogotá durante el año 2023 con respecto a normativas globales y registros históricos.

Mapa Global de PM2.5

Para comenzar, se realizó una comparativa internacional mediante la elaboración de un mapa global utilizando los datos del informe de calidad del aire (IQ AIR, 2023). Esta visualización se generó a partir del conjunto de datos aqi, utilizando la función ggplot junto con geom_map para proyectar las concentraciones de PM2.5 sobre un mapa base obtenido de la función map_data("world"). Este mapa no solo destaca las regiones con mayores concentraciones de PM2.5, sino que también ofrece una escala cromática continua que facilita la identificación de gradientes de contaminación.

Visualización de Estaciones de Monitoreo en Bogotá

En un enfoque más localizado, se procedió a mapear las 13 estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá, aplicando una escala de colores para reflejar la intensidad de las concentraciones de los contaminantes mencionados. La plataforma leaflet fue utilizada para esta tarea, permitiendo la interacción dinámica con el mapa. Las estaciones fueron codificadas en colores desde el rojo, indicando la mayor concentración, hasta el verde claro, representando la menor concentración. Este esquema facilita una comprensión inmediata de las áreas más afectadas dentro de la ciudad.



Ilustración 12. Mapa estaciones de monitoreo (fuente: autor propio)

La integración de estos mapas en la evaluación permite una comparación efectiva y visual entre los niveles actuales y pasados, proporcionando una herramienta esencial para los responsables de la formulación de políticas y las autoridades ambientales para detectar áreas críticas y evaluar la eficacia de las intervenciones realizadas.

Normalización de Variables

En el análisis de series temporales relacionadas con la calidad del aire, es crucial considerar la naturaleza de las distribuciones de las variables para asegurar la validez y confiabilidad de los modelos econométricos empleados, como el VAR (Vector Autoregresivo), VECM (Modelo de Corrección de Error Vectorial) y ARDL (Autoregressive Distributed Lag). En este estudio, se identificó que las variables de interés, específicamente PM2.5, PM10, NO2 y ciertos parámetros meteorológicos, presentaban distribuciones que no se ajustaban a la normalidad, lo cual puede influir significativamente en la inferencia estadística y la interpretación de los modelos.

Caracterización de las Distribuciones de las Variables

Las partículas PM2.5 y PM10 mostraron distribuciones asimétricas siguiendo un patrón gamma, caracterizado por su asimetría positiva, lo que indica una concentración de valores más bajos con extensiones hacia valores más altos. Por su parte, el dióxido de nitrógeno (NO2) se ajustó a una distribución chi-cuadrado, reflejando una variabilidad considerable que puede ser atribuida a factores episódicos de alta contaminación. La temperatura (tmp) también siguió una distribución gamma, lo que sugiere variaciones estacionales y diarias marcadas. En contraste, variables meteorológicas como la radiación solar, la presión atmosférica y la velocidad del viento se adecuaron a distribuciones normales, indicando una menor asimetría en sus mediciones.

Normalización de Datos

Dada la importancia de asegurar que las variables cumplan con los supuestos de homogeneidad y linealidad requeridos por los modelos econométricos, se implementó un proceso de normalización. Este tratamiento estadístico es crucial para mitigar los efectos de las asimetrías y las colas pesadas en las distribuciones de las variables contaminantes y meteorológicas. La normalización no solo facilita la estabilización de la varianza y la mejora en la simetría de las distribuciones, sino que también refuerza la robustez de los métodos de estimación y las inferencias realizadas a partir de estos modelos.

Consecuencias de la No Normalización

La omisión de este paso crucial puede resultar en estimaciones sesgadas y conclusiones erróneas. Por ejemplo, la presencia de asimetría y kurtosis elevada puede afectar la eficacia de los tests estadísticos, como los de hipótesis sobre los coeficientes y las pruebas de raíz unitaria,

comprometiendo la capacidad del modelo para capturar dinámicas de largo plazo y relaciones de cointegración.

Implementación Práctica

Para abordar estos desafíos, se utilizó la transformación Box-Cox y técnicas de estandarización para normalizar las variables antes de su inclusión en los modelos analíticos. Este enfoque aseguró que cada serie temporal se comportara de manera más conforme a los supuestos teóricos, permitiendo una interpretación más precisa y confiable de los impactos ambientales y sus determinantes.

Esta metodología rigurosa asegura que el análisis de la calidad del aire en Bogotá se realiza con la máxima integridad estadística, proporcionando resultados que pueden ser fundamentales para la formulación de políticas públicas efectivas en el ámbito ambiental.

Modelos propuestos

Modelo Probit

En el marco de esta investigación sobre la calidad del aire en Bogotá, se ha procedido a evaluar la probabilidad de que las concentraciones de ciertos contaminantes atmosféricos excedan los umbrales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El enfoque se centra en los contaminantes PM2.5, PM10 y NO2, dado que las series temporales indicaron que estos son los que más frecuentemente superan los niveles recomendados.

Para la modelación de estos eventos de excedencia, se ha empleado un modelo Probit, una técnica estadística frecuentemente utilizada en la econometría para modelar variables dependientes binarias. En nuestro contexto, estas variables binarias representan la ocurrencia o no de una excedencia del límite de contaminante. La variable dependiente se define como 1 si la concentración diaria del contaminante supera el umbral de la OMS, y 0 en caso contrario. Para el PM2.5, el umbral se estableció en 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el NO2 fue de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el PM10 de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El modelo Probit se ajusta utilizando como variables independientes una serie de factores ambientales y temporales que se presume influyen en los niveles de contaminación. Estos incluyen la precipitación (rain), la temperatura (tmp) y la velocidad del viento (ws), junto con variables categóricas que representan el día de la semana (dow), el mes (month) y el año (year). Estas

variables permiten controlar por efectos estacionales y otros patrones temporales que podrían afectar las mediciones de los contaminantes. Se estimó el siguiente modelo:

$$P(Y_{Contaminate}) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 rain + \beta_2 tmp + \beta_3 ws + \beta_4 dow + \beta_5 month + \beta_6 year)$$

El ajuste del modelo se lleva a cabo a través de la función generalizada lineal (GLM) con enlace probit, diseñada específicamente para tratar con distribuciones de error no estándar y relaciones no lineales, adecuada para nuestro análisis de datos binarios.

Una vez estimado el modelo, se procede a la evaluación de los ajustes y la significancia de los predictores, lo que permite obtener una comprensión más detallada de los factores que contribuyen a las excedencias. Además, se calculan las probabilidades ajustadas de excedencia para cada día del periodo de estudio, lo que facilita la visualización y la interpretación de las tendencias a lo largo del tiempo mediante gráficos de línea.

- **Modelo Probit para el PM2.5** [Ver Salida de la consola 15. Modelo Probit PM2.5]

A partir del modelo Probit para el PM2.5, al interpretar los coeficientes se encontró que:

- **Rain (Lluvia):** El coeficiente para la lluvia es negativo (-0.199), aunque no es estadísticamente significativo ($p > 0.1$). Esto sugiere que hay una ligera tendencia a que las excedencias disminuyan con la lluvia, pero no es una relación fuerte o consistente.
- **Tmp (Temperatura):** La temperatura tiene un coeficiente positivo (0.039) con significancia estadística ($p < 0.05$), indicando que aumentos en la temperatura están levemente asociados con un aumento en la probabilidad de excedencias de PM2.5.
- **Ws (Velocidad del Viento):** Muestra un coeficiente significativamente negativo (-2.314, $p < 0.01$), lo que indica que mayores velocidades de viento están fuertemente asociadas con menores probabilidades de excedencia de PM2.5. Esto es consistente con la idea de que el viento dispersa los contaminantes.
- **Dow (Día de la Semana):** Varios días de la semana muestran diferencias significativas en la probabilidad de excedencias comparados con el lunes. Los viernes (dow5) muestran el mayor aumento (0.723, $p < 0.01$), lo cual podría estar relacionado con patrones de tráfico y actividad industrial semanal.
- **Month (Mes):** Algunos meses muestran aumentos significativos en las probabilidades de excedencia, como marzo (0.711, $p < 0.01$) y diciembre (0.591,

$p < 0.01$), lo que podría reflejar condiciones estacionales específicas que afectan los niveles de PM2.5.

- **Year (Año):** Cada año posterior al año base (2021) muestra un aumento en la probabilidad de excedencias, siendo más pronunciado en 2024 (0.641, $p < 0.01$), lo que sugiere que los factores a lo largo de los años podrían estar incrementando los riesgos de contaminación o que las medidas de control existentes no están siendo efectivas en la reducción de eventos de excedencia.

Sumado a esto, la gráfica muestra la probabilidad predicha de excedencia de los niveles de PM2.5 sobre el umbral establecido por la OMS en Bogotá, según estimaciones del modelo Probit, a lo largo del periodo de 2021 a 2024.

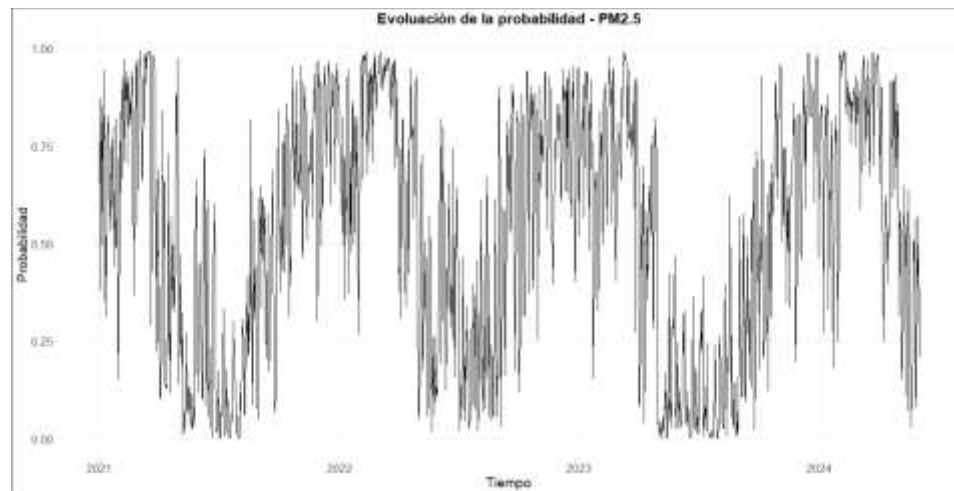


Ilustración 13. Evolución de la probabilidad PM2.5 (fuente: autor propio)

Se puede observar que:

- **Variabilidad Temporal:** La línea en la gráfica oscila significativamente a lo largo del tiempo, lo que sugiere que la probabilidad de exceder los niveles recomendados de PM2.5 varía considerablemente de un día a otro. Esta variabilidad puede estar influenciada por cambios en las condiciones meteorológicas, actividades humanas y variaciones estacionales, como se refleja en los coeficientes del modelo Probit para variables como la temperatura, la velocidad del viento y las categorías temporales (días y meses).
- **Rango de Probabilidades:** Las probabilidades varían entre casi 0 (cero) y 1 (uno), indicando días con muy baja probabilidad de excedencia hasta días con probabilidad casi cierta de exceder los niveles de PM2.5.

- **Tendencias Anuales:** Aunque es difícil discernir una tendencia clara a largo plazo debido a la variabilidad diaria, se puede observar que, en algunos períodos específicos del año, como se ha visto reflejado en la configuración del modelo, la probabilidad tiende a ser más alta, posiblemente relacionada con condiciones estacionales específicas.
- **Implicaciones para Política Ambiental y Salud Pública:** Esta gráfica puede servir como una herramienta valiosa para los responsables de la formulación de políticas y las autoridades de salud pública. La capacidad de prever días con alta probabilidad de excedencia puede facilitar la implementación de medidas preventivas, como advertencias a la población, restricciones temporales en actividades industriales o de construcción, y regulaciones de tráfico para mitigar los niveles de PM2.5.
- **Modelo Probit para el PM10** [Ver Salida de la consola 16. Modelo Probit PM10]

A partir del modelo Probit para el PM10, al interpretar los coeficientes se encontró que:

 - **Rain (Lluvia):** Coeficiente de -0.808 ($p < 0.01$), indicando una relación negativa significativa. A medida que aumenta la lluvia, la probabilidad de exceder el umbral de PM10 disminuye, probablemente debido a que la lluvia ayuda a asentar las partículas en suspensión.
 - **Tmp (Temperatura):** Coeficiente positivo de 0.040, aunque no es estadísticamente significativo ($p > 0.05$). Sugiere una leve tendencia a que la probabilidad de excedencias aumente con la temperatura, posiblemente relacionado con patrones de estabilidad atmosférica que favorecen la acumulación de partículas.
 - **Ws (Velocidad del Viento):** Coeficiente de -1.089 ($p < 0.01$), similar al efecto en PM2.5, mostrando que velocidades más altas del viento reducen la probabilidad de excedencias de PM10. El viento dispersa las partículas, reduciendo las concentraciones.
 - **Dow (Día de la Semana):** Varias categorías muestran diferencias significativas. Los días entre semana (especialmente el miércoles, jueves y viernes) presentan un aumento en la probabilidad de excedencia en comparación con el lunes, lo que podría reflejar patrones de actividad semanal como tráfico o producción industrial.

- **Month (Mes):** La probabilidad de excedencia tiende a ser más baja en mayo, junio, julio y agosto (todos con $p < 0.01$), lo que podría estar asociado a patrones climáticos específicos como mayor precipitación o diferentes patrones de viento.
- **Year (Año):** Los años posteriores al año base muestran un aumento gradual en la probabilidad, con un salto significativo en 2024 (coeficiente de 1.117, $p < 0.01$), sugiriendo una tendencia creciente a lo largo del tiempo que podría estar influenciada por factores a largo plazo como el crecimiento urbano o cambios en normativas ambientales.

Adicionalmente, la gráfica muestra la probabilidad predicha de excedencia de los niveles de PM10 sobre el umbral establecido por la OMS en Bogotá, según estimaciones del modelo Probit, a lo largo del periodo de 2021 a 2024.

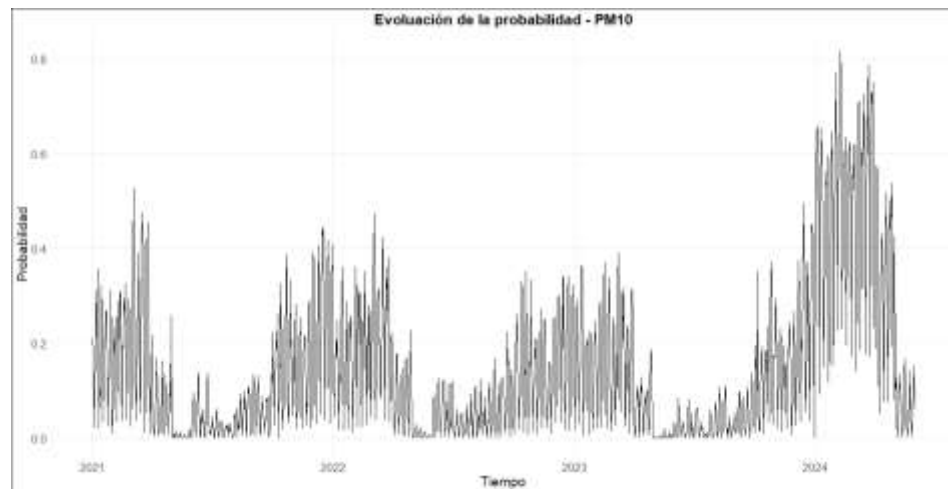


Ilustración 14. Evolución de la probabilidad PM10 (fuente: autor propio)

Se puede observar que:

- **Variabilidad y Tendencia:** La gráfica muestra una alta variabilidad diaria en la probabilidad de excedencia. Hacia el final del período, en 2024, hay un notable aumento en las probabilidades predichas, lo cual está en línea con el aumento significativo en el coeficiente del año 2024 observado en el modelo. Esto sugiere que los factores que contribuyen a las excedencias de PM10 podrían estar intensificándose con el tiempo.
- **Implicaciones:** El modelo y su visualización en la gráfica sugieren la necesidad de monitorizar continuamente las concentraciones de PM10, especialmente en

anticipación a condiciones que se han identificado como contribuyentes a altas probabilidades de excedencia. La capacidad de prever estos eventos permite la implementación de medidas preventivas para proteger la salud pública y cumplir con las regulaciones ambientales.

- **Modelo Probit para el NO2** [Ver Salida de la consola 17. Modelo Probit NO2]

Estos coeficientes detallan cómo diferentes variables influyen en la probabilidad de que los niveles de NO2 excedan el umbral establecido.

- **Rain (Lluvia):** Coeficiente positivo de 0.620 ($p < 0.05$), lo que indica que, a diferencia de PM10 y PM2.5, la lluvia aumenta la probabilidad de excedencias de NO2. Esto podría deberse a reacciones químicas en la atmósfera que aumentan la concentración de NO2 durante episodios de lluvia.
- **Tmp (Temperatura):** Coeficiente negativo significativo de -0.248 ($p < 0.01$). Un descenso en la temperatura está asociado con un aumento en la probabilidad de excedencia de NO2, posiblemente debido a la mayor estabilidad atmosférica que atrapa contaminantes cerca del suelo durante condiciones más frías.
- **Ws (Velocidad del Viento):** Coeficiente negativo de -3.299, indicando que un aumento en la velocidad del viento reduce significativamente la probabilidad de excedencias de NO2, similar a su efecto en las partículas PM10 y PM2.5.
- **Dow (Día de la Semana):** Los días laborables tienden a tener una mayor probabilidad de excedencia en comparación con el lunes. El efecto es particularmente fuerte los miércoles y jueves (0.712 y 0.625 respectivamente, $p < 0.01$), reflejando posiblemente el tráfico vehicular incrementado y la actividad industrial.
- **Month (Mes):** Mayo muestra un coeficiente negativo significativo de -1.705 ($p < 0.01$), lo que sugiere una menor probabilidad de excedencia. En contraste, septiembre y octubre muestran incrementos significativos en la probabilidad de excedencia.
- **Year (Año):** Hay un incremento notable en la probabilidad de excedencia en 2023 y 2024 (0.675 y 1.022 respectivamente, $p < 0.01$), indicando una tendencia creciente a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, la gráfica muestra la probabilidad predicha de excedencia de los niveles de NO₂ sobre el umbral establecido por la OMS en Bogotá, según estimaciones del modelo Probit, a lo largo del periodo de 2021 a 2024.

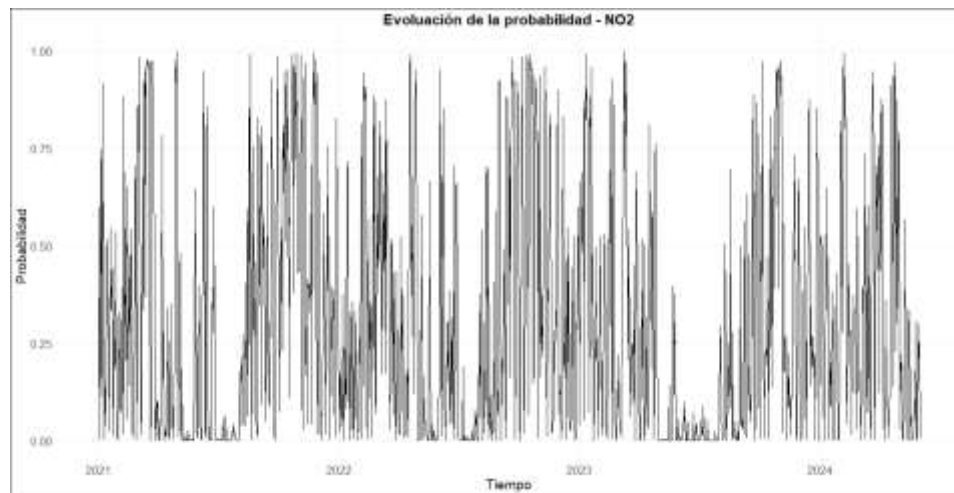


Ilustración 15 Ilustración 10. Evolución de la probabilidad NO₂ (fuente: autor propio)

Se puede observar que:

- **Variabilidad Temporal:** La línea muestra variaciones diarias significativas, con algunos periodos y días específicos donde la probabilidad de excedencia es particularmente alta, incluso en algunos días la probabilidad de exceder los niveles impuestos por la OMS es del 100%.
- **Tendencias Anuales:** La gráfica muestra un aumento general en la probabilidad de excedencias hacia el final del período en 2024, lo que coincide con el análisis de los coeficientes que muestran un aumento en la probabilidad en los años posteriores.

Dado que se ha demostrado que la variable de velocidad del viento (w_s) tiene una influencia significativa en la probabilidad de que los niveles de PM_{2.5}, PM₁₀ y NO₂ excedan los umbrales establecidos, se decidió graficar esta probabilidad en función de la velocidad del viento para los tres contaminantes. Además, para observar mejor la tendencia, se optó por segmentar los datos y mostrar solo una línea de tendencia.



Ilustración 16. Nube de puntos Evolución de la probabilidad con Viento - PM2.5 (fuente: autor propio)



Ilustración 17.. Línea de tendencia Evolución de la probabilidad con Viento - PM2.5 (fuente: autor propio)

Tanto en la nube de puntos como en la línea de tendencia se observa una consistencia con los coeficientes analizados, mostrando que mayores velocidades de viento están fuertemente asociadas con menores probabilidades de excedencia de PM2.5. Este patrón es congruente con la hipótesis de que el viento actúa dispersando los contaminantes.



