

Análisis de Series de  
Tiempo y Riesgo  
Ambiental: Evaluación de  
la Calidad del Aire en  
Puebla (2016-2022).

Dilan Alejandro González  
Alatríste.

Introducción a la Ciencia  
de Datos.

Profesor: Jaime Alejandro  
Romero Sierra.

28 de noviembre de 2025.

# INTRODUCCIÓN

## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE PUEBLA: UN ESTUDIO DE EVOLUCIÓN Y RIESGO (2016-2022)

### 1. Objetivo General y Alcance del Proyecto

El propósito fundamental de este estudio es realizar una **evaluación exhaustiva de la calidad del aire** en la Zona Metropolitana de Puebla (ZMP) a lo largo de un periodo de siete años, comprendido entre 2016 y 2022. Los objetivos específicos que guían la investigación son:

- **Evaluar la Evolución Temporal:** Determinar la tendencia histórica y la variabilidad anual de la concentración de contaminantes criterio durante el periodo de estudio.
- **Identificar el Contaminante Dominante:** Establecer cuál de los contaminantes monitoreados representa el riesgo preponderante para la salud pública en la ZMP.
- **Localizar Áreas de Mayor Riesgo (Hotspots):** Identificar geográficamente las zonas dentro de la ciudad donde los niveles de contaminación superan las normas con mayor frecuencia o intensidad, sirviendo como puntos focales para la acción gubernamental.
- **Determinar la Estacionalidad de la Contaminación:** Analizar cómo influyen las condiciones meteorológicas y los patrones estacionales (ej. época de secas, época de lluvias) en la concentración y dispersión de los contaminantes.

### 2. Justificación, Contexto y Relevancia Sociosanitaria

La calidad del aire en Puebla es un tema de **crucial interés en salud pública y gestión ambiental**. Este estudio se justifica por el impacto directo y documentado de la contaminación atmosférica, particularmente por **Ozono (O<sub>3</sub>)**, en la morbilidad y mortalidad de la población. La exposición a altos niveles de Ozono troposférico está intrínsecamente ligada al incremento de enfermedades respiratorias agudas y crónicas (asma, bronquitis, EPOC) y a la exacerbación de padecimientos cardiovasculares.

El análisis retrospectivo de 2016-2022 ha revelado una **tendencia ascendente en el riesgo asociado al O<sub>3</sub>**, lo que convierte a este contaminante en el principal foco de atención. Comprender y modelar esta tendencia es esencial para que las **autoridades ambientales y de salud** (como el Gobierno de Puebla y la SEMARNAT) puedan:

- Implementar **medidas de mitigación focalizadas** con alta precisión geográfica.
- Diseñar **estrategias de prevención estacionales**, activando protocolos de alerta temprana durante los periodos de mayor incidencia (típicamente la temporada de ozono).
- Informar a la ciudadanía con base científica para fomentar la toma de decisiones personales y colectivas orientadas a la protección de la salud.

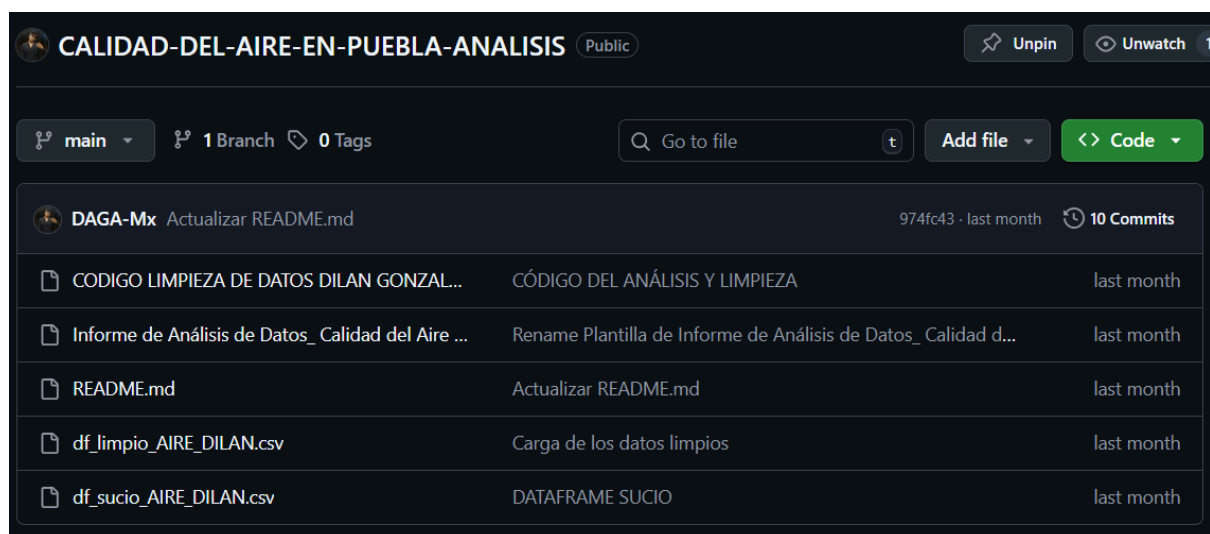
### 3. Metodología y Fuentes de Datos

La robustez del análisis se fundamenta en el uso de **datos históricos oficiales y verificables**.

