LA MEJOR TESIS DEL MUNDO MUNDIAL

Andres Arevalo

**Resumen**

Dwd

Palabras clave:

Índice

[1. Introducción y objetivos 1](#_Toc169838713)

[1.1 Introducción 1](#_Toc169838714)

[1.2 Objetivos 1](#_Toc169838715)

[1.2.1 Objetivo general 1](#_Toc169838716)

[1.2.2 Objetivos específicos 1](#_Toc169838717)

[2. Antecedentes 1](#_Toc169838718)

[3. Revisión de literatura 1](#_Toc169838719)

[4. Metodología 1](#_Toc169838720)

[Diagrama de flujo 1](#_Toc169838721)

[Estructuración de datos 1](#_Toc169838722)

[Variables y Unidades de Medida 1](#_Toc169838723)

[Naturaleza de los Datos 2](#_Toc169838724)

[Desafíos en la Recolección de Datos 2](#_Toc169838725)

[Cobertura de Variables por Estación 2](#_Toc169838726)

[Selección de variables para el Análisis de la Calidad del Aire en Bogotá 3](#_Toc169838727)

[Exclusión de Variables 3](#_Toc169838728)

[Inclusión de Variables 3](#_Toc169838729)

[Datos y procesamiento 6](#_Toc169838730)

[Estadísticas descriptivas 6](#_Toc169838731)

[Proceso de Estequiometria 18](#_Toc169838732)

[Análisis exploratorio de la correlación entre las variables 21](#_Toc169838733)

[Marco teórico **cambiar** 22](#_Toc169838734)

[Modelos propuestos 22](#_Toc169838735)

[Modelo probit 22](#_Toc169838736)

[Modelo de Vectoriales autorregresivos (VAR) 22](#_Toc169838737)

[Modelo de Vector Error Correction Model (VECM) 22](#_Toc169838738)

[Modelo de Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL) 22](#_Toc169838739)

[Random forest 22](#_Toc169838740)

[Resultados 22](#_Toc169838741)

[Conclusiones y recomendaciones 22](#_Toc169838742)

[Referencias 22](#_Toc169838743)

[Anexos 24](#_Toc169838744)

# 1. Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

### 1.2.2 Objetivos específicos

# 2. Antecedentes

# 3. Revisión de literatura

# 4. Metodología

## Diagrama de flujo

## Estructuración de datos

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.

### Variables y Unidades de Medida

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

* PM10, PM2.5, Black Carbon (µg/m³)
* CO, CO2 (ppm)
* SO2, NO, NO2, NOX, O3 (ppb)
* Velocidad del Viento (m/s)
* Dirección del Viento (grados)
* Temperatura (°C)
* Presión Barométrica (mmHg)
* Radiación Solar (W/m²)
* 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 de la Calidad del Aire en Bogotá

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, PM2.5 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 NOx 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 NOx.
* **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 PM2.5 tiene una media de 14.373 µg/m³, con un pico máximo registrado de 44 µg/m³. Por otro lado, el PM10 exhibe un promedio de 28.02 µg/m³, con un máximo de 69.67 µg/m³, 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 PM2.5 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 PM2.5 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 PM2.5 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 (PM2.5) 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 (PM2.5) 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 PM2.5 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 (PM2.5) 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 PM2.5. 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 PM2.5 presenta un promedio de 15.467 μg/m³, con un rango que va desde 2.454 hasta 42.767 μg/m³. 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 μg/m³ y un máximo de 90.392 μg/m³. 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 PM2.5 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 PM2.5 presenta un promedio de 34.65 μg/m³, con valores que oscilan entre 10.50 y 81.12 μg/m³. Las partículas gruesas (PM10) tienen un promedio de 70.96 μg/m³, alcanzando un máximo de 140.00 μg/m³. 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 PM2.5, 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 PM2.5, 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 PM2.5 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 PM2.5, 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 realizo un análisis de estos resultados. [Ver Salida de la consola 14. Estadísticas descriptivas Bogotá]

* **PM2.5 (µg/m³):** El promedio de PM2.5 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 Estequiometria

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 y objetivos provisionales, 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 horas | 15 |
|  | 24 horas | 45 |
|  | 8 horas | 100 |
|  | 24 horas | 25 |
|  | 24 horas | 40 |
|  | 24 horas | 4 |

Tabla 1. Niveles de AQG recomendados y objetivos provisionales (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 (µg/m³) se fundamenta en la ley de los gases ideales, que relaciona la presión, el volumen y la temperatura. Dicha ley establece que , 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, ,
  + 𝑇 es la temperatura en Kelvin (K)

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

1. **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:

donde 760 mmHg equivale a 1 atm.