Ilustración 18. Nube de puntos Evolución de la probabilidad con Viento - NO2 (fuente: autor propio)

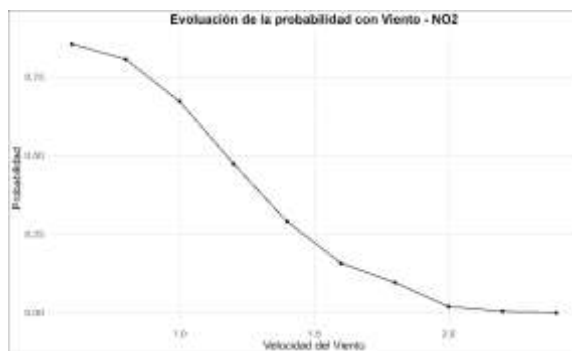


Ilustración 19. Línea de tendencia Evolución de la probabilidad con Viento - NO2 (fuente: autor propio)

De manera similar, para el NO2 también se observa que, a mayores velocidades del viento, la probabilidad de exceder los niveles establecidos por la OMS disminuye, siguiendo el mismo patrón que se observa en PM2.5.

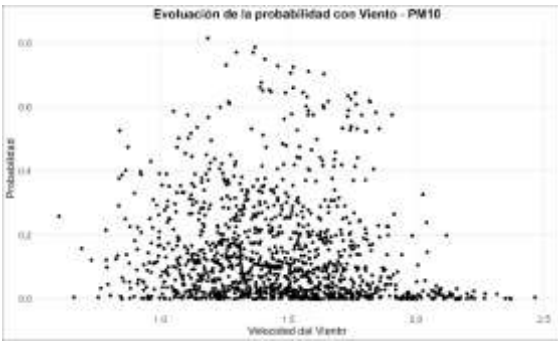


Ilustración 20. Nube de puntos Evolución de la probabilidad con Viento - PM10 (fuente: autor propio)

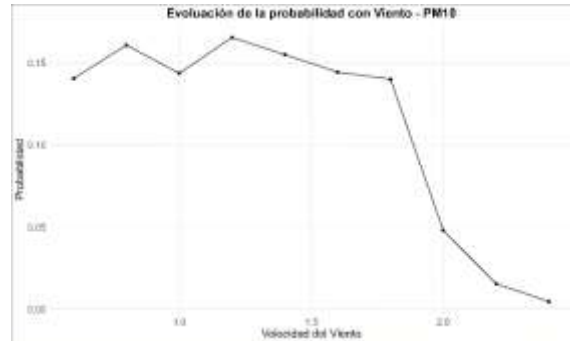


Ilustración 21. Línea de tendencia Evolución de la probabilidad con Viento - PM10 (fuente: autor propio)

Para el PM10, aunque no es tan evidente en la gráfica de la nube de puntos, sí se observa en la gráfica de la línea de tendencia que, a mayores velocidades del viento, la probabilidad de exceder los niveles establecidos disminuye. Es posible que debido a que el PM10 es más pesado, se requiera una velocidad de viento significativamente mayor para reducir esta probabilidad.

No obstante, dado que en los modelos Probit se pudo observar que los meses también ejercían una influencia significativa en los niveles de contaminación, se procedió a graficar la probabilidad de exceder los límites establecidos por la OMS en función de la velocidad del viento para cada mes. A continuación, se presentan las gráficas obtenidas:

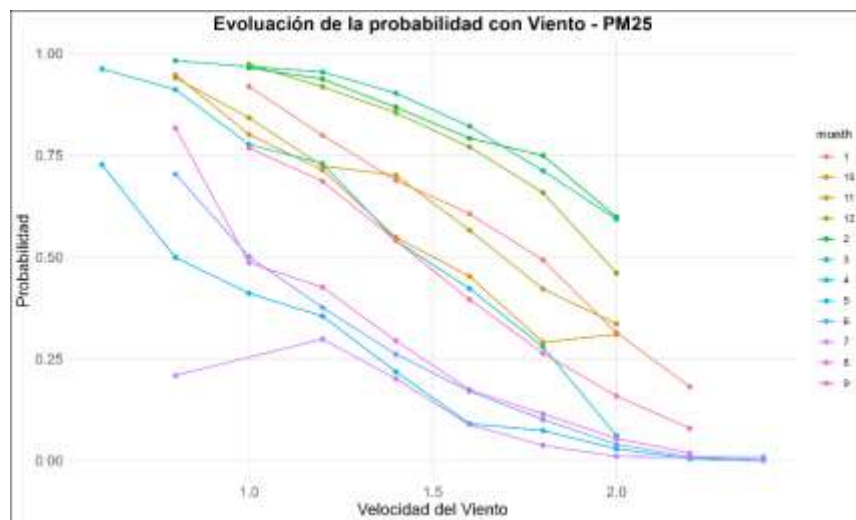


Ilustración 22. Evolución de la probabilidad con Viento - PM2.5 (fuente: autor propio)

La gráfica de PM2.5 muestra una clara relación negativa entre la velocidad del viento y la probabilidad de exceder los niveles de PM2.5 recomendados por la OMS. Cada línea representa un mes específico del año, revelando cómo la estacionalidad influye en esta relación. Para casi

todos los meses, la probabilidad de excedencia disminuye notablemente a medida que aumenta la velocidad del viento. Este comportamiento sugiere que el viento juega un papel crucial en la dispersión de las partículas de PM2.5, reduciendo su concentración en el aire. Sin embargo, los meses de invierno, representados por líneas más altas en velocidades de viento bajas, indican que condiciones estacionales como la inversión térmica pueden inhibir este efecto dispersante, manteniendo altas concentraciones de PM2.5 a pesar de la presencia de viento.

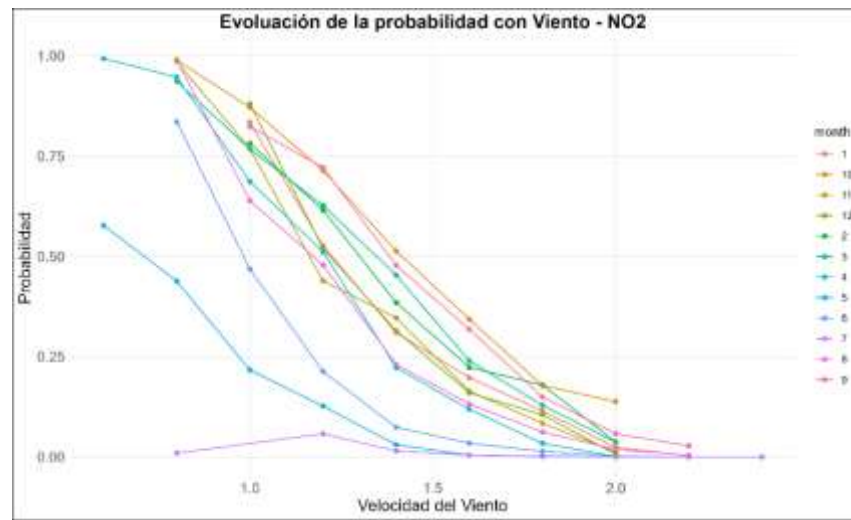


Ilustración 23. Evolución de la probabilidad con Viento - NO2 (fuente: autor propio)

En la gráfica correspondiente al NO2, la tendencia es similarmente decreciente, lo que demuestra que la velocidad del viento también reduce la probabilidad de excedencia de NO2, aunque las líneas de los diferentes meses están más agrupadas comparadas con las de PM2.5. Esto indica una menor variación estacional en el efecto del viento sobre las concentraciones de NO2. La reducción es particularmente notable en todos los meses a medida que la velocidad del viento se aproxima a 2.0 metros por segundo, resaltando el efecto significativo del viento en la dispersión de NO2. Este patrón reitera la importancia de la ventilación atmosférica en la gestión de la calidad del aire urbano.

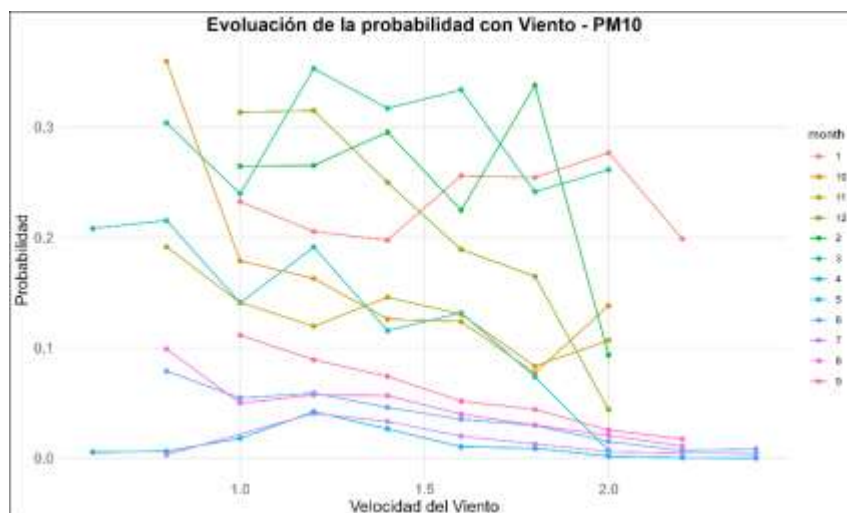


Ilustración 24. Evolución de la probabilidad con Viento - PM10 (fuente: autor propio)

La relación entre la velocidad del viento y la probabilidad de excedencia de PM10 por mes muestra una dinámica más variable. Aunque generalmente se observa una tendencia decreciente, algunos meses exhiben fluctuaciones o incluso un ligero aumento en la probabilidad a ciertas velocidades del viento. Esto podría reflejar la complejidad de las fuentes de PM10 y su comportamiento en el aire, que puede ser afectado por factores locales como la topografía y actividades urbanas específicas. Los meses de verano tienden a mostrar una disminución más constante y pronunciada, lo que podría asociarse con patrones climáticos que favorecen una mayor dispersión de partículas más grandes como las de PM10.

Estas gráficas son fundamentales para comprender cómo la velocidad del viento afecta la probabilidad de excedencia de diferentes contaminantes en Bogotá. Evidencian la importancia del viento como un factor natural de control de la calidad del aire, y cómo su efectividad puede variar considerablemente dependiendo del tipo de contaminante y la época del año.

Justificación de la metodología

En el contexto de la investigación sobre contaminación, el uso del modelo Probit para analizar la probabilidad de que las concentraciones de PM2.5 superen los umbrales recomendados por la Organización Mundial de la Salud se justifica por varias razones clave. El modelo Probit, perteneciente a la familia de modelos lineales generalizados, es especialmente adecuado para tratar con variables de respuesta binarias donde los eventos de interés tienen dos posibles resultados:

ocurren o no ocurren. En este estudio, el evento de interés es la excedencia del umbral del contaminante, codificado como 1 si hay excedencia y 0 si no la hay.

El modelo Probit utiliza una función de enlace probit que asume que la variable latente subyacente, influida por las variables predictoras, sigue una distribución normal. Esta suposición es crucial porque permite una interpretación probabilística del efecto de las variables independientes sobre la probabilidad de excedencia, proporcionando así una base teórica sólida y coherente con los principios de normalidad distributiva en errores, comúnmente asumidos en econometría.

Ventajas del modelo Probit en Estudios de Contaminación

1. **Interpretación probabilística:** El modelo Probit facilita la interpretación de los coeficientes en términos de la probabilidad de que un evento ocurra. Esto es particularmente útil en estudios ambientales donde se necesita entender el impacto de factores como las condiciones meteorológicas y temporales en la probabilidad de eventos extremos de contaminación.
2. **Flexibilidad en la inclusión de variables:** El modelo Probit puede incorporar fácilmente variables categóricas y continuas. En el estudio de la contaminación, esto permite modelar la influencia de múltiples factores, incluidos patrones estacionales, condiciones diarias y variaciones anuales, proporcionando un análisis integral.
3. **Robustez frente a variaciones extremas:** Los modelos Probit son menos sensibles a las variaciones extremas de las variables predictoras en comparación con otros modelos binarios como el logit, lo que puede ser particularmente ventajoso cuando se manejan datos ambientales que a menudo presentan altos niveles de variabilidad y ruido.

Desventajas del modelo probit

1. **Suposición de normalidad:** Una de las principales limitaciones del modelo Probit es su suposición de que la variable latente subyacente sigue una distribución normal. Esta suposición puede no ser válida en todos los contextos, especialmente en datos ambientales que pueden no distribuirse normalmente debido a la presencia de picos o sesgos significativos en la respuesta a eventos específicos.
2. **Dificultad en la estimación:** La estimación de los parámetros en un modelo Probit puede ser más compleja y computacionalmente más intensiva en comparación con otros modelos lineales generalizados, como el modelo logístico. Esto puede resultar en un mayor tiempo

de computación y la necesidad de mayor potencia computacional, especialmente con grandes conjuntos de datos.

3. **Sensibilidad a las especificaciones del modelo:** El desempeño del modelo Probit puede ser altamente sensible a la especificación correcta del modelo, incluyendo la elección y transformación de las variables predictoras. Una especificación inadecuada puede llevar a interpretaciones erróneas o a estimaciones sesgadas de los efectos de las variables.

Modelo de Vectoriales autorregresivos (VAR)

En el marco del desarrollo metodológico para el análisis de la calidad del aire en Bogotá, se implementó un Modelo de Vectores Autorregresivos (VAR) para explorar las dinámicas temporales y las interdependencias entre diversas variables ambientales y meteorológicas, y su relación con los niveles de contaminación de PM2.5. La selección de variables para el modelo se basó en un análisis preliminar de sus distribuciones y correlaciones. Las variables PM2.5, PM10 y NO2 presentaron distribuciones asimétricas, con PM2.5 y PM10 siguiendo una distribución gamma y NO2 una distribución chi-cuadrado. Las variables meteorológicas (temperatura, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento) se ajustaron a distribuciones normales.

Dada la alta correlación observada entre PM10 y NO2 con PM2.5, se excluyeron estas del modelo para evitar problemas de multicolinealidad, que podrían llevar a estimaciones ineficientes y sesgadas de los coeficientes del modelo. Se seleccionaron las variables de radiación solar (radsolar), velocidad del viento (ws), presión atmosférica (pressure) y temperatura (tmp) por su baja correlación mutua, lo que ayuda a evitar la sobre especificación del modelo y permite un análisis más claro del impacto independiente de cada variable sobre las concentraciones de PM2.5.

Para abordar la no estacionariedad observada en las series temporales, se procedió a diferenciar las series de tiempo. Este proceso ayuda a estabilizar la media de las series, eliminando tendencias y ciclos que podrían afectar la validez de los resultados del modelo VAR. La diferenciación transforma las series en estacionarias, condición necesaria para la aplicación efectiva de modelos VAR, asegurando que las relaciones estimadas no sean espurias, sino que reflejen verdaderas conexiones dinámicas entre las variables.

Se utilizó la función `VARselect` para determinar el número óptimo de retardos para el modelo, basándose en criterios como el Criterio de Información de Akaike (AIC), el Criterio de Hannan-

Quinn (HQ), el Criterio de Schwarz (SC) y el Error de Predicción Final (FPE), resultando en recomendaciones variadas que oscilaron entre 3 y 6 retardos.

El análisis de Dickey-Fuller, aplicado posteriormente, confirmó la estacionariedad de todas las series después de la diferenciación, permitiendo proceder con la estimación del modelo VAR. Dado que el p-value es menor a una significancia del 5%, sugiere que tenemos evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula de no estacionariedad (presencia de raíz unitaria) en favor de la hipótesis alternativa de estacionariedad.

H_0 : *La serie temporal posee raíz unitaria, es decir, es no estacionaria.*

H_1 : *La serie temporal no posee raíz unitaria, es decir, es estacionaria.*

La implementación del modelo VAR reveló que las concentraciones de PM2.5 son significativamente influenciadas por sus propios valores rezagados, así como por los rezagos de las variables meteorológicas seleccionadas, mostrando una dependencia particularmente fuerte del primer rezago de la radiación solar y de la velocidad del viento. Además, se observó que las concentraciones de PM2.5 son significativamente influenciadas por el segundo rezago de sí mismas, así como por el segundo rezago de la radiación solar y de la presión.

De los resultados de la estimación en tu modelo, podemos observar que varios coeficientes son estadísticamente significativos. [Ver Salida de la consola 18. Modelo VAR]

Explico algunos de los más relevantes:

1. pm25.l1:

- Coeficiente: -0.3165287
- p-valor: < 2e-16
- Este coeficiente es significativo y muestra que hay un efecto negativo de pm25 del día anterior (l1) sobre el pm25 del día actual. Esto podría interpretarse como un posible efecto de autoregresión donde altas concentraciones un día podrían llevar a una reducción al siguiente.

2. radsolar.l1, radsolar.l2, radsolar.l3:

- Coeficientes positivos (variando entre 0.0030945 y 0.0027197)
- Todos con p-valores muy bajos (todos < 0.05)

- Estos coeficientes indican un impacto positivo de la radiación solar del día y días anteriores sobre los niveles de pm25. Esto es consistente con la literatura que sugiere que mayor radiación solar puede aumentar las reacciones químicas que forman pm25.

3. ws.l2, ws.l4, ws.l6:

- Coeficientes negativos (variando entre -0.2429528 y -0.2775120)
- p-valores significativos (todos < 0.05)
- Estos coeficientes muestran que el viento puede ayudar a disipar los contaminantes, llevando a una reducción en los niveles de pm25.

4. tmp.l1, tmp.l4, tmp.l5:

- Coeficientes mixtos, tmp.l1 y tmp.l5 son negativos y tmp.l4 es positivo
- p-valores significativos para tmp.l4 y tmp.l5
- Las temperaturas pueden tener un impacto complejo sobre pm25, influenciando tanto las reacciones químicas como el comportamiento de la atmósfera.
- Este resultado sugiere un impacto directo y significativo de estos factores sobre la dispersión y concentración de partículas de PM2.5 en la atmósfera urbana.

Finalmente, la función de respuesta al impulso, generada a través de la librería `vars` en R, ofrece una visualización de cómo un choque en PM2.5 afecta sus propias dinámicas futuras y las de otras variables en el sistema a lo largo del tiempo. Los resultados indican que un aumento en PM2.5 tiende a ser moderado por las condiciones meteorológicas en sucesivos periodos, resaltando la interacción compleja y dinámica entre la contaminación del aire y los factores ambientales en un contexto urbano.

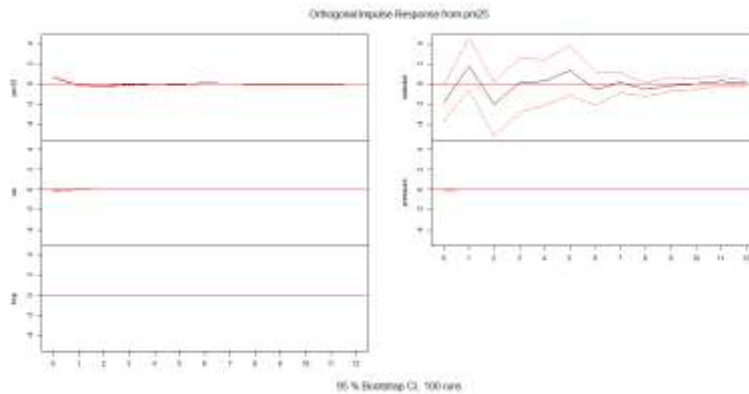


Ilustración 25. Impulso respuesta - VAR (fuente: autor propio)

Justificación de la metodología

El modelo de Vectoriales Autorregresivos (VAR) se justifica como una metodología adecuada para este análisis por varias razones fundamentales:

- **Modelo Multivariado:** El VAR permite modelar simultáneamente múltiples series temporales, como los niveles de contaminación por PM2.5 y variables meteorológicas, que están interrelacionadas y pueden influenciarse mutuamente a lo largo del tiempo. Esto es crucial dado que estos contaminantes pueden compartir factores comunes, como la velocidad del viento y la estacionalidad, que afectan sus niveles.
- **Flexibilidad en la Modelización:** Permite capturar la dinámica compleja entre las variables al incorporar términos autorregresivos que reflejan la influencia pasada de cada variable sobre sí misma y sobre las otras variables en el modelo. Esto es esencial para entender cómo cambios en una variable pueden afectar las otras en el contexto del análisis de contaminación y calidad del aire.

Ventajas del modelo

- **Captura de Interacciones Dinámicas:** El VAR es efectivo para capturar las interacciones dinámicas entre las variables, como la velocidad del viento y los niveles de contaminación, permitiendo una evaluación precisa de cómo estos factores afectan los niveles de contaminación en diferentes períodos.
- **Modelización Multivariada:** Al considerar múltiples variables simultáneamente, el VAR evita problemas de sesgo y errores que podrían surgir al analizar cada serie de manera

independiente, proporcionando una visión holística de la relación entre los contaminantes y sus factores determinantes.

- **Flexibilidad en la Interpretación:** Permite identificar y cuantificar rápidamente el impacto relativo de diferentes variables sobre los niveles de contaminación.

Desventajas del modelo

- **Requiere Series Estacionarias:** El VAR asume que las series temporales involucradas son estacionarias o pueden transformarse en estacionarias. Esto puede requerir preprocesamiento adicional de los datos, como la diferenciación, para cumplir con este requisito.
- **Sensibilidad a Especificaciones Erróneas:** La selección inadecuada de variables, rezagos o la especificación errónea del modelo pueden conducir a resultados sesgados o poco precisos. Se requiere un análisis cuidadoso y pruebas de diagnóstico para garantizar la adecuación del modelo.

Modelo de Vector Error Correction Model (VECM)

Se empleó un Modelo de VECM para examinar la dinámica de ajuste a largo plazo entre las variables ambientales consideradas. Previo a la aplicación del VECM, se realizó un proceso de normalización y diferenciación de las series temporales para asegurar estacionariedad, un requisito previo fundamental para la aplicación de modelos de series temporales.

Para determinar la existencia de relaciones de equilibrio a largo plazo entre las series, se implementó la prueba de cointegración de Johansen. Esta técnica es esencial para identificar si un conjunto de variables no estacionarias están cointegradas, es decir, si comparten una dinámica común de largo plazo que las mantiene en equilibrio. [Ver. Salida de la consola 19. Modelo VECM]

La implementación del modelo VECM reveló varias relaciones importantes a largo plazo entre las variables:

- **PM2.5 y sus propios rezagos:** Se observó un ajuste hacia el equilibrio en los rezagos de consigo mismo en el largo plazo.

- **PM2.5 y la temperatura (tmp):** Las interacciones a largo plazo entre PM2.5 y temperatura mostraron ajustes significativos en los rezagos, lo que implica que cambios en la temperatura pueden influir en los niveles de PM2.5.
- **PM2.5 y radiación solar (radsolar):** Similarmente, se detectó un equilibrio a largo plazo entre PM2.5 y radiación solar en sus rezagos, destacando la influencia de la radiación solar en los niveles de PM2.5.
- **PM2.5 y velocidad del viento (ws):** Se encontró que la velocidad del viento está cointegrada con PM2.5, sugiriendo que variaciones en la velocidad del viento pueden afectar la dispersión o acumulación de partículas finas.
- **PM2.5 y presión atmosférica (pressure):** La relación entre PM2.5 y la presión atmosférica también mostró ajustes a largo plazo en sus rezagos, indicando que los cambios en la presión atmosférica podrían influir en los niveles de PM2.5.

En cuanto al análisis del término de intercepción en el modelo VECM, no se encontraron contribuciones significativas de las variables al equilibrio de largo plazo, lo que sugiere que las dinámicas de corto plazo podrían estar más influenciadas por factores externos no incluidos en el modelo.

Además, el análisis de la primera diferencia de PM2.5 mostró correlaciones significativas con su propio primer rezago, así como con los primeros rezagos de radiación solar y velocidad del viento, lo que indica una respuesta dinámica de PM2.5 a cambios inmediatos en estas variables.

Para profundizar en la dinámica temporal y las interacciones entre las variables, se realizó un análisis de respuesta al impulso, que permite observar cómo una variable responde a lo largo del tiempo ante choques en otra variable.

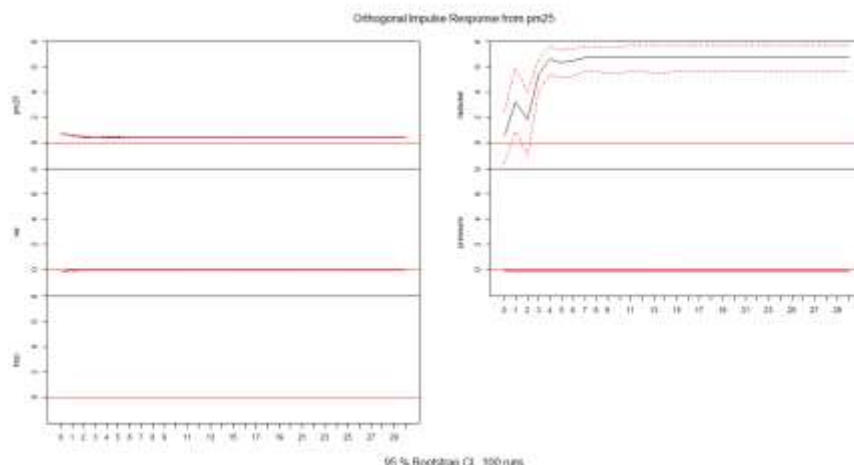


Ilustración 26. Impulso respuesta – VECM (fuente: autor propio)

En las gráficas muestran la respuesta de las variables a un impulso se puede observar que:

1. **pm25:** La gráfica en la parte superior izquierda muestra cómo pm25 responde a un impulso en sí mismo. La línea negra indica la respuesta estimada y las líneas rojas punteadas representan los intervalos de confianza del 95%. Vemos que la respuesta inicial de pm25 es positiva y se mantiene cerca del valor inicial, indicando que un shock en pm25 tiene un efecto persistente en la misma variable.
2. **ws (velocidad del viento):** La gráfica en el centro izquierdo muestra la respuesta de ws a un impulso en pm25. Observamos que la respuesta es prácticamente nula, lo que indica que un shock en pm25 no tiene un efecto significativo en la velocidad del viento.
3. **tmp (temperatura):** La gráfica en la parte inferior izquierda muestra la respuesta de tmp a un impulso en pm25. Al igual que con ws, la respuesta es nula, sugiriendo que un shock en pm25 no afecta significativamente la temperatura.
4. **radsolar (radiación solar):** La gráfica en la parte superior derecha muestra la respuesta de radsolar a un impulso en pm25. Observamos que inicialmente hay una respuesta positiva que se estabiliza con el tiempo. Esto podría indicar que un aumento en pm25 está asociado con un incremento temporal en la radiación solar.
5. **pressure (presión):** La gráfica en la parte inferior derecha muestra la respuesta de pressure a un impulso en pm25. La respuesta es esencialmente nula, indicando que un shock en pm25 no afecta significativamente la presión atmosférica.

Además, se efectuaron predicciones para las series consideradas utilizando el modelo ajustado, lo cual permitió proyectar el comportamiento futuro de las variables bajo estudio, con base en la información histórica y las dinámicas identificadas.

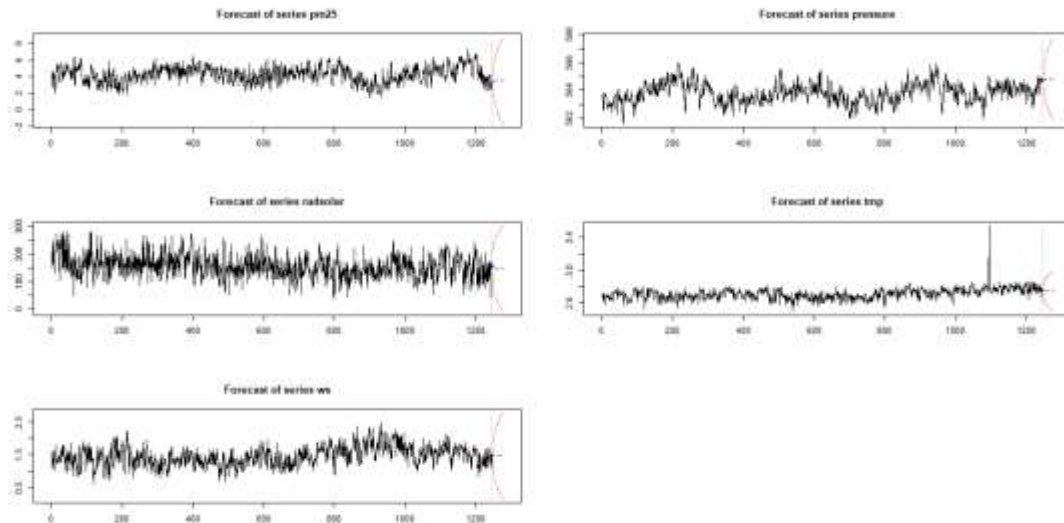


Ilustración 27. Pronóstico de las variables (fuente: autor propio)

Las gráficas de pronóstico ilustran estas proyecciones, destacando las bandas de confianza que encapsulan la incertidumbre asociada a las predicciones.

Justificación de la metodología

La elección del Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM) para este estudio se fundamenta en su capacidad para modelar y comprender las relaciones de largo plazo entre series temporales múltiples que son integradas de orden uno, $I(1)$. En el contexto de la calidad del aire y la contaminación, las variables como PM2.5, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión atmosférica, a menudo exhiben propiedades de no estacionariedad y están influenciadas por interacciones complejas y dinámicas de largo plazo. El VECM es especialmente útil para discernir estas relaciones y para identificar ajustes dinámicos que las variables experimentan para retornar a un equilibrio de largo plazo después de perturbaciones.

No obstante, dado el comportamiento observado en los residuales del modelo VECM, que presentaron ciertas irregularidades y no cumplían con las suposiciones de estacionariedad e independencia, se optó por emplear un modelo VAR (Vector Autoregresivo) en lugar del VECM. Esta decisión se fundamentó en la necesidad de alcanzar una mayor estabilidad en los resultados

y asegurar una mejor integración y análisis de las variables involucradas. El modelo VAR demostró ser más adecuado para manejar las dinámicas y la multivariabilidad de los datos, proporcionando así estimaciones más confiables y consistentes. Este ajuste metodológico permite una interpretación más robusta de las interacciones entre los contaminantes y facilita una evaluación más precisa de sus impactos a lo largo del tiempo.

Ventajas del modelo

- **Identificación de Relaciones a Largo Plazo:** El VECM permite identificar y cuantificar las relaciones de cointegración entre variables, lo cual es crucial en estudios ambientales donde los factores como los contaminantes y las condiciones meteorológicas interactúan a lo largo del tiempo.
- **Ajuste Dinámico al Equilibrio:** A diferencia de los modelos VAR estándar, el VECM incorpora mecanismos de ajuste que ayudan a entender cómo las variables se ajustan dinámicamente hacia el equilibrio a largo plazo, lo que es fundamental para analizar cómo las medidas de control de la contaminación y los cambios ambientales afectan la calidad del aire.
- **Uso de Información de Largo y Corto Plazo:** El modelo explota tanto las dinámicas de corto como de largo plazo entre las series, proporcionando una comprensión más completa sobre cómo los factores ambientales y los contaminantes interactúan entre sí en diferentes escalas temporales.
- **Predicción de Respuestas a Choques:** El análisis de respuesta al impulso en un VECM permite examinar el efecto de un choque en una variable sobre las demás a lo largo del tiempo, facilitando la evaluación de potenciales políticas ambientales y su impacto.

Desventajas del modelo

- **Complejidad y Requisitos de Datos:** La implementación del VECM requiere que las series temporales sean estacionarias en sus primeras diferencias y que exista al menos una relación de cointegración entre ellas, lo que puede no ser siempre el caso y puede requerir transformaciones previas de los datos.
- **Interpretación de Resultados:** Los resultados del VECM pueden ser difíciles de interpretar, especialmente cuando se incluyen múltiples variables y rezagos. Esto puede complicar la

comunicación de los hallazgos a partes interesadas que no estén familiarizadas con técnicas econométricas avanzadas.

- Sensibilidad a la Especificación del Modelo: El VECM es sensible a la especificación correcta de los rezagos y la inclusión de términos de cointegración, lo que puede afectar la validez de las conclusiones si el modelo no está correctamente especificado.
- Riesgo de Sobreajuste: Dada la complejidad del modelo y la inclusión de múltiples variables y dinámicas, existe un riesgo de sobreajuste, donde el modelo se ajusta demasiado a los datos de muestra y no generaliza bien a nuevos datos.
- Una limitación significativa del modelo VECM fue el comportamiento inadecuado de los residuales, que no cumplían con las suposiciones fundamentales de estacionariedad e independencia. Esto condujo a la decisión de utilizar un modelo VAR, que proporcionó una mayor estabilidad y coherencia en el análisis de las variables, aunque a costa de renunciar a las ventajas del modelo VECM para datos cointegrados.

Modelo de Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)

En el análisis de la relación entre la calidad del aire y variables ambientales clave, se implementó el Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL). Este modelo se seleccionó por su robustez en el manejo de series temporales que podrían ser no estacionarias en sus niveles, pero estacionarias en sus primeras diferencias. La variable dependiente designada fue la concentración de partículas PM2.5, mientras que las variables independientes incluidas fueron la radiación solar (radsolar), la velocidad del viento (ws), la presión atmosférica (pressure) y la temperatura (tmp).

Inicialmente, se normalizaron y diferenciaron todas las series temporales para garantizar la estacionariedad requerida para el análisis ARDL. Posteriormente, se empleó un enfoque de búsqueda tipo "grid search" para determinar la cantidad óptima de diferenciaciones necesarias para alcanzar un equilibrio a largo plazo entre las variables. Este método identificó que seis diferenciaciones eran necesarias para cada variable independiente para lograr la estabilidad deseada.

Con base en estos resultados, se construyó el modelo ARDL utilizando la mejor combinación de diferenciaciones. La estimación del modelo permitió evaluar tanto las dinámicas de corto plazo como las interacciones a largo plazo entre las variables.

$$PM2.5 = \beta_0 + \beta_1 radsolar + \beta_2 ws + \beta_3 pressure + \beta_4 tmp + \mu$$

Utilizando la función `stats::predict`, se realizaron predicciones a corto plazo para PM2.5 basadas en los valores ajustados por el modelo, específicamente proyectando los próximos 10 periodos. Este enfoque de predicción es crucial para evaluar la capacidad del modelo de replicar y anticipar el comportamiento de la variable dependiente basándose en los patrones históricos observados y las interacciones entre variables.

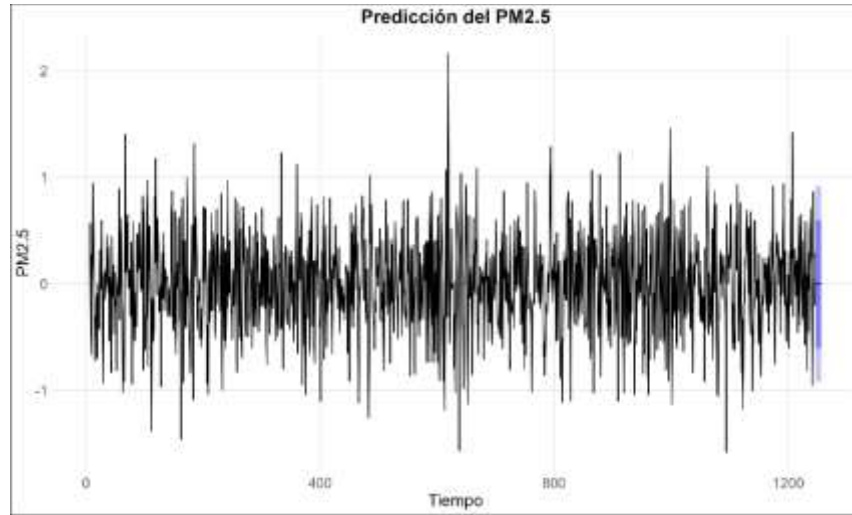


Ilustración 28. Predicción del PM2.5 (fuente: autor propio)

Además, se aplicó la prueba "bounds testing approach to cointegration" o prueba de límites de cointegración, utilizando la función `bounds_f_test`, para verificar la existencia de equilibrios a corto y largo plazo.

H_0 : *NO Existe un equilibrio a corto/largo plazo*

H_1 : *Existe un equilibrio a corto/largo plazo*

En ambos casos, los resultados mostraron p-values significativamente menores que el umbral del 5% ($p\text{-value} = 1e-06$), lo que indica la presencia de relaciones de equilibrio tanto en el corto como en el largo plazo entre las variables estudiadas.

La interpretación de los coeficientes obtenidos [Ver. Salida de la consola 20. Modelo ARDL] revela insights significativos sobre cómo las variables ambientales afectan la concentración de PM2.5:

- **Corto Plazo:**

- Cada aumento de una unidad en la presión atmosférica (mmHg) se asocia con una disminución de $0.1544445652 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM2.5.
- Cada incremento de un grado Celsius en temperatura reduce PM2.5 en $0.8314739740 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Un aumento de una unidad en radiación solar (W/m^2) incrementa PM2.5 en $0.0048481106 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Cada unidad adicional en velocidad del viento (m/s) reduce PM2.5 en $1.6913903054 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- **Largo Plazo:**

- Por cada unidad de aumento en la presión atmosférica, PM2.5 disminuye en $0.0360737761 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Por cada grado de incremento en temperatura, PM2.5 disminuye en $1.9135865542 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Un aumento en radiación solar resulta en un incremento de $0.0108755033 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM2.5.
- Un aumento en la velocidad del viento se asocia con una reducción de $2.0467589077 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM2.5.

Adicionalmente, se graficaron los residuales del modelo ARDL. El análisis incluye tres paneles esenciales para evaluar la calidad de los residuos:

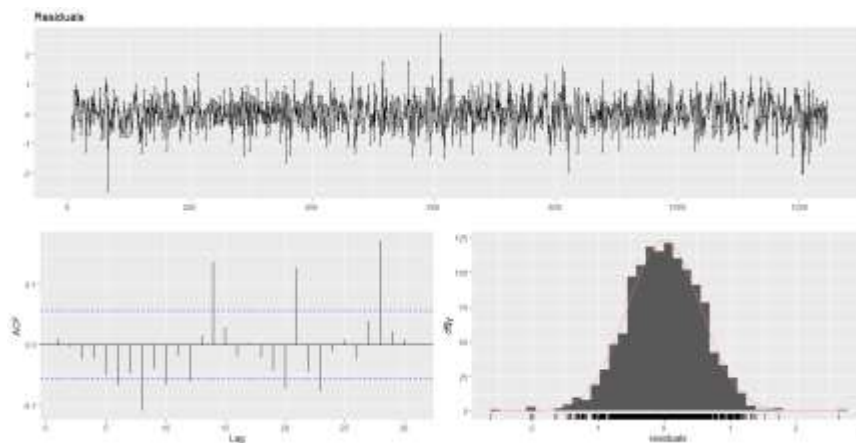


Ilustración 29. Residuales del modelo ARDL (fuente: autor propio)

1. **Residuales en el Tiempo:** Muestra la variación de los residuos a lo largo del tiempo. En esta gráfica, los residuos parecen centrarse alrededor de cero y no muestran tendencias evidentes ni patrones periódicos, lo cual es indicativo de que el modelo no sufre de problemas evidentes como heteroscedasticidad o cambios estructurales no capturados por el modelo.
2. **Función de Autocorrelación (ACF):** Este panel es crucial para determinar si existe autocorrelación en los residuos. Observamos que hay picos significativos fuera de los límites de confianza (líneas azules) en algunos retrasos. Esto sugiere la presencia de una leve autocorrelación residual, pues la mayoría de los retrasos están dentro de estos límites, indicando que no hay autocorrelación significativa en los residuos.
3. **Histograma y Curva de Densidad Normal:** La distribución de los residuos se compara con una distribución normal teórica (línea roja). El histograma parece tener una forma bastante simétrica y alineada con la curva normal, lo que indica que los residuos no están significativamente sesgados y son aproximadamente normales.

Justificación de la metodología

El modelo Autorregresivo de Retrasos Distribuidos (ARDL) es especialmente pertinente para analizar series temporales en estudios de contaminación y calidad del aire debido a su capacidad para manejar la naturaleza dinámica de los datos ambientales. Este modelo permite incorporar tanto variables independientes retardadas como la variable dependiente retardada, lo cual es crucial en el contexto ambiental donde los efectos pasados de los contaminantes pueden persistir y afectar las mediciones futuras.

En estudios de contaminación, es común que las concentraciones de contaminantes del aire no solo sean influenciadas por las condiciones actuales sino también por las concentraciones previas debido a la persistencia atmosférica y reacciones químicas lentas. El modelo ARDL puede captar estas dinámicas al incluir retrasos adecuados, proporcionando un entendimiento más completo y preciso de los factores que influyen en la calidad del aire.

Ventajas del modelo

- **Flexibilidad en la Integración de Órdenes:** El ARDL es adecuado para series temporales donde las variables pueden ser de diferentes órdenes de integración, es decir, $I(0)$ o $I(1)$.

Esto es particularmente útil en estudios ambientales donde diferentes contaminantes pueden tener diferentes propiedades estacionarias, como es este caso.

- Corto y Largo Plazo: El modelo ARDL permite descomponer los efectos a corto y largo plazo de las variables independientes sobre la variable dependiente. Esto es vital para entender cómo intervenciones o políticas ambientales afectan la calidad del aire de manera inmediata y persistente.
- Eficiencia en Muestras Pequeñas: A diferencia de otros métodos cointegración, el ARDL puede ser implementado eficientemente incluso en muestras relativamente pequeñas, lo cual es una ventaja en estudios con datos limitados o cuando se estudian eventos de contaminación específicos.
- Inclusión de Variables Exógenas: Permite la inclusión fácil de variables exógenas (como condiciones meteorológicas) que pueden afectar directamente los niveles de contaminantes, mejorando así la especificidad del modelo.

Desventajas del modelo

- Selección de Retrasos: La necesidad de seleccionar el número adecuado de retrasos para cada variable puede ser complicada y está sujeta a error humano o sesgo. Una mala elección en los retrasos puede llevar a conclusiones erróneas sobre las relaciones entre variables.
- Riesgo de Sobreajuste: Al incluir múltiples retrasos y variables, existe el riesgo de sobreajustar el modelo a los datos específicos del estudio, lo cual puede reducir la generalización de los resultados a otros contextos o períodos.

Random forest

Se emplea el modelo de Random Forest para evaluar las relaciones entre diversas variables atmosféricas y los niveles de PM2.5, un contaminante crítico debido a sus impactos en la salud pública y el ambiente.

Inicialmente, se procede a la carga y estructuración de los datos, optando por la utilización de Python como lenguaje de programación dada su flexibilidad y las potentes librerías disponibles para el manejo y análisis de datos. Los datos son importados desde un archivo de Excel, asegurándose que la columna correspondiente a las fechas sea reconocida como tal, para facilitar su manipulación en series temporales. Con estos datos se construyen dos estructuras principales:

una serie temporal exclusivamente de los valores de PM2.5, y un DataFrame con las variables explicativas, que incluyen temperatura, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento.

Para adecuar los datos al análisis de series temporales, se transforman las fechas en índices temporales y las variables explicativas en un arreglo NumPy, lo cual permite su manipulación eficiente en los pasos subsecuentes. Se realiza entonces la división del conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento y prueba, manteniendo el 90% de los datos para entrenamiento y el 10% restante para la validación del modelo. La estructuración de estos conjuntos se facilita mediante la función `TimeseriesGenerator`, que permite generar lotes de datos temporales con un número específico de observaciones pasadas para prever los futuros valores de PM2.5.

El modelo de Random Forest se configura y entrena utilizando un enfoque de redes neuronales LSTM debido a su capacidad para manejar dependencias a largo plazo en datos secuenciales. La configuración incluye capas densas y parámetros específicos como la función de activación y el optimizador, esenciales para ajustar la red a las particularidades de los datos de contaminación atmosférica. Posteriormente, se realiza el entrenamiento del modelo a lo largo de 50 épocas, ajustando los parámetros del modelo para minimizar el error cuadrático medio, un indicador crítico del desempeño predictivo del modelo en datos temporales.