1. **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:

1. **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:

1. **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 (µg/m³). Se inicia con el ozono (O3), que consiste en tres átomos de oxígeno. Dado que la masa atómica del oxígeno es de 16 gramos por mol, la masa molar del O3 se calcula como sigue:

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

* + **Dióxido de nitrógeno (NO2):** Compuesto por un átomo de nitrógeno (14 g/mol) y dos átomos de oxígeno (16 g/mol cada uno), resultando en:
  + **Dióxido de azufre (SO2):** Compuesto por un átomo de azufre (32 g/mol) y dos átomos de oxígeno (16 g/mol cada uno), resultando en:

1. **Conversión de unidades**

ara realizar la conversión de las concentraciones de contaminantes de ppb a µg/m³, se utiliza la siguiente relación que incorpora la ley de los gases ideales y los ajustes de las unidades de medida:

Luego se realiza la conversión de unidades:

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:

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

Una vez convertidas las concentraciones de los contaminantes a µg/m³, 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.

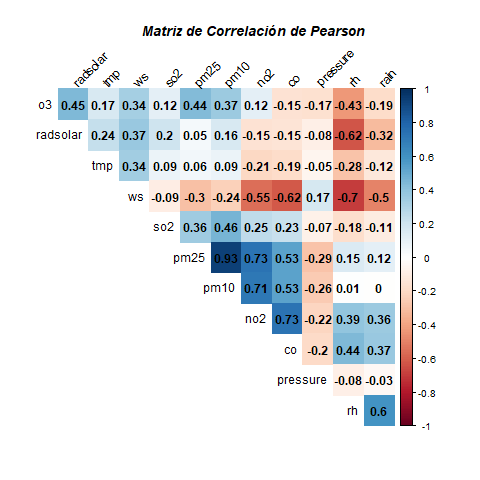


Ilustración 1. Matriz de correlación de Pearson

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.

1. Correlaciones moderadas positivas

* SO2 y PM2.5 (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.

1. Correlaciones negativas notables

* Velocidad del viento (WS) y PM10 (-0.55), WS y PM2.5 (-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.

1. 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 excedencias

## Marco teórico **cambiar**

## Modelos propuestos

### Modelo Probit

Dada la importancia de la contaminación causada por partículas finas (PM2.5 y PM10) y el gas NO2 en la salud pública, y su variabilidad en respuesta a factores ambientales y temporales, se ha desarrollado un modelo Probit para estimar la probabilidad de que las concentraciones de cada contaminante excedan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (World Health Organization, 2021).

#### Preparación de Datos

Inicialmente, se creó una variable binaria, contamínate\_pm, dentro del conjunto de datos data, que indica si las mediciones diarias de PM2.5, PM10 y NO2 exceden el Nivel guía (1 si excede, 0 en caso contrario).

#### Especificación del Modelo

El modelo Probit se especificó con la variable dependiente contamínate\_pm y un conjunto de predictores que incluyen condiciones meteorológicas y temporales (lluvia, temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa) y variables categóricas para el día de la semana, mes y año. La elección del enlace Probit se debe a su adecuación para modelar variables de respuesta binaria, proporcionando una medida de la probabilidad latente de que un evento ocurra.

#### Justificación de la metodología

En el contexto de la investigación sobre contaminación atmosférica, 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 de PM2.5, 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)

### Modelo de Vector Error Correction Model (VECM)

#### Justificación de la metodología

#### Ventajas del modelo

#### Desventajas del modelo

### Modelo de Autoregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL)

#### Justificación de la metodología

#### Ventajas del modelo

#### Desventajas del modelo

### Random forest

# Resultados

# Conclusiones y recomendaciones

# 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.

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

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (‎PM2.5 and PM10)‎, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.* World Health Organization.

# Anexos



Salida de la consola 1. Estadísticas descriptivas Guaymaral



Salida de la consola 2. Estadísticas descriptivas Min Ambiente



Salida de la consola 3. Estadísticas descriptivas Suba



Salida de la consola 4. Estadísticas descriptivas Usaquén



Salida de la consola 5. Estadísticas descriptivas Las Ferias



Salida de la consola 6. Estadísticas descriptivas San Cristóbal



Salida de la consola 7. Estadísticas descriptivas Tunal



Salida de la consola 8. Estadísticas descriptivas Bolivia



Salida de la consola 9. Estadísticas descriptivas Carvajal



Salida de la consola 10. Estadísticas descriptivas Fontibón



Salida de la consola 11. Estadísticas descriptivas Kennedy



Salida de la consola 12. Estadísticas descriptivas Puente Aranda



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



Salida de la consola 14. Estadísticas descriptivas Bogotá

T