Finalmente, se evalúa la capacidad predictiva del modelo sobre el conjunto de datos de prueba. Las predicciones, junto con los datos reales, se visualizan en un gráfico que muestra las series temporales de entrenamiento, las predicciones y los valores reales de PM2.5.

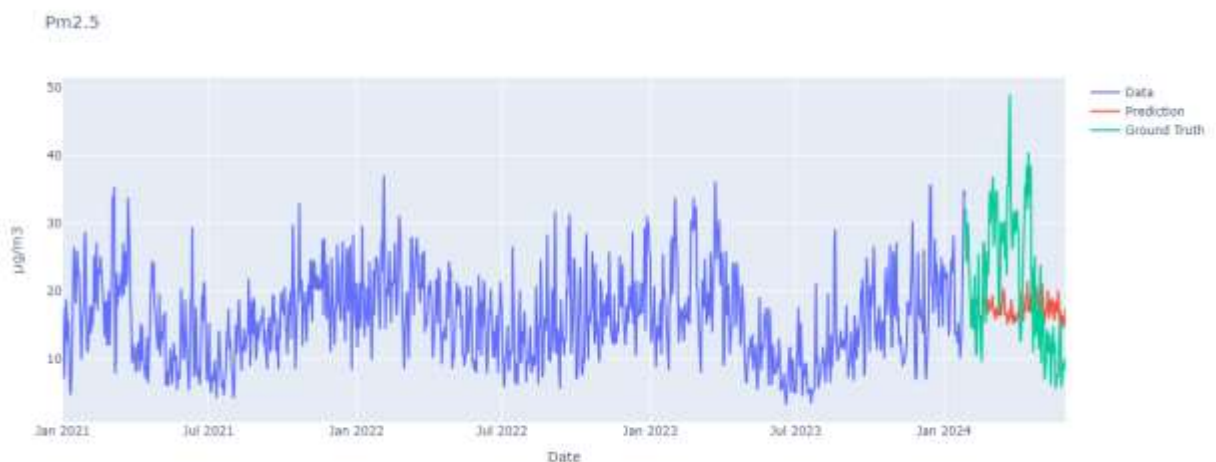


Ilustración 30. Resultados de la predicción del modelo de Random Forest (fuente: autor propio)

La gráfica ilustra los resultados de la predicción del modelo de Random Forest sobre los niveles de PM2.5 en Bogotá, junto con los datos reales para comparación.

1. Serie de Datos (Azul): Representa los valores históricos de PM2.5, mostrando la variabilidad típica a lo largo del tiempo con fluctuaciones que parecen seguir un patrón estacional y/o dependiente de factores no modelados explícitamente.
2. Predicción del Modelo (Rojo): Los valores predichos por el modelo de Random Forest para el segmento de prueba se muestran en rojo. Estas predicciones intentan seguir las tendencias y variaciones de los datos reales.
3. Valores Reales (Verde): La serie en verde representa los valores reales de PM2.5 durante el período de prueba. Esta serie es crucial para evaluar la precisión de las predicciones del modelo.

Al observar la gráfica, se puede notar que las predicciones del modelo (rojo) logran seguir en cierta medida la tendencia general de los valores reales (verde), especialmente en la captura de los picos y las caídas. Sin embargo, hay áreas, especialmente hacia el final del período de prueba, donde las predicciones no coinciden exactamente con los valores reales, indicando posibles limitaciones en el modelo para adaptarse a cambios abruptos o a la volatilidad alta en los niveles de PM2.5.

En cuanto a variabilidad y precisión el modelo parece capturar adecuadamente la variabilidad media de los datos, pero falla en predecir los picos extremos con precisión. Esto podría deberse a la naturaleza de los modelos de Random Forest que, aunque efectivos en capturar relaciones no lineales y complejas entre variables, pueden no ser tan precisos en situaciones de alta volatilidad.

Justificación de la metodología

El modelo Random Forest es especialmente adecuado para estudios en el ámbito de la contaminación y la calidad del aire debido a su robustez y eficacia en el manejo de grandes conjuntos de datos con múltiples variables predictoras. En el contexto de la calidad del aire, los datos suelen ser complejos y presentan interacciones no lineales entre múltiples factores ambientales y meteorológicos. Random Forest, siendo un método de aprendizaje ensemble que combina múltiples árboles de decisión, es capaz de capturar estas complejidades a través de su estructura inherente, proporcionando así predicciones y análisis de alta precisión.

Ventajas del modelo

- Capacidad para Manejar Alta Dimensionalidad: Random Forest maneja eficientemente grandes volúmenes de datos con muchas variables, lo cual es común en estudios ambientales que integran diversas fuentes de datos como meteorología, emisiones industriales y tráfico vehicular.
- Robustez frente a Datos Atípicos y Ruido: Este modelo es menos susceptible a la influencia de datos atípicos y ruido, debido a que promedia múltiples árboles de decisión, lo cual resulta en un modelo más estable y confiable.
- No requiere Linealidad: A diferencia de los modelos estadísticos tradicionales, Random Forest no asume una relación lineal entre las variables, lo cual es una ventaja al modelar procesos ambientales que son típicamente no lineales y complejos.

Desventajas del modelo

- Complejidad Computacional: La construcción de múltiples árboles de decisión hace que Random Forest pueda ser computacionalmente intensivo, especialmente con conjuntos de datos muy grandes, lo que podría requerir recursos de hardware significativos y tiempos de procesamiento largos.
- Riesgo de Sobreajuste: Aunque generalmente Random Forest maneja bien el sobreajuste, en situaciones con conjuntos de datos muy ruidosos o con un número excesivo de árboles, puede sobreajustarse a los datos de entrenamiento, lo que afecta la capacidad de generalización del modelo.
- Dependencia de Parámetros: La eficacia del modelo puede depender en gran medida de la configuración de sus parámetros, como el número de árboles en el bosque o la profundidad de los árboles. Elegir estos parámetros de manera inadecuada puede llevar a un rendimiento subóptimo.

Resultados y discusiones

Resultados de las estaciones de monitoreo

Los datos analizados corresponden a los promedios de los contaminantes PM2.5, PM10 y NO2 entre 2021 y mayo de 2024, recopilados en diversas estaciones de monitoreo de Bogotá. Los valores promedio observados se compararon con los límites máximos recomendados por la

Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5, 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para NO2.

Estación	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Bolivia	15,467	34,830	34,929
Carvajal	34,650	70,860	46,060
Centro	14,191	24,131	24,807
Ferias	15,008	25,305	29,986
Fontibón	19,000	35,318	35,940
Guaymaral	14,373	28,020	18,725
Kennedy	21,300	45,680	37,262
Min Ambiente	14,267	22,239	28,439
Puente Aranda	16,730	31,030	37,901
San Cristóbal	12,858	23,158	23,143
Suba	15,154	33,390	22,720
Tunal	17,625	37,107	25,562
Usaquén	11,664	22,097	19,505

Tabla 2. Promedios anuales de los contaminantes (fuente: autor propio)

Adicionalmente, con el objetivo de visualizar con mayor precisión las concentraciones y las zonas críticas, se decidió elaborar un mapa específico para cada uno de los contaminantes.

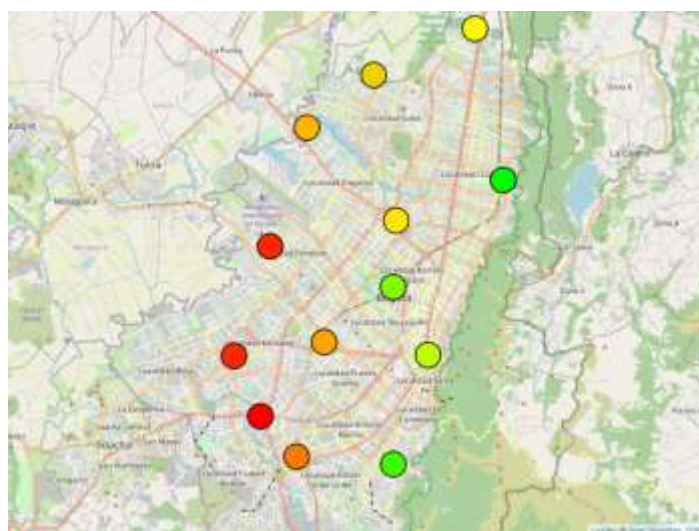


Ilustración 31. Visualización geográfica de las zonas críticas - PM2.5 (fuente: autor propio)

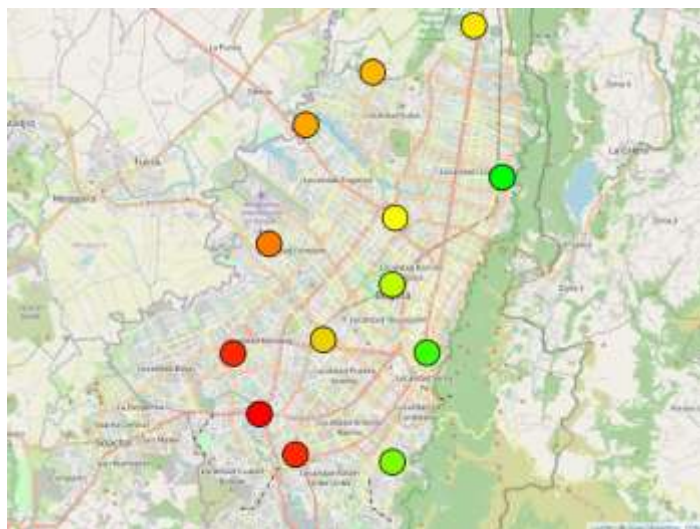


Ilustración 32. Visualización geográfica de las zonas críticas - PM10 (fuente: autor propio)

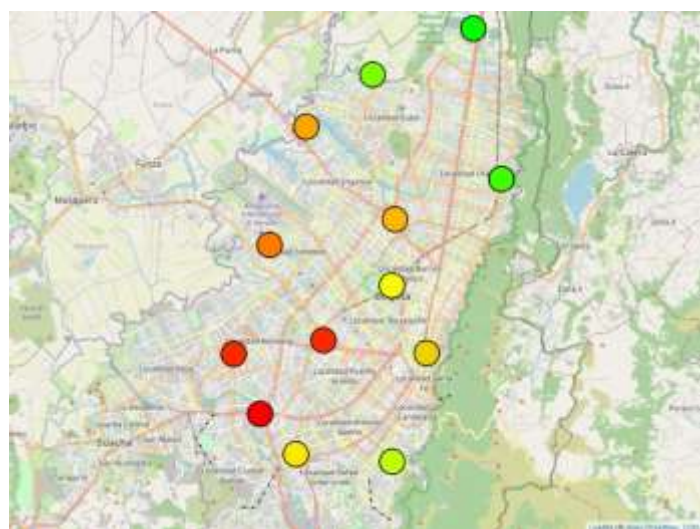


Ilustración 33. Visualización geográfica de las zonas críticas - NO2 (fuente: autor propio)

Se puede observar que:

- **Partículas Menores a 2.5 Micras (PM2.5):** 10 de las 5 las estaciones superan el límite de la OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este hallazgo es alarmante, dado que las partículas PM2.5 pueden penetrar profundamente en los pulmones y otros órganos, presentando graves riesgos para la salud. La estación de Carvajal registra el valor más alto con $34,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, casi 2.3 veces el límite recomendado, señalando un área crítica que requiere intervención inmediata.
- **Partículas Menores a 10 Micras (PM10):** Varias estaciones exceden el umbral recomendado de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10. Específicamente, las estaciones Carvajal, Kennedy,

Fontibon, Tunal, y Suba presentan niveles significativamente elevados, siendo la estación de Carvajal la más afectada con un promedio de 70,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este contaminante, aunque menos penetrante que el PM2.5, sigue siendo perjudicial, especialmente para aquellos con condiciones respiratorias preexistentes.

- **Dióxido de Nitrógeno (NO2):** 10 de las 15 estaciones superan el límite de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido para NO2, un contaminante conocido por su capacidad para agravar condiciones respiratorias y reducir la inmunidad a infecciones respiratorias. Las estaciones Carvajal, Puente Aranda y Kennedy destacan con niveles que exceden ampliamente el límite, con concentraciones de 46,060 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 37,901 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 37,262 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Los resultados indican una preocupante prevalencia de contaminación en múltiples zonas de Bogotá, con niveles que exceden consistentemente las directrices de la OMS. Esta situación subraya la urgente necesidad de políticas públicas más efectivas y medidas de control ambiental robustas. Las áreas identificadas como las más críticas, especialmente aquellas con altos niveles de PM2.5 y NO2, deben ser prioritarias en las estrategias de mitigación debido a su impacto directo en la salud pública.

El análisis también resalta la importancia de continuar y expandir los esfuerzos de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad, no solo para mantener informada a la población sobre los riesgos para la salud, sino también para evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas y ajustar las políticas conforme sea necesario. La implementación de tecnologías más limpias, la regulación de emisiones industriales y vehiculares, y la promoción de alternativas de transporte menos contaminantes podrían formar parte de un enfoque integral para abordar esta problemática.

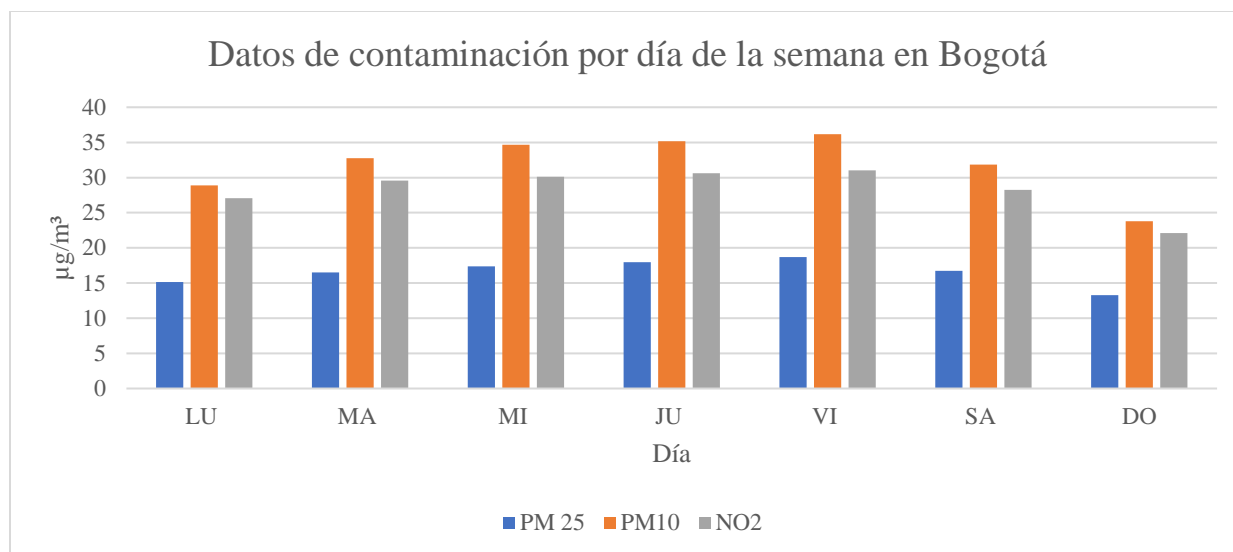


Ilustración 34. Datos de contaminación por día de la semana en Bogotá (fuente: autor propio)

Sumado a esto, la gráfica proporciona una visión detallada de la contaminación diaria en Bogotá, presentando los niveles promedio de PM2.5, PM10 y NO2 a lo largo de una semana. Analizando los datos [Ver. Tabla 3. Contaminación promedio por día], se observa un patrón creciente de contaminación a medida que avanza la semana, con los niveles más altos registrados hacia la mitad y final de la semana laboral, decreciendo significativamente hacia el domingo.

- Los niveles de PM2.5 aumentan progresivamente desde el lunes (15,141 µg/m³) hasta alcanzar su pico el viernes (18,684 µg/m³), seguido de una disminución durante el fin de semana, culminando en el nivel más bajo el domingo (13,270 µg/m³).
- Similarmente, PM10 muestra un aumento desde el lunes (28,872 µg/m³) hasta el viernes (36,158 µg/m³), con una disminución notable hacia el domingo (23,812 µg/m³).
- NO2 sigue un patrón comparable, iniciando con 27,083 µg/m³ el lunes y alcanzando el máximo el viernes (31,023 µg/m³), antes de disminuir a 22,107 µg/m³ el domingo.

Estos datos sugieren que la actividad semanal, posiblemente relacionada con el aumento del tráfico vehicular y la actividad industrial durante los días laborables, contribuye a elevar los niveles de contaminación, los cuales se reducen durante el fin de semana. Esto refleja una clara variación semanal en la calidad del aire, siendo los días laborables los de mayor preocupación en términos de exposición a contaminantes atmosféricos. Esta tendencia subraya la necesidad de implementar políticas de reducción de emisiones durante la semana para mejorar la calidad del aire en la ciudad.

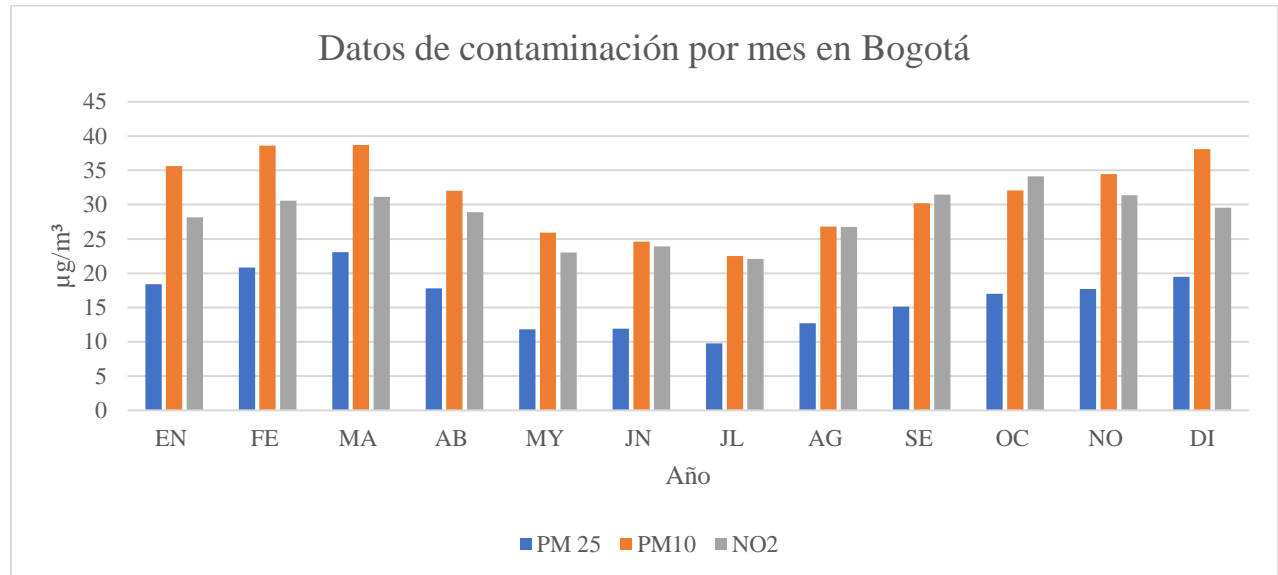


Ilustración 35. Datos de contaminación por mes en Bogotá (fuente: autor propio)

La grafica presenta los niveles promedio mensuales de contaminación por PM2.5, PM10 y NO2 en Bogotá. La distribución de los niveles de contaminación muestra variaciones significativas, con una tendencia marcada por incrementos y reducciones a lo largo de los diferentes meses, lo cual puede estar influenciado por factores como cambios meteorológicos y patrones de actividad humana. [Ver. Tabla 4. Contaminación promedio por mes]

- **Meses de mayor contaminación:** Los niveles más altos de PM2.5, PM10 y NO2 se observan en los meses de marzo, con 23,074 µg/m³ para PM2.5, 38,689 µg/m³ para PM10 y 31,138 µg/m³ para NO2. Febrero y diciembre también muestran elevados niveles de contaminación, especialmente en PM10 y NO2.
- **Meses de menor contaminación:** Julio muestra los niveles más bajos de los tres contaminantes, con 9,771 µg/m³ para PM2.5, 22,501 µg/m³ para PM10 y 22,099 µg/m³ para NO2. Los meses de mayo y junio también presentan reducciones notables, posiblemente debido a condiciones meteorológicas que favorecen la dispersión de contaminantes, como mayores precipitaciones o vientos más fuertes, pues cabe resaltar que se encontró que el mes que promedia a mayor velocidad del viento es Julio con 1,59 m/s.

La contaminación alcanza picos durante los primeros y últimos meses del año, lo que puede asociarse a una menor dispersión de los contaminantes en condiciones climáticas más frías y

estables. Los meses centrales del año, particularmente de mayo a agosto, registran los niveles más bajos de contaminación, coincidiendo con periodos de mayor precipitación y viento que ayudan a limpiar el aire más eficientemente.

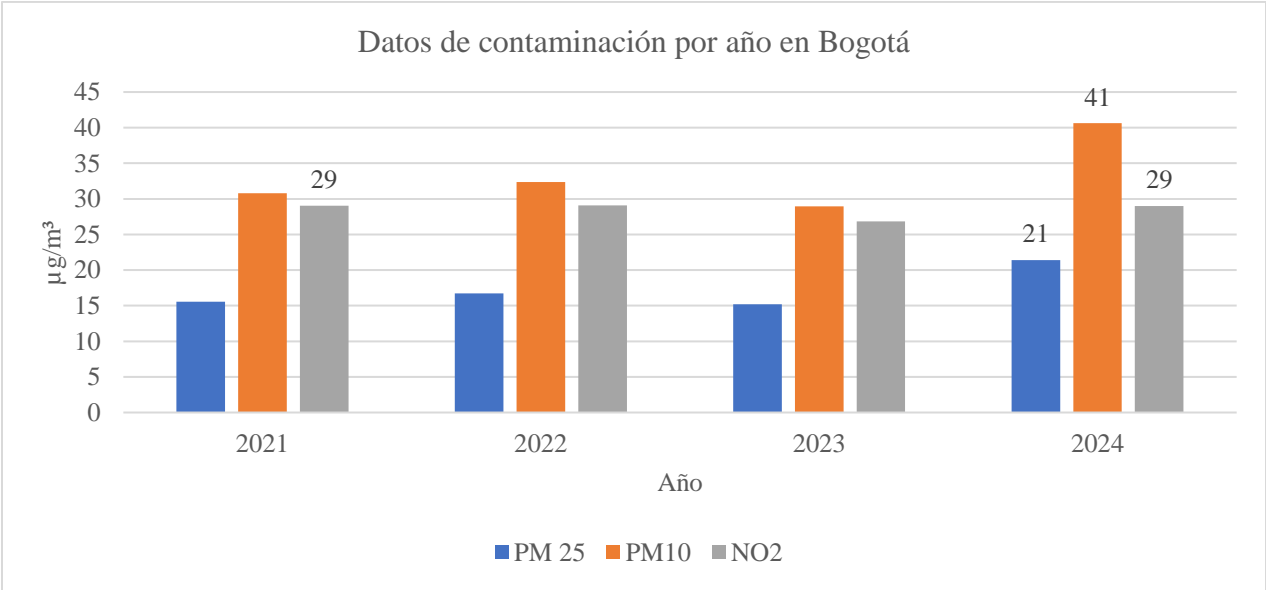


Ilustración 36. Datos de contaminación por año en Bogotá (fuente: autor propio)

Los datos de contaminación por año en la ciudad de Bogotá muestran una preocupante tendencia en los niveles de PM2.5, PM10 y NO2. Según la tabla [Ver. Tabla 5. Contaminación promedio por año], los años con la mayor concentración de cada contaminante son:

- Para PM2.5, el año 2024 registra la cifra más alta con 21,417 µg/m³.
- Para PM10, también en 2024, se alcanza el nivel máximo con 40,610 µg/m³.
- En cuanto al NO2, el año 2022 muestra la mayor concentración con 29,089 µg/m³, una concentración similar a la del año 2024.

Estos niveles están significativamente por encima de los estándares anuales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que son de 5 µg/m³ para PM2.5, 15 µg/m³ para PM10 y 10 µg/m³ para NO2 [Ver Tabla 1. Niveles de AQG recomendados]. Este incumplimiento reiterado de los límites establecidos es alarmante y señala un deterioro continuo en la calidad del aire en Bogotá, lo cual tiene implicaciones directas y graves para la salud respiratoria de sus habitantes.

Además, si bien solo contamos con el promedio de los contaminantes de 2024 hasta mayo y como anteriormente se analizó que los meses iniciales y finales del año suelen ser los más contaminados, se observa que entre 2021 y 2023, el mejor escenario para los primeros cinco meses muestra una reducción promedio de aproximadamente $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con el promedio anual. Esta tendencia sugiere que 2024 podría terminar siendo el año con peor calidad del aire de los últimos cuatro, duplicando el deterioro respecto a la leve mejora observada en 2023. Este retroceso es particularmente preocupante, ya que indica un empeoramiento significativo en los niveles de los tres contaminantes, reforzando la urgencia de adoptar medidas eficaces para mitigar esta problemática ambiental y de salud pública.

Al comparar los datos obtenidos en el presente estudio con la literatura existente, se observaron algunas discrepancias notables en los niveles promedio anuales de PM_{2.5} en Bogotá. Mientras que nuestro análisis indicó un promedio de $15,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el año 2023, estudios anteriores reportaron un promedio más bajo de $13,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta diferencia sugiere una posible tendencia ascendente en la contaminación por PM_{2.5} que requiere atención. Además, los datos del año 2022 revelan un promedio de $16,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en contraste con los $15,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reportados (IQ AIR, 2023). Estas variaciones en las mediciones destacan la importancia de una revisión crítica de las metodologías de medición y la necesidad de una estandarización en los informes de calidad del aire. Lamentablemente, para otros contaminantes como el PM₁₀ y el NO₂, no se encontraron fuentes confiables que reportaran concentraciones anuales, lo que limita la capacidad para realizar comparaciones exhaustivas y subraya la urgencia de mejorar los sistemas de monitoreo y reporte en estas categorías.

Resultados del Modelo Probit

El modelo Probit ha sido fundamental para evaluar la probabilidad de que las concentraciones de los contaminantes PM_{2.5}, PM₁₀ y NO₂ superen los umbrales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estos análisis se han centrado en identificar los factores determinantes de las excedencias, utilizando variables ambientales y meteorológicas clave como predictores en el modelo.

Resultados Detallados por Contaminante

- **PM_{2.5}:** Los resultados del modelo Probit para PM_{2.5} revelan una probabilidad incrementada de excedencia durante los meses de invierno, lo que sugiere una asociación

con la reducción de la velocidad del viento y una estabilidad atmosférica aumentada que limita la dispersión de las partículas. Además, se observó que los días con alta actividad vehicular incrementan significativamente la probabilidad de superar el umbral de PM2.5, subrayando la contribución de las emisiones locales a la concentración de partículas finas en el aire.

- PM10: Similar a PM2.5, el modelo para PM10 indica que las excedencias son más probables en condiciones de baja velocidad del viento.
- NO2: Para el dióxido de nitrógeno, los resultados muestran que las excedencias están fuertemente vinculadas a la velocidad del viento. Los efectos de la velocidad del viento son menos pronunciados para NO2 en comparación con las partículas, lo que indica que las fuentes locales son dominantes sobre los procesos de dispersión a larga distancia.

Influencia de la Velocidad del Viento

Los hallazgos del modelo Probit subrayan la importancia de la velocidad del viento en la dispersión de contaminantes. Una velocidad del viento más alta generalmente contribuye a una mayor dispersión de los contaminantes, reduciendo así la probabilidad de excedencias en las concentraciones de PM2.5 y PM10. Este efecto se observa claramente en los días con vientos fuertes, donde las probabilidades de excedencia son sustancialmente menores.

Para el NO2, aunque la dispersión también es afectada por la velocidad del viento, su impacto es comparativamente menor, lo que sugiere que las intervenciones para reducir las excedencias deben enfocarse más en el control de las emisiones vehiculares directas que en factores meteorológicos.

Implicaciones para Políticas Públicas

Los resultados del modelo Probit tienen implicaciones directas para la formulación de políticas de calidad del aire. El conocimiento de que la velocidad del viento juega un papel crucial en la dispersión de partículas sugiere que las estrategias de mitigación pueden necesitar ser ajustadas en función de las condiciones meteorológicas previstas. Además, las políticas que apuntan a reducir las emisiones vehiculares, como la mejora de la eficiencia del combustible, el fomento del transporte público y la restricción de vehículos en áreas con alta densidad de tráfico, podrían ser especialmente efectivas para controlar las excedencias de NO2.

Resultados Modelo Vectorial Autorregresivo (VAR)

En la presente sección se detallan los resultados obtenidos a través de la implementación de un Modelo de Vectores Autorregresivos (VAR), diseñado para explorar las interacciones entre variables meteorológicas específicas y su influencia sobre las concentraciones de partículas PM2.5 en Bogotá. Esta exploración responde a la necesidad de comprender las dinámicas temporales y las dependencias mutuas entre las condiciones atmosféricas y la calidad del aire en contextos urbanos.

La confirmación de la estacionariedad de las series diferenciadas, verificada mediante la prueba de Dickey-Fuller, permitió avanzar con confianza en la estimación de los parámetros del modelo. Los resultados de la prueba fueron decisivos, ofreciendo un p-value menor a 0.05, lo que proporciona evidencia significativa para rechazar la hipótesis de no estacionariedad de las series temporales involucradas.

La implementación del modelo VAR destacó que las concentraciones de PM2.5 están significativamente influenciadas tanto por sus propios valores rezagados como por los rezagos de variables meteorológicas clave. De manera particular, los efectos del primer rezago de la radiación solar y la velocidad del viento sobre las concentraciones de PM2.5 fueron estadísticamente significativos, sugiriendo un impacto directo y considerable de estos factores meteorológicos sobre la dispersión de las partículas en la atmósfera urbana. Adicionalmente, el segundo rezago de la radiación solar y la presión atmosférica también mostraron una influencia notable sobre las concentraciones de PM2.5, lo cual indica una relación dinámica y de mediano plazo entre estos elementos y la calidad del aire.

En resumen, los hallazgos del modelo VAR refuerzan la comprensión de las dinámicas temporales y las interdependencias entre variables meteorológicas y la calidad del aire en Bogotá. Este análisis no solo destaca la relevancia de factores como la radiación solar y la velocidad del viento en la dispersión de PM2.5, sino que también ofrece perspectivas cruciales para la formulación de políticas públicas orientadas a la mejora sustancial de la calidad del aire en entornos urbanos.

Resultados Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM)

Se aplicó un Modelo de Corrección de Errores Vectorial (VECM) para investigar la dinámica de ajuste a largo plazo y las interacciones entre las variables ambientales y meteorológicas relacionadas con la calidad del aire en Bogotá. Este enfoque metodológico se centró en el análisis

de cómo diversas variables como PM2.5, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión atmosférica coevolucionan dentro de un marco de equilibrio a largo plazo, proporcionando una comprensión más profunda de sus interdependencias.

La prueba de cointegración de Johansen se empleó para verificar la existencia de una o más relaciones de equilibrio a largo plazo entre las series no estacionarias. Los resultados indicaron la presencia de cointegración de rango completo, confirmado por al menos un vector de cointegración, lo que sugiere que las variables comparten una tendencia común de largo plazo, manteniéndolas en un equilibrio dinámico.

Adicionalmente, la aplicación del Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM) reveló relaciones significativas a largo plazo entre las variables estudiadas. Específicamente, se observó que el PM2.5 se ajusta significativamente hacia su equilibrio de largo plazo con sus propios valores rezagados, sugiriendo una fuerte autoregresión dentro de la serie. En cuanto a las interacciones entre el PM2.5 y la temperatura (tmp), las variaciones en la temperatura mostraron un efecto considerable en los niveles de PM2.5, con ajustes significativos observados en los rezagos, subrayando la sensibilidad de PM2.5 a las fluctuaciones térmicas.

También se detectó una relación de equilibrio a largo plazo entre el PM2.5 y la radiación solar (radsolar), con implicaciones directas en cómo la radiación solar puede afectar la concentración de partículas finas. Además, la velocidad del viento (ws) mostró estar cointegrada con el PM2.5, evidenciando que variaciones en la velocidad del viento tienen un impacto directo en la dispersión de estas partículas. Por último, se encontró que los cambios en la presión atmosférica (pressure) tienen una influencia directa en los niveles de PM2.5, con ajustes significativos a largo plazo en sus rezagos.

Finalmente, se realizaron predicciones utilizando el modelo ajustado, permitiendo proyectar el comportamiento futuro de las variables en estudio, basándose en las dinámicas identificadas y la información histórica acumulada. Estas predicciones son fundamentales para la formulación de estrategias preventivas y la toma de decisiones en políticas públicas enfocadas en la mejora continua de la calidad del aire en entornos urbanos.

Resultados Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)

En la sección de resultados de la presente investigación, se examinó la relación entre la calidad del aire, específicamente la concentración de partículas PM2.5, y variables ambientales clave mediante la implementación del Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL). Este modelo fue seleccionado por su capacidad para manejar series temporales, lo cual es crucial para un análisis riguroso en el contexto económico de la contaminación ambiental.

El modelo ARDL formulado para este estudio incluyó la radiación solar (radsolar), la velocidad del viento (ws), la presión atmosférica (pressure) y la temperatura (tmp) como variables independientes. Estas variables fueron normalizadas y diferenciadas adecuadamente para alcanzar la estacionariedad requerida, utilizando un enfoque de búsqueda tipo "grid search" que identificó la necesidad de seis diferenciaciones para cada variable independiente, asegurando así la estabilidad a largo plazo del modelo.

Las predicciones a corto plazo para PM2.5 se realizaron proyectando los valores para los próximos 10 periodos. Este procedimiento no solo validó la precisión del modelo en replicar el comportamiento pasado de la variable dependiente, sino que también proporcionó una herramienta predictiva valiosa para anticipar futuras condiciones de calidad del aire basadas en patrones históricos.

Se aplicó además la prueba de límites para cointegración para evaluar la existencia de equilibrios a corto y largo plazo entre las variables, con resultados significativos ($p\text{-value} = 1e-06$) que refuerzan la presencia de relaciones estables tanto en el corto como en el largo plazo. La interpretación de los coeficientes reveló patrones de interacción significativos entre las variables ambientales y la concentración de PM2.5

- A corto plazo, cada aumento de una unidad en la presión atmosférica (mmHg) se asocia con una disminución de 0.154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM2.5. Cada incremento de un grado Celsius en temperatura reduce PM2.5 en 0.831 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Un aumento de una unidad en radiación solar (W/m^2) incrementa PM2.5 en 0.0048 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cada unidad adicional en velocidad del viento (m/s) reduce PM2.5 en 1.691 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- A largo plazo, por cada unidad de aumento en la presión atmosférica, PM2.5 disminuye en 0.036 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por cada grado de incremento en temperatura, PM2.5 disminuye en 1.914 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Un aumento en radiación solar resulta en un incremento de 0.0109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en

PM2.5. Un aumento en la velocidad del viento se asocia con una reducción de $2.047 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM2.5.

Finalmente, el análisis de residuos incluyó la evaluación de su comportamiento temporal, la función de autocorrelación (ACF), y la comparación de su distribución con una distribución normal teórica. Los residuos se centraron alrededor de cero sin mostrar tendencias claras ni patrones periódicos, lo que indica un modelo bien especificado. Aunque se observó una leve autocorrelación en algunos retrasos, la mayoría no presentó significancia estadística, lo que sugiere que el modelo es adecuado para las proyecciones realizadas. La comparación con la curva de densidad normal confirmó la normalidad aproximada de los residuos, validando así las inferencias estadísticas derivadas del modelo ARDL.

Resultados Random Forest

El análisis realizado mediante el uso del modelo Random Forest para investigar las interacciones entre diversas variables atmosféricas y los niveles de PM2.5 en Bogotá, un contaminante de particular interés debido a sus significativos impactos tanto en la salud pública como en el medio ambiente.

Para este estudio, se construyeron dos estructuras de datos principales: una serie temporal que contiene exclusivamente los valores de PM2.5 y un DataFrame para las variables explicativas, que incluyen temperatura, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento. Estas variables fueron transformadas en índices temporales y arreglos NumPy para facilitar su manipulación durante el análisis. El conjunto de datos fue dividido en subconjuntos de entrenamiento y prueba, asignando el 90% de los datos al entrenamiento y el 10% restante a la validación.

El modelo Random Forest fue configurado y entrenado utilizando técnicas avanzadas como redes neuronales LSTM, aptas para manejar dependencias a largo plazo en datos secuenciales. La configuración del modelo incluyó capas densas y ajustes en parámetros esenciales como la función de activación y el optimizador, con el objetivo de minimizar el error cuadrático medio y mejorar el desempeño predictivo del modelo. Tras 50 épocas de entrenamiento, se procedió a evaluar la capacidad predictiva del modelo sobre el conjunto de prueba.

Los resultados del modelo se visualizaron en un gráfico que incorpora las series temporales de entrenamiento, las predicciones y los valores reales de PM2.5. El análisis revela que, aunque el

modelo Random Forest es eficaz para capturar las relaciones no lineales y complejas entre las variables, enfrenta desafíos al predecir situaciones de alta volatilidad y picos extremos. Esta limitación podría atribuirse a la inherente dificultad de los modelos basados en árboles de decisión para anticipar fluctuaciones abruptas sin información contextual adicional o ajustes específicos en la configuración del modelo. Mientras que el modelo demuestra una capacidad considerable para replicar la variabilidad media, su precisión en eventos extremos permanece como un área de mejora potencial.

Conclusiones y recomendaciones

A lo largo de este estudio, se han analizado exhaustivamente los niveles de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bogotá, con especial enfoque en el dióxido de nitrógeno (NO₂), las partículas menores a 2.5 y 10 micras (PM_{2.5} y PM₁₀), debido a su notable influencia en la calidad del aire y su impacto directo en la salud pública. Los resultados obtenidos indican una situación alarmante donde los niveles de estos contaminantes superan frecuentemente los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), reflejando una preocupante tendencia de deterioro en la calidad del aire que requiere una respuesta urgente y efectiva de las políticas públicas y acciones de mitigación ambiental.

La prevalencia de estos contaminantes en múltiples zonas de la ciudad destaca la necesidad imperativa de adoptar medidas más rigurosas y efectivas para controlar las fuentes de emisión. Es particularmente crítico en áreas como Carvajal, Kennedy y Fontibon, donde se registran los niveles más elevados y consistentemente peligrosos para la salud humana. La implementación de tecnologías más limpias, regulación más estricta de emisiones industriales y vehiculares, así como la promoción de medios de transporte menos contaminantes, son estrategias fundamentales que deben ser parte de un enfoque holístico para mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Adicionalmente, el análisis temporal de la contaminación revela un patrón de aumento durante la semana laboral con una disminución durante el fin de semana, lo que sugiere que las actividades humanas, como el tráfico vehicular y la producción industrial, juegan un rol significativo en la variabilidad de los niveles de contaminantes. Este patrón destaca la importancia de dirigir las políticas de reducción de emisiones específicamente en los días laborales para maximizar su efectividad.

A nivel anual, el aumento progresivo de los contaminantes desde 2021 hasta 2024 es una señal clara de que las medidas actuales son insuficientes para contrarrestar las fuentes de contaminación. Esta tendencia ascendente exige una revisión y fortalecimiento de las políticas y estrategias ambientales existentes, especialmente en lo que respecta a la regulación de las emisiones y la promoción de prácticas sostenibles.

Sumado a esto, el estudio subraya la importancia de mantener y expandir los esfuerzos de monitoreo de la calidad del aire. Este no solo sirve para informar a la población sobre los riesgos para la salud, sino que también es fundamental para evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas y ajustar las políticas conforme sea necesario. La continuidad de estas actividades es esencial para asegurar un ambiente saludable y sostenible para todas las generaciones futuras en Bogotá.

Los hallazgos de este estudio enfatizan la necesidad urgente de acción política y comunitaria coordinada para mitigar la contaminación del aire en Bogotá. A través de la implementación de políticas integradas y estrategias efectivas, podemos aspirar a una mejora significativa en la calidad del aire y, por ende, en la calidad de vida de los bogotanos.

Los datos evidencian una necesidad crítica de focalizar esfuerzos en la mitigación de la contaminación, especialmente en los meses de mayor riesgo, mediante políticas de control de emisiones y promoción de prácticas sostenibles. Estas medidas son esenciales para proteger la salud pública y mejorar la calidad del aire en Bogotá, asegurando un entorno más saludable para todos sus habitantes. La implementación de estrategias de monitoreo continuo y de intervenciones basadas en datos temporales específicos puede ser clave para enfrentar este desafío ambiental.

Modelo Probit

El modelo Probit implementado en este estudio ha permitido evaluar de manera efectiva la probabilidad de que las concentraciones de los contaminantes PM2.5, PM10 y NO2 excedan los umbrales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la ciudad de Bogotá.

Los resultados obtenidos del modelo Probit destacan varios hallazgos críticos y nos permiten derivar las siguientes conclusiones:

- La relación significativa entre las condiciones meteorológicas y las excedencias de contaminantes es clara. Variables como la temperatura y la velocidad del viento han mostrado tener un impacto directo en la concentración de contaminantes. Específicamente, incrementos en la temperatura tienden a aumentar la probabilidad de excedencias de PM2.5, mientras que velocidades de viento más altas reducen significativamente esta probabilidad, evidenciando su papel en la dispersión de partículas atmosféricas.
- El análisis anual indica un incremento preocupante en la probabilidad de excedencias a lo largo del tiempo, con un notable aumento en los años recientes. Este patrón puede estar indicando un deterioro progresivo de la calidad del aire o una disminución en la efectividad de las políticas de control existentes.
- Los insights proporcionados por el modelo Probit deben ser considerados críticamente por los formuladores de políticas y autoridades de salud pública. La habilidad para prever días con alta probabilidad de excedencia de contaminantes puede facilitar la implementación de medidas preventivas específicas, tales como restricciones en actividades industriales y de tráfico, que podrían mitigar los niveles de contaminación y proteger la salud de la población.

El modelo Probit ha demostrado ser un enfoque robusto para entender las dinámicas de la calidad del aire en Bogotá. La modelación de la probabilidad de excedencias mediante este enfoque ha proporcionado una base cuantitativa sólida para la toma de decisiones informadas en el ámbito de la política ambiental y la salud pública. Futuras investigaciones deberían continuar explorando esta metodología, expandiendo la inclusión de más variables y refinando las estrategias de modelación para capturar aún más precisamente las complejidades de la contaminación atmosférica en entornos urbanos.

Modelo de Vectores Autorregresivos (VAR)

El modelo de Vectores Autorregresivos (VAR) ha desempeñado un papel fundamental en este estudio para comprender las complejidades dinámicas y las interdependencias entre variables ambientales y meteorológicas que influyen en los niveles de contaminación por partículas PM2.5 en Bogotá. Este enfoque metodológico ha permitido una evaluación rigurosa de cómo variables específicas contribuyen a las fluctuaciones en la concentración de PM2.5, considerando sus propios efectos pasados, así como los efectos cruzados de otros factores relevantes.

Los resultados obtenidos del modelo VAR destacan varios hallazgos y nos permiten derivar las siguientes conclusiones:

- El proceso de diferenciación demostró ser efectivo para transformar las series temporales en estacionarias, una condición necesaria para la aplicación del modelo VAR. La validación de la estacionariedad mediante la prueba de Dickey-Fuller aumentó la confiabilidad de las inferencias realizadas a partir del modelo, asegurando que las relaciones identificadas sean genuinas y no producto de artefactos estadísticos.
- Los resultados obtenidos han subrayado la importancia de las variables meteorológicas seleccionadas. De manera particular, la radiación solar y la velocidad del viento han mostrado una influencia significativa en las concentraciones de PM_{2.5}. El efecto particularmente fuerte del primer y segundo rezago de estas variables enfatiza cómo condiciones meteorológicas específicas del día anterior y dos días antes continúan afectando la calidad del aire. Esto refleja una dependencia temporal en la que eventos pasados tienen un rol continuo y significativo en la determinación de las condiciones actuales de la calidad del aire.
- Las conclusiones del modelo VAR tienen implicaciones directas para la formulación de políticas de salud pública y ambientales. La identificación de las variables meteorológicas como predictores significativos de las concentraciones de PM_{2.5} puede facilitar la creación de modelos predictivos más precisos, que a su vez pueden ser utilizados para desarrollar alertas tempranas y medidas de mitigación más efectivas. Adicionalmente, estos hallazgos sugieren la necesidad de monitoreo continuo y de integración de datos meteorológicos en las estrategias de manejo de la calidad del aire.

Se recomienda que estudios futuros expandan la aplicación del modelo VAR para incluir más variables ambientales y explorar interacciones más complejas a través de modelos VAR estructurales o modelos de corrección de errores más avanzados que puedan ofrecer una comprensión aún más profunda de las dinámicas a largo plazo y las relaciones de equilibrio entre estas variables.

Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM)

El Modelo de Corrección de Error Vectorial (VECM) utilizado en esta investigación ha proporcionado una comprensión detallada y rigurosa de las relaciones a largo plazo entre las variables ambientales y meteorológicas que influyen en las concentraciones de PM_{2.5} en Bogotá. Este enfoque ha sido esencial para desentrañar las interacciones dinámicas y los mecanismos de ajuste que mantienen el equilibrio a largo plazo entre estas variables.

Los resultados obtenidos del modelo VECM destacan varios hallazgos y nos permiten derivar las siguientes conclusiones:

- Las interacciones significativas identificadas en el modelo, particularmente entre PM_{2.5} y sus propios rezagos, así como con la temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión atmosférica, subrayan la complejidad de los factores ambientales que afectan la calidad del aire. Estas relaciones destacan cómo los cambios en una variable pueden tener repercusiones duraderas sobre las concentraciones de PM_{2.5}, evidenciando un proceso de ajuste continuo hacia el equilibrio.
- La temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento han demostrado tener un ajuste a largo plazo significativo con las concentraciones de PM_{2.5}, reforzando la teoría de que estas condiciones meteorológicas juegan un papel crucial en la dispersión y acumulación de partículas. Esto es particularmente relevante para la formulación de políticas públicas, ya que sugiere que intervenciones que modifiquen estos factores podrían ser efectivas para gestionar la calidad del aire.
- El entendimiento de estas dinámicas proporciona una base sólida para el diseño de estrategias de mitigación más efectivas. Los formuladores de políticas podrían utilizar estos resultados para prever y combatir episodios de alta contaminación, implementando medidas que ajusten factores meteorológicos clave en momentos críticos.

Aunque el modelo VECM ha proporcionado valiosos insights, la ausencia de contribuciones significativas de las variables al equilibrio de largo plazo en el término de intercepción sugiere que otros factores externos, posiblemente socioeconómicos o adicionales variables ambientales, podrían estar influyendo en las dinámicas de corto plazo. Se recomienda que futuras investigaciones deberían considerar la inclusión de estas variables para obtener un modelo más exhaustivo que capture todas las fuerzas relevantes que afectan la calidad del aire.

Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)

El análisis mediante el modelo ARDL ha permitido una exploración exhaustiva de las interacciones entre las concentraciones de PM2.5 y variables ambientales clave en Bogotá, proporcionando valiosas perspectivas sobre la dinámica tanto a corto como a largo plazo de estos factores. La robustez del modelo ARDL para manejar series temporales posiblemente no estacionarias en sus niveles, pero estacionarias en primeras diferencias, ha sido fundamental en la evaluación rigurosa de estas relaciones.

Los resultados obtenidos del modelo ARDL destacan varios hallazgos y nos permiten derivar las siguientes conclusiones:

- La implementación del modelo ARDL ha demostrado ser efectiva al identificar y cuantificar las relaciones dinámicas entre la radiación solar, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la temperatura y las concentraciones de PM2.5. Las pruebas de cointegración, específicamente el enfoque de prueba de límites, confirmaron la existencia de equilibrios significativos tanto a corto como a largo plazo, lo que subraya la relevancia de estos factores en la determinación de la calidad del aire en la ciudad.
- Los resultados indican que tanto las condiciones meteorológicas como la composición atmosférica juegan roles cruciales en la modulación de los niveles de PM2.5. A corto plazo, variables como la velocidad del viento y la temperatura mostraron un impacto significativo en la reducción de PM2.5, mientras que la radiación solar presentó un efecto contrario, aumentando levemente las concentraciones. Estos efectos se mantienen, aunque con magnitudes ajustadas, en las interacciones a largo plazo, evidenciando una influencia persistente y sostenida de estos factores sobre la contaminación.
- La capacidad de prever las variaciones en PM2.5 en respuesta a cambios en variables meteorológicas ofrece una herramienta invaluable para la planificación y ejecución de políticas ambientales. Las autoridades podrían utilizar estos modelos para anticipar episodios de alta contaminación y aplicar medidas preventivas más efectivas, como la regulación de actividades industriales y restricciones de tráfico durante eventos de alta radiación solar o baja velocidad del viento, dado que, según el modelo, incrementan las concentraciones de PM2.5.

- La evaluación de los residuos del modelo ARDL ha revelado un buen ajuste, con residuos que no presentan autocorrelación significativa ni desviaciones de la normalidad, lo que sugiere que el modelo captura adecuadamente la mayoría de las dinámicas subyacentes entre las variables estudiadas. Sin embargo, la leve autocorrelación detectada en algunos retrasos sugiere que podrían explorarse extensiones del modelo o la inclusión de otras variables para capturar aún más la complejidad de las relaciones ambientales.

Se recomienda la extensión de este estudio para incluir más variables que podrían influir en la calidad del aire, como los niveles de emisiones industriales y vehiculares, así como factores socioeconómicos que podrían interactuar de manera significativa con las variables meteorológicas y ambientales ya estudiadas.

Modelo Random Forest

El modelo Random Forest ha sido empleado en esta investigación para analizar las relaciones entre variables atmosféricas diversas y los niveles de PM2.5 en Bogotá. Este modelo se ha destacado por su capacidad para manejar complejidades no lineales entre múltiples predictores y la variable de respuesta.

Los resultados obtenidos del modelo Random Forest nos permiten derivar la siguiente conclusión:

- Las visualizaciones de las predicciones contra los valores reales revelaron que, mientras que el modelo puede capturar la variabilidad media y las tendencias estacionales, su rendimiento decrece en situaciones de alta volatilidad. Esto sugiere que el Random Forest, a pesar de su robustez en contextos de variabilidad compleja, puede no ser completamente adecuado para predecir con precisión eventos extremos en datos altamente volátiles como los niveles de PM2.5.

Al comparar el modelo Random Forest con el modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) en este contexto de estudio, el modelo ARDL muestra ventajas significativas:

- Capacidad de Análisis a Largo Plazo: A diferencia del Random Forest, el ARDL es capaz de establecer y cuantificar relaciones a largo plazo y de equilibrio entre las variables. Esto es especialmente útil en estudios de contaminación donde las interacciones temporales prolongadas y los efectos acumulativos son críticos.

- Interpretación Económica y Estadística: El modelo ARDL permite una interpretación más directa de los impactos a corto y largo plazo de las variables sobre PM2.5, ofreciendo insights más detallados y económicamente significativos que son esenciales para la formulación de políticas públicas.
- Precisión en la Predicción de Eventos Extremos: Aunque el ARDL también enfrenta desafíos en predecir picos extremos, su estructura modelística y las pruebas de cointegración proporcionan un marco más riguroso para ajustar el modelo en presencia de volatilidades inesperadas, comparado con Random Forest que puede no capturar tan precisamente estas anomalías.

En conclusión, aunque el modelo Random Forest es invaluable para capturar complejidades en los datos y relaciones no lineales entre múltiples predictores, el modelo ARDL se destaca por su capacidad para analizar dinámicas de ajuste a largo plazo y proporcionar una base más sólida para decisiones económicas y políticas en estudios ambientales. Esta superioridad del ARDL se manifiesta especialmente en aplicaciones donde la interpretación y la precisión de las relaciones temporales a largo plazo son fundamentales.

Basado en las conclusiones derivadas de este exhaustivo estudio sobre la calidad del aire en Bogotá, se proponen las siguientes recomendaciones estratégicas para mejorar la gestión ambiental y mitigar los niveles de contaminación por PM2.5, PM10 y NO2, con el objetivo de proteger la salud pública y asegurar un entorno más sostenible:

1. Implementación de Tecnología Verde en Industrias:

Se recomienda que el gobierno local y las entidades reguladoras intensifiquen la implementación de tecnologías más limpias en sectores industriales clave. Esto podría incluir incentivos para la adopción de filtros avanzados, prácticas de manufactura que reduzcan las emisiones, y la renovación de maquinaria para cumplir con estándares ambientales más estrictos.

2. Ampliación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire: Para una evaluación más precisa y continua de la calidad del aire, es crucial expandir la red de monitoreo en Bogotá. Esto debería incluir la instalación de más estaciones en áreas críticas y la utilización de tecnología de sensores remotos para obtener datos en tiempo real, lo que permitirá una respuesta más rápida y eficaz a los picos de contaminación.

3. Desarrollo de Modelos Predictivos para la Gestión de Emergencias Ambientales: Utilizando los modelos econométricos y estadísticos validados en este estudio, como el ARDL y el modelo Probit, se deberían desarrollar sistemas predictivos que puedan alertar sobre futuras excedencias de contaminantes. Estos sistemas ayudarían a implementar acciones preventivas, como alertas a la población y restricciones temporales en actividades industriales y tráfico vehicular durante eventos de alta contaminación previstos.
4. Políticas Públicas para la Promoción de Transporte Sostenible: Fomentar el uso de transporte público y vehículos no contaminantes mediante políticas de subsidios, la construcción de infraestructura adecuada para bicicletas y vehículos eléctricos, y la imposición de tarifas congestionadas en zonas críticas, puede reducir significativamente las emisiones de los vehículos, una de las principales fuentes de contaminación urbana.
5. Educación y Concientización Pública: Programas de educación y concienciación sobre la calidad del aire y su impacto en la salud deben ser prioritarios. Estos programas pueden incluir campañas informativas sobre las medidas que los individuos pueden tomar para reducir su exposición a contaminantes y su contribución personal a la emisión de contaminantes.
6. Colaboración Intersectorial para la Sostenibilidad Ambiental: Promover la colaboración entre el gobierno, la academia, la industria y las comunidades para desarrollar estrategias integradas que aborden las fuentes de contaminación desde múltiples ángulos. Esto podría incluir proyectos de investigación conjunta, programas de responsabilidad social empresarial enfocados en la sostenibilidad ambiental, y foros comunitarios para discutir y planificar mejoras locales.
7. Revisión Periódica y Actualización de Normativas Ambientales: Las políticas y regulaciones existentes deben revisarse y actualizarse regularmente para adaptarse a los nuevos descubrimientos científicos y a las tendencias tecnológicas en el manejo de la contaminación. Esto asegurará que las estrategias de mitigación sean efectivas y estén alineadas con los estándares internacionales más recientes.
8. Implementación de Peajes Urbanos en Zonas Críticas: Para abordar la problemática de la alta concentración de contaminantes atmosféricos en áreas específicas de Bogotá, como Carvajal, Kennedy y Fontibón, se recomienda la aplicación de peajes urbanos. Esta medida, según el estudio de la Universidad Católica (Gaviria-Mondragón, 2023), ha demostrado su

eficacia al reducir hasta en un 24.3% las concentraciones de material particulado y disminuir la congestión vehicular hasta en un 30%. Al limitar el número de vehículos en estas zonas críticas, se facilitará una notable reducción en los niveles de NO₂, contribuyendo así a un ambiente urbano más saludable y menos contaminado. Este tipo de intervención no solo mejora la calidad del aire, sino que también optimiza la movilidad urbana, creando un entorno más sostenible y habitable.

9. Priorización de la Pavimentación en Áreas de Alta Concentración de Contaminantes: Se urge dar prioridad a la pavimentación de las calles en zonas de Bogotá con altas concentraciones de contaminantes, particularmente en Carvajal, Kennedy y Fontibón. Las investigaciones indican que la pavimentación de calles puede tener un impacto significativamente positivo en la calidad del aire, con reducciones de hasta el 95% en las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ provenientes de la resuspensión de partículas, y una disminución superior al 37% en las concentraciones derivadas de fuentes de combustión (Pinto Herrera & Méndez Espinosa, 2015). La pavimentación eficaz minimiza la cantidad de material particulado que se levanta debido al tráfico sobre superficies no pavimentadas, especialmente en áreas donde el tránsito de vehículos es intenso. Esta medida no solo fomenta una mejora directa en la calidad del aire, sino que también contribuye a una mayor eficiencia en el tráfico y a una reducción de los costos de mantenimiento vehicular a largo plazo.
10. Además, es imperativo que la Alcaldía y las autoridades competentes consideren con especial atención las zonas de Carvajal, Kennedy y Fontibón al planificar y autorizar proyectos de construcción en estos sectores o en áreas circundantes. Investigaciones realizadas por entidades académicas como la Universidad Inca Garcilaso de la Vega (Rojas Revolo & Huaman Salazar, 2015) han demostrado que la presencia excesiva de material particulado, especialmente derivado del uso de cemento y otros componentes constructivos, contribuye significativamente a exceder los límites máximos permisibles de contaminación. En este contexto, se hace esencial que la Alcaldía implemente y refuerce normativas que regulen no solo la cantidad, sino también los métodos de manejo de estos materiales. Sumado a esto, se recomienda encarecidamente establecer protocolos rigurosos para el manejo adecuado de los materiales de construcción y para la mitigación del polvo en las zonas de obra. Entre las medidas efectivas se debe incluir la utilización inmediata de

sistemas de aspersión de agua en los sitios de construcción, lo cual ayuda a minimizar la dispersión de partículas en el aire. Esta estrategia no solo contribuirá a reducir los niveles de contaminación durante los periodos de construcción, sino que también ayudará a proteger la salud pública y mejorar la calidad del aire en estas comunidades.

Por lo tanto, urge que estas recomendaciones sean incorporadas en las políticas públicas y regulaciones urbanísticas, garantizando que las construcciones futuras contribuyan al bienestar de la ciudadanía y al desarrollo sostenible de Bogotá. Es crucial que se adopten estas prácticas no solo como medidas temporales, sino como parte de un enfoque integral y permanente hacia la gestión ambiental en áreas urbanas densamente pobladas y altamente susceptibles a problemas de contaminación atmosférica.

Implementando estas recomendaciones, Bogotá puede esperar no solo una mejora significativa en la calidad del aire, sino también un avance hacia un futuro más sostenible y saludable para todos sus residentes.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (23 de 03 de 2024). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). *Información tecnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Bonilla Londoño, J. A., Cárdenas Campo, J. C., Helo, J., Laajaj, R., Maldonado, J. H., Marco, J., & Vélez, M. A. (2022). *La agenda ambiental como parte del modelo económico de Colombia*. Nota Macroeconómica, Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá. Obtenido de <http://hdl.handle.net/1992/57121>
- Gaviria-Mondragón, K. T. (2023). *Estudio sobre la implementación de peajes urbanos para realizar un diagnóstico de las implicaciones ambientales en la ciudad de Bogotá – Colombia*. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/31129>
- IQ AIR. (2023). *World Air Quality Report 2023*. Goldach. Obtenido de <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>
- Mauricio, G., Juliana, C., & Eduardo, B. (2007). *Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-49932007000200011&script=sci_arttext
- Pinto Herrera, L. C., & Méndez Espinosa, J. F. (2015). *Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí - Ciudad Bolívar, Bogotá D.C*. Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/325/

Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. (01 de 06 de 2024). *Reporte de estaciones*. Recuperado el 01 de 06 de 2024, de <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/stationreport>

Rodríguez Camargo, L. A., Sierra Parada, R. J., & Blanco Becerra, L. C. (2020). *Spatial analysis of PM_{2.5} concentrations in Bogotá according to the World Health Organization air quality guidelines for cardiopulmonary diseases, 2014-2015*. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, Bogotá. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-41572020000100137&script=sci_arttext

Rojas Revolo, R. D., & Huaman Salazar, P. E. (2015). *Determinación de material particulado en fracción respirable en construcciones del distrito de Jesús María*. Universidad Inca Garcilaso de la Vega, Lima. Obtenido de <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/1292>

Siber. (01 de 06 de 2024). *Niveles recomendados de CO₂, temperatura y humedad*. Obtenido de <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/niveles-recomendados-co2-temperatura/#:~:text=Los%20diferentes%20estudios%20de%20referencia,ppm%20y%20las%20800%20ppm>.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.

Anexos

myday	day	month	year
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min.
:2021			
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st
Qu.:2021			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median
:2022			
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean
:2022			
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd
Qu.:2023			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.
:2024			

dow	o3	no2	pm25	
Min. :1.000	Min. : 1.738	Min. : 2.324	Min. : 2.417	
1st Qu.:2.000	1st Qu.: 7.862	1st Qu.: 7.110	1st Qu.: 9.167	
Median :4.000	Median :10.329	Median : 9.296	Median :13.250	
Mean :4.001	Mean :11.015	Mean : 9.960	Mean :14.373	
3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:13.604	3rd Qu.:12.369	3rd Qu.:18.333	
Max. :7.000	Max. :35.133	Max. :27.857	Max. :44.000	
	NA's :34	NA's :63	NA's :15	

co	so2	pm10	bc	tmp
Min. :0.0625	Mode:logical	Min. :11.25	Mode:logical	Min.
:11.64				
1st Qu.:0.2167	NA's:1247	1st Qu.:20.98	NA's:1247	1st
Qu.:14.31				
Median :0.3125		Median :26.75		Median
:14.97				
Mean :0.3265		Mean :28.02		Mean
:14.97				
3rd Qu.:0.4250		3rd Qu.:32.90		3rd
Qu.:15.59				
Max. :0.8111		Max. :69.67		Max.
:17.93				
NA's :170		NA's :40		NA's :7

rh	rain	radsolar	co2
Min. :45.27	Min. :0.000000	Min. : 8.333	Mode:logical
1st Qu.:65.80	1st Qu.:0.000000	1st Qu.:122.771	NA's:1247
Median :68.36	Median :0.008333	Median :156.375	
Mean :68.66	Mean :0.115343	Mean :160.024	
3rd Qu.:71.41	3rd Qu.:0.095833	3rd Qu.:193.875	
Max. :84.28	Max. :2.183333	Max. :330.500	
NA's :7	NA's :24	NA's :7	

pressure	ws
Min. :561.7	Min. :0.3208
1st Qu.:563.4	1st Qu.:1.0333
Median :564.0	Median :1.2118
Mean :563.9	Mean :1.2367
3rd Qu.:564.4	3rd Qu.:1.4125
Max. :566.2	Max. :3.3792
NA's :7	NA's :142

Salida de la consola 1. Estadísticas descriptivas Guaymaral

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min.
:2021 Min. :1.000 Min. : 2.022	Min. : 1.550	Min. : 1.958	
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st
Qu.:2021 1st Qu.:2.000 1st Qu.: 9.142	1st Qu.: 9.438	1st Qu.:	
7.750			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median
:2022 Median :4.000 Median :12.550	Median :14.317	Median :13.083	
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean
:2022 Mean :4.001 Mean :13.071	Mean :15.127	Mean :14.267	
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd
Qu.:2023 3rd Qu.:6.000 3rd Qu.:16.271	3rd Qu.:20.275	3rd	
Qu.:19.375			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.
:2024 Max. :7.000 Max. :30.921	Max. :40.450	Max. :48.875	
NA's :394	NA's :218	NA's :5	
co	so2	pm10	bc
rh	rain	radiosolar	co2
Min. :0.2000	Mode:logical	Min. : 3.292	Mode:logical
Mode:logical	Mode:logical	Min. :0.000000	Mode:logical
Mode:logical			
1st Qu.:0.5604	NA's:1247	1st Qu.:12.528	NA's:1247
NA's:1247	NA's:1247	1st Qu.:0.000000	NA's:1247
Median :0.7083		Median :20.667	
Median :0.008333			
Mean :0.7371		Mean :22.239	
Mean :0.134503			
3rd Qu.:0.8917		3rd Qu.:29.306	
3rd Qu.:0.108333			
Max. :1.7044		Max. :77.833	
Max. :2.166667			
NA's :32		NA's :8	
pressure	ws		
Mode:logical	Min. :0.2917		
NA's:1247	1st Qu.:0.9583		
	Median :1.2208		
	Mean :1.2350		
	3rd Qu.:1.4729		
	Max. :2.6417		

Salida de la consola 2. Estadísticas descriptivas Min Ambiente

myday		day		month		year
dow	o3	no2	pm25			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. :1.000	Min. :0.250	Min. :2.579	Min. :1.750		
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.:2.000	1st Qu.:7.769	1st Qu.:9.876	1st Qu.:9.614		
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :4.000	Median :10.642	Median :12.006	Median :14.045		
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :4.001	Mean :11.183	Mean :12.085	Mean :15.154		
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:13.783	3rd Qu.:14.121	3rd Qu.:19.000		
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :7.000	Max. :31.488	Max. :24.106	Max. :44.792		
NA's :76	NA's :29	NA's :51				
co	so2	pm10	bc			
tmp	rh	rain	radsolar	co2		
Min. :0.2417	Min. :0.0400	Min. :9.00	Mode:logical	Min. :10.67		
Mode:logical	Min. :0.000000	Mode:logical	Mode:logical	Mode:logical		
1st Qu.:0.3917	1st Qu.:0.6292	1st Qu.:22.85	NA's:1247	1st Qu.:14.10		
NA's:1247	1st Qu.:0.000000	NA's:1247	NA's:1247	NA's:1247		
Median :0.4396	Median :1.1083	Median :31.34		Median :14.76		
Mean :0.4515	Mean :1.3672	Mean :33.39		Mean :14.76		
3rd Qu.:0.5000	3rd Qu.:1.7312	3rd Qu.:41.63		3rd Qu.:15.37		
Max. :0.8833	Max. :7.8083	Max. :80.61		Max. :23.20		
NA's :23	NA's :128	NA's :31		NA's :25		
pressure	ws					
Mode:logical	Min. :0.5208					
NA's:1247	1st Qu.:1.0375					
	Median :1.3458					
	Mean :1.4205					
	3rd Qu.:1.7375					
	Max. :3.2792					
	NA's :25					

Salida de la consola 3. Estadísticas descriptivas Suba

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. :
:2021 Min. :1.000 Min. : 0.7708	Min. : 1.450	Min. :	
0.3792			
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st
Qu.:2021 1st Qu.:2.000 1st Qu.:13.3625	1st Qu.: 5.290	1st Qu.:	
5.7530			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median
:2022 Median :4.000 Median :16.8167	Median : 8.793	Median	
:10.1658			
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean
:2022 Mean :4.001 Mean :17.9344	Mean :10.375	Mean	
:11.6642			
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd
Qu.:2023 3rd Qu.:6.000 3rd Qu.:21.8875	3rd Qu.:14.820	3rd	
Qu.:16.3229			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.
:2024 Max. :7.000 Max. :58.2923	Max. :31.846	Max.	
:43.6667			
NA's :68	NA's :37	NA's :181	
co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. : 0.1000	Min. :0.0750	Min. : 3.346	Mode:logical
: 11.53	Mode:logical	Min. : 0.00000	Mode:logical
1st Qu.: 0.3010	1st Qu.:0.4699	1st Qu.:13.196	NA's:1247
Qu.: 13.79	NA's:1247	1st Qu.: 0.00000	NA's:1247
Median : 0.4152	Median :0.7250	Median :20.075	
Median : 14.39		Median : 0.00417	
Mean : 0.4655	Mean :0.7828	Mean :22.097	Mean
: 14.52	Mean : 0.13708		
3rd Qu.: 0.5750	3rd Qu.:1.0042	3rd Qu.:29.277	3rd
Qu.: 14.96		3rd Qu.: 0.08333	
Max. :15.7917	Max. :3.8458	Max. :62.809	Max.
:205.33	Max. :15.67083		
NA's :1	NA's :337	NA's :158	
NA's :133			
pressure	ws		
Mode:logical	Min. :0.3958		
NA's:1247	1st Qu.:0.9125		
	Median :1.2375		
	Mean :1.2907		
	3rd Qu.:1.5750		
	Max. :7.3417		

Salida de la consola 4. Estadísticas descriptivas Usaquén

myday		day		month		year
dow	o3	no2	pm25			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. :1.000	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. : 1.042		
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.:2.000	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.: 9.178		
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :4.000	Median :16.00	Median : 6.000	Median :14.255		
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :4.001	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :15.008		
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:19.458		
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :7.000	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :50.833		
NA's :14	NA's :19	NA's :29				
co	so2	pm10	bc			
tmp	rh	rain	radsolar	co2		
Min. :0.09167	Mode:logical	Min. : 4.575	Mode:logical	Min. :11.77		
1st Qu.:0.53182	NA's:1247	1st Qu.:16.113	NA's:1247	1st Qu.:13.88		
Median :0.71667		Median :24.124		Median :14.55		
Mean :0.74193		Mean :25.305		Mean :14.75		
3rd Qu.:0.92857		3rd Qu.:32.654		3rd Qu.:15.41		
Max. :1.59500		Max. :71.144		Max. :18.79		
NA's :94		NA's :15		NA's :7		
pressure	ws					
Min. :561.9	Min. :0.7667					
1st Qu.:563.5	1st Qu.:1.4500					
Median :564.0	Median :1.7917					
Mean :564.0	Mean :1.7971					
3rd Qu.:564.5	3rd Qu.:2.1125					
Max. :566.3	Max. :3.3917					
NA's :7	NA's :122					

Salida de la consola 5. Estadísticas descriptivas Las Ferias

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. :2021
Min. :1.000	Min. : 1.100	Min. : 3.054	Min. : 0.4167
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.:2021
1st Qu.:2.000	1st Qu.: 6.686	1st Qu.: 8.355	1st Qu.:6.5896
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median :2022
Median :4.000	Median : 9.723	Median :10.967	Median :11.1458
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :2022
Mean :4.001	Mean :10.262	Mean :12.310	Mean :12.8580
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:2023
3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:13.299	3rd Qu.:15.746	3rd Qu.:18.2500
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :2024
Max. :7.000	Max. :27.637	Max. :32.871	Max. :46.7692
NA's :203	NA's :6	NA's :13	
co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. :0.1750	Mode:logical	Min. : 4.625	Min. :0.4833
:10.35	Min. :37.33	Min. :0.00000	Min. : 0.0
1st Qu.:0.3792	NA's:1247	1st Qu.:14.084	1st Qu.:1.3281
1st Qu.:13.22	1st Qu.:65.65	1st Qu.:0.00000	1st Qu.:115.1
Median :0.4708	Median :20.885	Median :1.9146	Median :1247
:13.85	Median :69.62	Median :0.01307	Median :153.0
Mean :0.4964	Mean :23.158	Mean :2.1471	Mean :159.5
:13.88	Mean :69.70	Mean :30.522	Mean :2.8321
3rd Qu.:0.5844	3rd Qu.:74.44	3rd Qu.:0.19479	3rd Qu.:199.5
Qu.:14.53	Qu.:0.19479	Qu.:67.458	Qu.:6.0875
Max. :1.2208	Max. :3.70833	Max. :333.0	Max. :1003
:16.58	Max. :91.00	NA's :9	NA's :1003
NA's :155	NA's :10		
NA's :29	NA's :21		
pressure	ws		
Mode:logical	Min. :0.1125		
NA's:1247	1st Qu.:1.1302		
	Median :1.3896		
	Mean :1.3930		
	3rd Qu.:1.6542		
	Max. :2.7583		
	NA's :21		

Salida de la consola 6. Estadísticas descriptivas San Cristóbal

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min.
:2021 Min. :1.000 Min. : 4.287	Min. : 1.621	Min. : 1.292	
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st
Qu.:2021 1st Qu.:2.000 1st Qu.: 9.933	1st Qu.: 9.020	1st	
Qu.:10.958			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median
:2022 Median :4.000 Median :13.056	Median :12.642	Median :16.696	
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean
:2022 Mean :4.001 Mean :13.820	Mean :13.597	Mean :17.625	
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd
Qu.:2023 3rd Qu.:6.000 3rd Qu.:16.798	3rd Qu.:17.433	3rd	
Qu.:23.375			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.
:2024 Max. :7.000 Max. :35.837	Max. :35.829	Max. :58.000	
NA's :53	NA's :72	NA's :14	
co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. :0.07917	Min. :0.100	Min. : 4.583	Min. : 1.054
Min. : 8.85	Min. :31.61	Min. :0.000000	Min. : 0.0
1st Qu.:0.64583	1st Qu.:1.500	1st Qu.: 23.730	1st Qu.: 2.662
Qu.:14.28	1st Qu.:59.15	1st Qu.:0.000000	1st Qu.:119.2
Median :0.81667	Median :1.958	Median : 35.404	Median : 4.098
Median :15.09	Median :62.42	Median :0.004167	Median :150.1
Mean :0.83826	Mean :2.059	Mean : 37.107	Mean : 4.573
Mean :15.10	Mean :62.81	Mean :0.097665	Mean :153.1
3rd Qu.:1.01250	3rd Qu.:2.526	3rd Qu.: 48.731	3rd Qu.: 5.832
Qu.:15.90	3rd Qu.:66.69	3rd Qu.:0.087500	3rd Qu.:185.2
Max. :1.77917	Max. :5.708	Max. :109.625	Max. :13.287
Max. :18.87	Max. :81.66	Max. :1.725000	Max. :296.2
NA's :34	NA's :142	NA's :9	NA's :1003
NA's :205	NA's :4	NA's :4	NA's :4
co2	pressure	ws	
Mode:logical	Min. :561.2	Min. :0.4375	
NA's:1247	1st Qu.:562.9	1st Qu.:0.9958	
	Median :563.3	Median :1.1917	
	Mean :563.3	Mean :1.2106	
	3rd Qu.:563.8	3rd Qu.:1.4042	
	Max. :566.0	Max. :2.1375	
	NA's :4	NA's :14	

Salida de la consola 7. Estadísticas descriptivas Tunal

myday		day		month	year
dow	o3	no2			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min.		
:2021 Min. :1.000	Min. : 0.03333	Min. : 5.367			
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st		
Qu.:2021 1st Qu.:2.000	1st Qu.: 4.05312	1st Qu.:15.791			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median		
:2022 Median :4.000	Median : 5.96473	Median :18.610			
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean		
:2022 Mean :4.001	Mean : 6.37736	Mean :18.579			
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd		
Qu.:2023 3rd Qu.:6.000	3rd Qu.: 8.32411	3rd Qu.:21.320			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.		
:2024 Max. :7.000	Max. :17.15000	Max. :30.350			
NA's :311	NA's :623				
pm25	co	so2	pm10		
bc	tmp	rh	rain	radsolar	
Min. : 2.454	Min. :0.1333	Min. : 0.1050	Min. : 7.118		
Mode:logical	Mode:logical	Mode:logical	Mode:logical	Mode:logical	
1st Qu.:10.500	1st Qu.:0.3292	1st Qu.: 0.8135	1st Qu.:23.420		
NA's:1247	NA's:1247	NA's:1247	NA's:1247	NA's:1247	
Median :15.150	Median :0.4128	Median : 1.2066	Median :33.238		
Mean :15.467	Mean :0.4330	Mean : 1.9332	Mean :34.830		
3rd Qu.:19.414	3rd Qu.:0.5208	3rd Qu.: 2.1623	3rd Qu.:44.192		
Max. :42.767	Max. :1.6250	Max. :44.8792	Max. :90.392		
NA's :150	NA's :63	NA's :101	NA's :78		
co2	pressure	ws			
Mode:logical	Mode:logical	Mode:logical			
NA's:1247	NA's:1247	NA's:1247			

Salida de la consola 8. Estadísticas descriptivas Bolivia

myday		day		month		year
dow	o3	no2	pm25			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. :1.000	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. :10.50		
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.:2.000	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.:28.12		
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :4.000	Median :16.00	Median : 6.000	Median :33.42		
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :4.001	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :34.65		
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:40.62		
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :7.000	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :81.12		
NA's :791	NA's :918	NA's :536				
co	so2	pm10	bc			
tmp	rh	rain	radsolar	co2		
Min. :0.0429	Min. : 0.8208	Min. : 22.88	Mode:logical	Min. :12.67		
1st Qu.:1.5250	1st Qu.: 3.2052	1st Qu.: 57.81	NA's:1247	1st Qu.:15.37		
Median :1.8625	Median : 4.4500	Median : 71.90		Median :16.10		
Mean :1.9090	Mean : 5.3324	Mean : 70.86		Mean :16.09		
3rd Qu.:2.2042	3rd Qu.: 6.2825	3rd Qu.: 83.38		3rd Qu.:16.77		
Max. :4.3833	Max. :20.5250	Max. :140.00		Max. :19.35		
NA's :802	NA's :697	NA's :547		NA's :12		
pressure	ws					
Mode:logical	Min. :0.4062					
NA's:1247	1st Qu.:1.6292					
	Median :1.9426					
	Mean :1.9635					
	3rd Qu.:2.3083					
	Max. :3.5208					
	NA's :261					

Salida de la consola 9. Estadísticas descriptivas Carvajal

myday		day		month		year
dow	o3	no2	pm25			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. :1.000	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. : 0.96		
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.:2.000	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.:13.08		
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :4.000	Median :16.00	Median : 6.000	Median :18.04		
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :4.001	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :19.00		
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:24.06		
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :7.000	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :55.75		
NA's :230	NA's :45	NA's :15				
co	so2	pm10	bc			
tmp	rh	rain	radsolar	co2		
Min. :0.05556	Min. :0.1286	Min. : 6.779	Min. : 1.158			
Min. :12.80	Min. :30.29	Min. :0.00000	Mode:logical			
1st Qu.:0.41250	1st Qu.:1.1287	1st Qu.:25.606	1st Qu.: 3.100	1st Qu.:14.76		
Median :0.53750	Median :1.4771	Median :33.971	Median : 4.250	Median :15.44		
Mean :0.54212	Mean :1.6310	Mean :35.318	Mean : 4.182	Mean :15.45		
3rd Qu.:0.65833	3rd Qu.:1.9156	3rd Qu.:44.675	3rd Qu.: 5.112	3rd Qu.:16.06		
Max. :1.24583	Max. :7.5792	Max. :89.442	Max. :10.325	Max. :18.38		
NA's :51	NA's :47	NA's :8	NA's :1012	NA's :4		
pressure	ws					
Min. :562.5	Min. :0.650					
1st Qu.:564.1	1st Qu.:2.004					
Median :564.6	Median :2.350					
Mean :564.6	Mean :2.368					
3rd Qu.:565.1	3rd Qu.:2.710					
Max. :566.6	Max. :3.883					
NA's :202	NA's :684					

Salida de la consola 10. Estadísticas descriptivas Fontibón

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. :2021
Min. :1.000	Min. : 1.562	Min. : 3.60	Min. : 1.875
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.:2021
1st Qu.:2.000	1st Qu.: 9.446	1st Qu.:16.29	1st Qu.:14.798
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median :2022
Median :4.000	Median :12.887	Median :19.54	Median :20.877
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :2022
Mean :4.001	Mean :13.651	Mean :19.82	Mean :21.300
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:2023
3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:17.073	3rd Qu.:23.39	3rd Qu.:26.801
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :2024
Max. :7.000	Max. :39.608	Max. :39.26	Max. :56.842
NA's :146	NA's :49	NA's :65	
co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. :0.06667	Min. :0.1565	Min. : 10.24	Min. : 2.083
Min. : 9.05	Min. :30.88	Min. :0.0000	Min. : 20.62
: NA			
1st Qu.:0.71667	1st Qu.:1.5583	1st Qu.: 33.44	1st Qu.: 4.513
1st Qu.:14.99	1st Qu.:59.12	1st Qu.:0.0000	1st Qu.:116.54
Median :0.88333	Median :2.1125	Median : 44.12	Median : 5.783
Median :15.70	Median :64.12	Median :0.0000	Median :143.04
: NA			
Mean :0.88361	Mean :2.3020	Mean : 45.68	Mean : 5.789
Mean :15.69	Mean :63.79	Mean :0.0614	Mean :145.64
:NaN			
3rd Qu.:1.04167	3rd Qu.:2.8021	3rd Qu.: 56.49	3rd Qu.: 6.892
3rd Qu.:16.41	3rd Qu.:68.44	3rd Qu.:0.0250	3rd Qu.:173.69
Max. :2.08750	Max. :9.0435	Max. :107.66	Max. :10.188
Max. :20.16	Max. :82.50	Max. :1.6958	Max. :354.50
: NA			
NA's :160	NA's :57	NA's :81	NA's :1006
NA's :44	NA's :44	NA's :582	NA's :56
:1247			
pressure	ws		
Mode:logical	Min. :0.1250		
NA's:1247	1st Qu.:0.6667		
	Median :0.7500		
	Mean :0.7592		
	3rd Qu.:0.8750		
	Max. :1.0000		
	NA's :603		

Salida de la consola 11. Estadísticas descriptivas Kennedy

myday	day	month	year
dow	no2	pm25	
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min.
:2021 Min. :1.000	Min. : 0.4143	Min. : 4.10	Min. : 1.279
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st
Qu.:2021 1st Qu.:2.000	1st Qu.: 5.5334	1st Qu.:15.39	1st
Qu.:10.450			
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :16.00	Median : 6.000	Median
:2022 Median :4.000	Median : 7.8208	Median :19.76	Median :15.963
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean
:2022 Mean :4.001	Mean : 8.5172	Mean :20.16	Mean :16.730
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd
Qu.:2023 3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:10.7458	3rd Qu.:24.52	3rd
Qu.:22.554			
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :31.00	Max. :12.000	Max.
:2024 Max. :7.000	Max. :27.1375	Max. :42.69	Max. :48.429
NA's :4	NA's :57	NA's :18	
co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. :0.1042	Min. :0.2583	Min. : 2.52	Min. : 0.4667
:11.32 Min. :32.42	Min. :0.0000	Min. : 1.857	Mode:logical
1st Qu.:0.5292	1st Qu.:0.8333	1st Qu.:21.07	1st Qu.: 1.4014
Qu.:14.67 1st Qu.:67.04	1st Qu.:0.0000	1st Qu.:128.969	NA's:1247
Median :0.6833	Median :1.1750	Median :29.55	Median : 2.0085
Median :15.57	Median :72.88	Median :0.0042	Median :161.542
Mean :0.7373	Mean :1.2878	Mean :31.03	Mean : 2.3595
:15.46 Mean :72.76	Mean :0.0949	Mean :165.926	Mean
3rd Qu.:0.8707	3rd Qu.:1.6208	3rd Qu.:40.39	3rd Qu.: 2.6958
Qu.:16.32 3rd Qu.:79.04	3rd Qu.:0.0917	3rd Qu.:201.073	3rd
Max. :3.7542	Max. :4.7571	Max. :79.32	Max. :16.7188
:18.36 Max. :96.79	Max. :1.9667	Max. :313.708	Max.
NA's :8	NA's :113	NA's :256	NA's :1005
:103 NA's :334	NA's :335	NA's :315	NA's
pressure	ws		
Min. :561.2	Min. :0.475		
1st Qu.:562.5	1st Qu.:1.508		
Median :563.0	Median :1.742		
Mean :563.0	Mean :1.775		
3rd Qu.:563.5	3rd Qu.:1.994		
Max. :565.3	Max. :3.962		
NA's :315	NA's :244		

Salida de la consola 12. Estadísticas descriptivas Puente Aranda

myday		day		month		year
dow	o3	no2	pm25			
Min. :2021-01-01 00:00:00	Min. :1.000	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. : 0.700		
1st Qu.:2021-11-08 12:00:00	1st Qu.:2.000	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.: 8.097		
Median :2022-09-16 00:00:00	Median :4.000	Median :16.00	Median : 6.000	Median :13.438		
Mean :2022-09-16 00:00:00	Mean :4.001	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :14.191		
3rd Qu.:2023-07-24 12:00:00	3rd Qu.:6.000	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:18.829		
Max. :2024-05-31 00:00:00	Max. :7.000	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :47.611		
NA's :170	NA's :35	NA's :13				
co	so2	pm10	bc			
tmp	rh	rain	radsolar			
Min. :0.1167	Min. :0.04286	Min. : 1.956	Min. : 0.3333			
1st Qu.:0.3817	1st Qu.:0.62917	1st Qu.:15.064	1st Qu.: 1.9137			
Median :0.5125	Median :0.87917	Median :23.404	Median : 3.0146			
Mean :0.5346	Mean :0.96816	Mean :24.131	Mean : 3.4726			
3rd Qu.:0.6583	3rd Qu.:1.18333	3rd Qu.:31.622	3rd Qu.: 4.3181			
Max. :1.5833	Max. :6.56667	Max. :66.905	Max. :14.6409			
NA's :3	NA's :228	NA's :4	NA's :1009			
co2	pressure	ws				
Min. :441.4	Mode:logical	Min. :0.4875				
1st Qu.:487.9	NA's:1247	1st Qu.:1.0458				
Median :506.0		Median :1.2833				
Mean :509.5		Mean :1.3499				
3rd Qu.:528.2		3rd Qu.:1.6125				
Max. :627.2		Max. :2.9792				
NA's :825		NA's :6				

Salida de la consola 13. Estadísticas descriptivas Centro de Alto Rendimiento

myday	day	month	year
dow	o3	no2	pm25
Min. :2021-01-01	Min. : 1.00	Min. : 1.000	Min. :2021
Min. :1.000	Min. : 3.420	Min. : 4.36	Min. : 3.23
1st Qu.:2021-11-08	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 3.000	1st Qu.:2021
Qu.:2.000	1st Qu.: 9.093	1st Qu.:11.86	1st Qu.:11.15
Median :2022-09-16	Median :16.00	Median : 6.000	Median :2022
Median :4.000	Median :11.600	Median :14.73	Median :15.69
Mean :2022-09-16	Mean :15.72	Mean : 6.097	Mean :2022
Mean :4.001	Mean :12.136	Mean :15.10	Mean :16.52
3rd Qu.:2023-07-24	3rd Qu.:23.00	3rd Qu.: 9.000	3rd Qu.:2023
Qu.:6.000	3rd Qu.:14.597	3rd Qu.:18.05	3rd Qu.:20.82
Max. :2024-05-31	Max. :31.00	Max. :12.000	Max. :2024
Max. :7.000	Max. :27.848	Max. :29.46	Max. :48.88

co	so2	pm10	bc
tmp	rh	rain	radsolar
Min. :0.2417	Min. :0.5799	Min. : 6.597	Min. : 1.113
:12.16	Min. :33.70	Min. :0.000000	Min. : 36.43
1st Qu.:0.5065	1st Qu.:1.3045	1st Qu.:23.349	1st Qu.: 2.724
Qu.:14.38	1st Qu.:62.85	1st Qu.:0.001389	1st Qu.:125.15
Median :0.6221	Median :1.6414	Median :30.818	Median : 3.626
Median :15.01	Median :66.79	Median :0.031818	Median :154.60
Mean :0.6380	Mean :1.7835	Mean :31.900	Mean : 3.769
:15.04	Mean :66.88	Mean :0.134569	Mean :155.98
3rd Qu.:0.7431	3rd Qu.:2.0706	3rd Qu.:38.960	3rd Qu.: 4.499
Qu.:15.65	3rd Qu.:71.09	3rd Qu.:0.182005	3rd Qu.:182.99
Max. :1.9417	Max. :8.0799	Max. :77.775	Max. :11.160
:34.79	Max. :85.49	Max. :1.823333	Max. :283.30
			NA's :1002

co2	pressure	ws
Min. :441.4	Min. :561.6	Min. :0.6051
1st Qu.:487.9	1st Qu.:563.3	1st Qu.:1.2383
Median :506.0	Median :563.8	Median :1.4447
Mean :509.5	Mean :563.8	Mean :1.4522
3rd Qu.:528.2	3rd Qu.:564.3	3rd Qu.:1.6538
Max. :627.2	Max. :566.0	Max. :2.4644
NA's :825		

Salida de la consola 14. Estadísticas descriptivas Bogotá

```

=====
Dependent variable:
-----
ex_pm
-----
rain                -0.199
                    (0.227)

tmp                 0.039
                    (0.047)

ws                 -2.314***

```

	(0.229)
as.factor(dow) 2	0.380** (0.158)
as.factor(dow) 3	0.400** (0.159)
as.factor(dow) 4	0.583*** (0.161)
as.factor(dow) 5	0.723*** (0.161)
as.factor(dow) 6	0.345** (0.158)
as.factor(dow) 7	-0.395** (0.158)
as.factor(month) 2	0.665*** (0.196)
as.factor(month) 3	0.711*** (0.201)
as.factor(month) 4	-0.496*** (0.179)
as.factor(month) 5	-1.585*** (0.193)
as.factor(month) 6	-1.204*** (0.208)
as.factor(month) 7	-1.550*** (0.227)
as.factor(month) 8	-1.084*** (0.206)
as.factor(month) 9	-0.417** (0.193)
as.factor(month) 10	-0.340* (0.195)
as.factor(month) 11	-0.161 (0.199)
as.factor(month) 12	0.591*** (0.210)
as.factor(year) 2022	0.217**

```

(0.110)

as.factor(year) 2023      0.428***
                        (0.125)

as.factor(year) 2024      0.641***
                        (0.166)

Constant                2.715***
                        (0.671)

-----
Observations              1,247
Log Likelihood            -572.301
Akaike Inf. Crit.        1,192.601
=====
Note:                    *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01
                        Salida de la consola 15. Modelo Probit PM2.5

=====
                        Dependent variable:
                        -----
                        ex_pm
-----
rain                     -0.808**
                        (0.324)

tmp                      0.040
                        (0.075)

ws                       -1.089***
                        (0.274)

as.factor(dow) 2         0.325*
                        (0.196)

as.factor(dow) 3         0.546***
                        (0.190)

as.factor(dow) 4         0.638***
                        (0.188)

as.factor(dow) 5         0.604***
                        (0.188)

as.factor(dow) 6         0.049
                        (0.205)

as.factor(dow) 7        -0.783***
                        (0.272)

as.factor(month) 2       0.144
                        (0.195)

```

as.factor(month) 3	0.206 (0.189)
as.factor(month) 4	-0.512** (0.217)
as.factor(month) 5	-1.749*** (0.345)
as.factor(month) 6	-0.777*** (0.291)
as.factor(month) 7	-0.966*** (0.341)
as.factor(month) 8	-0.667** (0.288)
as.factor(month) 9	-0.523** (0.261)
as.factor(month) 10	-0.085 (0.231)
as.factor(month) 11	-0.207 (0.233)
as.factor(month) 12	0.254 (0.214)
as.factor(year) 2022	0.007 (0.136)
as.factor(year) 2023	0.153 (0.152)
as.factor(year) 2024	1.117*** (0.191)
Constant	-0.308 (1.044)

Observations	1,247
Log Likelihood	-394.507
Akaike Inf. Crit.	837.014

=====

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Salida de la consola 16. Modelo Probit PM10

=====

Dependent variable:

	ex_no2
rain	0.620** (0.262)
tmp	-0.248*** (0.074)
ws	-3.299*** (0.288)
as.factor(dow) 2	0.733*** (0.179)
as.factor(dow) 3	0.712*** (0.179)
as.factor(dow) 4	0.625*** (0.180)
as.factor(dow) 5	0.727*** (0.178)
as.factor(dow) 6	0.142 (0.181)
as.factor(dow) 7	-1.522*** (0.257)
as.factor(month) 2	0.308 (0.202)
as.factor(month) 3	0.277 (0.200)
as.factor(month) 4	-0.249 (0.215)
as.factor(month) 5	-1.705*** (0.268)
as.factor(month) 6	-0.860*** (0.260)
as.factor(month) 7	-1.952*** (0.466)
as.factor(month) 8	-0.080 (0.235)
as.factor(month) 9	0.616*** (0.219)
as.factor(month) 10	0.749***

```

(0.225)

as.factor(month)11      0.071
                        (0.223)

as.factor(month)12      0.187
                        (0.221)

as.factor(year)2022     -0.101
                        (0.127)

as.factor(year)2023     0.675***
                        (0.145)

as.factor(year)2024     1.022***
                        (0.194)

Constant                7.151***
                        (1.069)

-----
Observations            1,247
Log Likelihood          -444.072
Akaike Inf. Crit.      936.145
=====
Note:                  *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01
                        Salida de la consola 17. Modelo Probit NO2

```

VAR Estimation Results:

```

=====
Endogenous variables: pm25, radsolar, ws, pressure, tmp
Deterministic variables: const
Sample size: 1240
Log Likelihood: -5150.775
Roots of the characteristic polynomial:
0.8358 0.8358 0.7701 0.7701 0.7648 0.7648 0.7566 0.7566 0.7228 0.7228
0.7199 0.7199 0.7089 0.7089 0.6731 0.6731 0.6589 0.6589 0.6571 0.6571
0.6462 0.6462 0.6267 0.6267 0.5998 0.5998 0.5729 0.5729 0.55 0.2151
Call:
vars::VAR(y = z, p = 6)

```

Estimation results for equation pm25:

```

=====
pm25 = pm25.l1 + radsolar.l1 + ws.l1 + pressure.l1 + tmp.l1 + pm25.l2 +
radsolar.l2 + ws.l2 + pressure.l2 + tmp.l2 + pm25.l3 + radsolar.l3 + ws.l3
+ pressure.l3 + tmp.l3 + pm25.l4 + radsolar.l4 + ws.l4 + pressure.l4 +
tmp.l4 + pm25.l5 + radsolar.l5 + ws.l5 + pressure.l5 + tmp.l5 + pm25.l6 +
radsolar.l6 + ws.l6 + pressure.l6 + tmp.l6 + const

      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
pm25.l1    -0.3165287  0.0327287  -9.671  < 2e-16 ***
radsolar.l1  0.0030945  0.0006261   4.942 8.81e-07 ***
ws.l1       -0.3353400  0.1191945  -2.813 0.004982 **

```

pressure.l1	0.0562054	0.0598389	0.939	0.347775	
tmp.l1	-0.8099716	0.4529400	-1.788	0.073985	.
pm25.l2	-0.3541020	0.0332173	-10.660	< 2e-16	***
radsolar.l2	0.0030201	0.0007185	4.203	2.82e-05	***
ws.l2	-0.2490528	0.1285473	-1.937	0.052924	.
pressure.l2	0.0652940	0.0606256	1.077	0.281693	
tmp.l2	-0.0750669	0.5080467	-0.148	0.882560	
pm25.l3	-0.3536630	0.0343437	-10.298	< 2e-16	***
radsolar.l3	0.0031671	0.0007655	4.137	3.76e-05	***
ws.l3	-0.3097759	0.1330102	-2.329	0.020025	*
pressure.l3	0.1526315	0.0662897	2.302	0.021477	*
tmp.l3	-0.4726784	0.5312198	-0.890	0.373751	
pm25.l4	-0.2467442	0.0339996	-7.257	7.04e-13	***
radsolar.l4	0.0020597	0.0007679	2.682	0.007409	**
ws.l4	-0.2223793	0.1328150	-1.674	0.094320	.
pressure.l4	-0.1050575	0.0662721	-1.585	0.113172	
tmp.l4	-0.3841616	0.5310464	-0.723	0.469571	
pm25.l5	-0.2895740	0.0327510	-8.842	< 2e-16	***
radsolar.l5	0.0020944	0.0007215	2.903	0.003762	**
ws.l5	-0.3149695	0.1282443	-2.456	0.014189	*
pressure.l5	-0.0075714	0.0607925	-0.125	0.900904	
tmp.l5	-0.7268862	0.5065291	-1.435	0.151536	
pm25.l6	-0.1957644	0.0318951	-6.138	1.13e-09	***
radsolar.l6	0.0022301	0.0006236	3.576	0.000362	***
ws.l6	-0.2775120	0.1177154	-2.357	0.018558	*
pressure.l6	0.0838347	0.0586769	1.429	0.153334	
tmp.l6	-0.7740035	0.4507985	-1.717	0.086242	.
const	-0.0008469	0.0186004	-0.046	0.963693	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6549 on 1209 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.2111, Adjusted R-squared: 0.1915

F-statistic: 10.78 on 30 and 1209 DF, p-value: < 2.2e-16

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.05003 on 1209 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.2635, Adjusted R-squared: 0.2452

F-statistic: 14.42 on 30 and 1209 DF, p-value: < 2.2e-16

Salida de la consola 18. Modelo VAR

#####

###Model VECM

#####

Full sample size: 1246 End sample size: 1238

Number of variables: 5 Number of estimated slope parameters 200

AIC -6784.14 BIC -5739.404 SSR 2076250

Cointegrating vector (estimated by ML):

	pm25	tmp	radsolar	pressure	ws
r1	1.000000e+00	4.996004e-16	-5.684342e-14	-1.421085e-14	-6916.715
r2	-9.094947e-13	1.000000e+00	3.637979e-12	-1.818989e-12	-630126.701
r3	-3.552714e-15	2.775558e-17	1.000000e+00	-1.421085e-14	-3552.172
r4	0.000000e+00	-2.498002e-16	1.421085e-14	1.000000e+00	-3934.532

	ECT1	ECT2	ECT3
Equation pm25	-2.3787(0.1497)***	0.0226(0.0040)***	0.2570(0.5950)
Equation tmp	72.5481(9.4631)***	-2.6273(0.2536)***	
Equation radsolar	0.3372(0.0519)***	0.0051(0.0014)***	-
Equation pressure	0.1559(0.0753)*	0.0040(0.0020)*	0.9458(0.2994)**
Equation ws	0.0227(0.0113)*	-0.0002(0.0003)	-0.0191(0.0448)
	ECT4	Intercept	pm25 -1
Equation pm25	0.3358(0.2143)	0.0005(0.0187)	1.1026(0.1381)***
Equation tmp	52.1548(13.5500)***	0.0257(1.1833)	-
Equation radsolar	0.1659(0.0744)*	0.0008(0.0065)	-
Equation pressure	-1.7753(0.1079)***	0.0022(0.0094)	-0.1157(0.0695).
Equation ws	0.0170(0.0161)	0.0003(0.0014)	-0.0199(0.0104).
	tmp -1	radsolar -1	pressure -1
Equation pm25	-0.0188(0.0038)***	-0.4667(0.5521)	-0.2618(0.1957)
Equation tmp	1.1476(0.2378)***	-237.2828(34.9075)***	-
Equation radsolar	-0.0048(0.0013)***	0.4397(0.1915)*	-
Equation pressure	-0.0037(0.0019).	-0.7982(0.2778)**	
Equation ws	0.0003(0.0003)	0.0105(0.0416)	-0.0211(0.0147)
	ws -1	pm25 -2	tmp -2
Equation pm25	5.7667(2.4464)*	0.7959(0.1218)***	-
Equation tmp	715.9892(154.6707)***	-59.5725(7.7034)***	
Equation radsolar	2.6844(0.8487)**	-0.2872(0.0423)***	-
Equation pressure	3.3616(1.2311)**	-0.0952(0.0613)	-
Equation ws	1.5562(0.1842)***	-0.0175(0.0092).	0.0003(0.0003)
	radsolar -2	pressure -2	ws -2
Equation pm25	-0.5147(0.4950)	-0.1895(0.1784)	
Equation tmp	-207.4184(31.2925)***	-43.6016(11.2774)***	
Equation radsolar	0.2387(0.1717)	-0.1566(0.0619)*	
Equation pressure	-0.5572(0.2491)*	0.5141(0.0898)***	
Equation ws	-0.0014(0.0373)	-0.0176(0.0134)	
	pm25 -3	tmp -3	radsolar -3

Equation pm25	0.4872(0.1041)***	-0.0108(0.0029)***	-0.6298(0.4270)
Equation tmp	-51.7461(6.5846)***	0.5799(0.1835)**	-
179.3711(26.9993)***			
Equation radsolar	-0.2470(0.0361)***	-0.0033(0.0010)**	0.0485(0.1481)
Equation pressure	-0.0740(0.0524)	-0.0034(0.0015)*	-0.3609(0.2149).
Equation ws	-0.0147(0.0078).	0.0003(0.0002)	-0.0097(0.0322)
	pressure -3	ws -3	pm25 -4
Equation pm25	-0.0160(0.1551)	4.3198(1.8969)*	
0.3020(0.0865)***			
Equation tmp	-42.7395(9.8065)***	465.5816(119.9305)***	-
40.8096(5.4674)***			
Equation radsolar	-0.1542(0.0538)**	1.7945(0.6581)**	-
0.1918(0.0300)***			
Equation pressure	0.3309(0.0781)***	1.7996(0.9546).	-
0.0399(0.0435)			
Equation ws	-0.0227(0.0117).	0.8087(0.1428)***	-
0.0085(0.0065)			
	tmp -4	radsolar -4	pressure -4
Equation pm25	-0.0077(0.0024)**	-0.5847(0.3543).	-0.1008(0.1314)
Equation tmp	0.3761(0.1495)*	-135.9487(22.4002)***	-
38.1844(8.3097)***			
Equation radsolar	-0.0027(0.0008)**	0.0102(0.1229)	-
0.1237(0.0456)**			
Equation pressure	-0.0026(0.0012)*	-0.2279(0.1783)	
0.3388(0.0661)***			
Equation ws	0.0002(0.0002)	-0.0002(0.0267)	-
0.0238(0.0099)*			
	ws -4	pm25 -5	tmp -5
Equation pm25	3.4322(1.5597)*	0.0662(0.0671)	-
0.0045(0.0018)*			
Equation tmp	309.4282(98.6091)**	-28.1422(4.2413)***	0.2362(0.1130)*
Equation radsolar	1.1736(0.5411)*	-0.1383(0.0233)***	-
0.0018(0.0006)**			
Equation pressure	1.5662(0.7849)*	-0.0047(0.0338)	-
0.0022(0.0009)*			
Equation ws	0.5116(0.1174)***	-0.0058(0.0051)	7.2e-
05(0.0001)			
	radsolar -5	pressure -5	ws -5
Equation pm25	-0.6354(0.2741)*	-0.1054(0.1028)	2.1431(1.1996).
Equation tmp	-96.3080(17.3287)***	-28.1970(6.5006)***	
218.4372(75.8442)**			
Equation radsolar	-0.0262(0.0951)	-0.0811(0.0357)*	0.8695(0.4162)*
Equation pressure	-0.0420(0.1379)	0.2090(0.0517)***	1.2982(0.6037)*
Equation ws	-0.0031(0.0206)	-0.0147(0.0077).	
0.3208(0.0903)***			
	pm25 -6	tmp -6	radsolar -6
Equation pm25	-0.0741(0.0489)	-0.0013(0.0012)	-
0.6264(0.1956)**			
Equation tmp	-17.9422(3.0907)***	0.1383(0.0759).	-
68.8488(12.3670)***			
Equation radsolar	-0.0852(0.0170)***	-0.0012(0.0004)**	-
0.0333(0.0679)			
Equation pressure	0.0252(0.0246)	-0.0017(0.0006)**	0.0278(0.0984)

Equation ws	-0.0047(0.0037)	-2.8e-06(9.0e-05)	-
0.0011(0.0147)			
	pressure -6	ws -6	pm25 -7
Equation pm25	0.0075(0.0742)	0.8766(0.8251)	0.0138(0.0311)
Equation tmp	-21.4383(4.6890)***	156.8954(52.1657)**	-
8.8567(1.9657)***			
Equation radsolar	-0.0642(0.0257)*	0.6316(0.2862)*	-
0.0446(0.0108)***			
Equation pressure	0.1276(0.0373)***	0.9737(0.4152)*	0.0234(0.0156)
Equation ws	-0.0154(0.0056)**	0.1970(0.0621)**	-0.0036(0.0023)
	tmp -7	radsolar -7	pressure -7
Equation pm25	-0.0007(0.0006)	-0.1866(0.1146)	0.0064(0.0589)
Equation tmp	0.0831(0.0401)*	-38.5083(7.2464)***	-
12.4170(3.7216)***			
Equation radsolar	-0.0004(0.0002)*	-0.0301(0.0398)	-
0.0511(0.0204)*			
Equation pressure	-0.0010(0.0003)**	0.0324(0.0577)	
0.1062(0.0296)***			
Equation ws	-5.1e-06(4.8e-05)	0.0005(0.0086)	-
0.0120(0.0044)**			
	ws -7		
Equation pm25	0.2529(0.4545)		
Equation tmp	79.7582(28.7361)**		
Equation radsolar	0.3251(0.1577)*		
Equation pressure	0.6852(0.2287)**		
Equation ws	0.0890(0.0342)**		

Salida de la consola 19. Modelo VECM

Time series regression with "ts" data:
Start = 7, End = 1246

Call:
dynlm::dynlm(formula = full_formula, data = data, start = start,
end = end, lamda = TRUE)

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-2.61361	-0.37128	0.00686	0.39035	2.64760

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.0004253	0.0160551	0.026	0.97887
L(pm25, 1)	-0.3219522	0.0283584	-11.353	< 2e-16 ***
L(pm25, 2)	-0.3458531	0.0287189	-12.043	< 2e-16 ***
L(pm25, 3)	-0.3410598	0.0296921	-11.487	< 2e-16 ***
L(pm25, 4)	-0.2189460	0.0294821	-7.426	2.11e-13 ***
L(pm25, 5)	-0.2739807	0.0283402	-9.668	< 2e-16 ***
L(pm25, 6)	-0.1688526	0.0275814	-6.122	1.25e-09 ***
radsolar	0.0048481	0.0005266	9.207	< 2e-16 ***
L(radsolar, 1)	0.0056660	0.0006117	9.263	< 2e-16 ***
L(radsolar, 2)	0.0050925	0.0006619	7.693	2.97e-14 ***
L(radsolar, 3)	0.0049634	0.0006840	7.257	7.09e-13 ***
L(radsolar, 4)	0.0030470	0.0006747	4.516	6.92e-06 ***

```

L(radsolar, 5)  0.0031081  0.0006310   4.926  9.57e-07 ***
L(radsolar, 6)  0.0023195  0.0005399   4.296  1.88e-05 ***
ws             -1.6913903  0.0912688 -18.532  < 2e-16 ***
L(ws, 1)       -0.9995284  0.1095833  -9.121  < 2e-16 ***
L(ws, 2)       -0.7199531  0.1148931  -6.266  5.14e-10 ***
L(ws, 3)       -0.7584196  0.1180835  -6.423  1.92e-10 ***
L(ws, 4)       -0.4627320  0.1159715  -3.990  7.00e-05 ***
L(ws, 5)       -0.5005908  0.1117042  -4.481  8.12e-06 ***
L(ws, 6)       -0.3335511  0.1018555  -3.275  0.00109 **
pressure       -0.1544446  0.0515731  -2.995  0.00280 **
L(pressure, 1)  0.0823213  0.0526417   1.564  0.11813
L(pressure, 2) -0.0489459  0.0572984  -0.854  0.39315
L(pressure, 3)  0.0965390  0.0580976   1.662  0.09684 .
L(pressure, 4) -0.0887252  0.0572082  -1.551  0.12118
L(pressure, 5) -0.0087032  0.0527254  -0.165  0.86892
L(pressure, 6)  0.0256184  0.0507803   0.504  0.61401
tmp            -0.8314740  0.3915199  -2.124  0.03390 *
L(tmp, 1)      -1.0215266  0.4425638  -2.308  0.02116 *
L(tmp, 2)      -0.6496915  0.4681166  -1.388  0.16543
L(tmp, 3)      -0.6874717  0.4731409  -1.453  0.14649
L(tmp, 4)      -0.6384796  0.4667332  -1.368  0.17157
L(tmp, 5)      -0.6324085  0.4408159  -1.435  0.15165
L(tmp, 6)      -0.6494573  0.3902070  -1.664  0.09629 .

```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5652 on 1205 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4142, Adjusted R-squared: 0.3977

F-statistic: 25.06 on 34 and 1205 DF, p-value: < 2.2e-16

Salida de la consola 20. Modelo ARDL

Dia	PM 25	PM10	NO2
LU	15	29	27
MA	17	33	30
MI	17	35	30
JU	18	35	31
VI	19	36	31
SA	17	32	28
DO	13	24	22

Tabla 3. Contaminación promedio por día

Mes	PM 25	PM10	NO2	WS
EN	18	36	28	1,49
FE	21	39	31	1,48
MA	23	39	31	1,42
AB	18	32	29	1,40
MY	12	26	23	1,40
JN	12	25	24	1,46

JL	10	23	22	1,59
AG	13	27	27	1,58
SE	15	30	31	1,52
OC	17	32	34	1,33
NO	18	34	31	1,31
DI	19	38	30	1,46

Tabla 4. Contaminación promedio por mes

Año	PM 25	PM10	NO2
2021	16	31	29
2022	17	32	29
2023	15	29	27
2024	21	41	29

Tabla 5. Contaminación promedio por año