- **Fuente Principal:** Base de datos histórica de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Puebla, cubriendo el periodo 2016-2022.
- **Origen de los Datos:** Información compilada y validada a partir de las redes de monitoreo atmosférico operadas por dependencias del Gobierno de Puebla y la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)*.
- **Naturaleza de los Datos:** Los datos utilizados son de carácter **agregado**, consistentes en el **conteo de días clasificados por nivel de riesgo** según el Índice de Calidad del Aire (ICA). Las categorías de riesgo analizadas incluyen:
  - **Niveles Satisfactorios (Buenos):** Sin riesgo o riesgo mínimo para la salud.
  - **Niveles Aceptables (Moderados):** Riesgo para grupos sensibles.
  - **Niveles Deficientes (Malos) y Críticos (Muy Malos/Extremadamente Malos):** Riesgo elevado a grave para toda la población.
- **Contaminantes Incluidos:** La base de datos permite evaluar y comparar la incidencia de los principales contaminantes criterio, como el O<sub>3</sub>, *partículas suspendidas (PM 10 y PM2.5)*, Dióxido de Azufre (**SO<sub>2</sub>**), Monóxido de Carbono (**CO**), y Óxidos de Nitrógeno (**NO**).

El dataset utilizado fue limpiado previamente y es extraído directamente desde un repositorio dedicado en github, con la siguiente dirección de enlace:

<https://github.com/DAGA-Mx/CALIDAD-DEL-AIRE-EN-PUEBLA-ANALISIS>



# Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

El EDA se centra en la evolución del **Riesgo Ponderado** y el **Total Días Malos** como variables numéricas clave.

## 1. Descripción General de los Datos

- **Visión General:** El dataset final, tras la limpieza y el filtro temporal (2019-2022), contiene **2,244 registros** (filas) y **11 variables** (columnas).
- **Tipos de Variables:** Variables numéricas (conteo de días, **Riesgo Ponderado**), categóricas (**Estacion**, **Parametro**), y de tipo fecha (**Fecha inicial**, **Fecha final**).

## Fuentes de Información y Preparación de la Base de Datos





Para llevar a cabo el análisis de la calidad del aire, se utilizó una robusta base de datos proporcionada por una entidad gubernamental, la cual abarcaba un amplio espectro temporal con registros diarios que se extendían desde el año 2001. La exhaustividad de esta fuente permitió una visión histórica profunda de la evolución de la calidad del aire.









## Proceso de Limpieza y Construcción Manual de la Base







La base de datos original requirió un proceso meticuloso de limpieza y depuración. Este proceso se centró en asegurar la integridad y la consistencia de los datos. Posteriormente, para facilitar la construcción de las series temporales y realizar un análisis estadístico más efectivo, se procedió a la agregación manual de los datos. Se calcularon y registraron los totales de los días por cada mes y por cada año. Esta agregación no solo simplificó la estructura de la base, sino que también permitió la identificación de patrones y tendencias a nivel mensual y anual.








## Alcance Temporal para el Análisis Específico








A pesar de contar con datos históricos desde 2001, para el propósito de este estudio específico y buscando un análisis más cercano y relevante a la situación actual, se decidió restringir el alcance temporal de la investigación. Por lo tanto, el análisis se concentró exclusivamente en el periodo comprendido desde el año 2019 hasta el año 2022. Esta selección se justifica por la necesidad de enfocarse en los patrones y variaciones más recientes de la calidad del aire, lo cual es crucial para la formulación de conclusiones y recomendaciones contemporáneas.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 DIOXIDO DE AZUFRE	19/10/2025 06:57 p. m.	Carpeta de archivos	
 DIOXIDO DE NITROGENO	19/10/2025 07:00 p. m.	Carpeta de archivos	
 MONOXIDO DE CARBONO	19/10/2025 07:04 p. m.	Carpeta de archivos	
 OZONO	19/10/2025 06:59 p. m.	Carpeta de archivos	

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 DBRM_Dióxido de azufre_2016-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2017-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2018-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2019-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2020-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2021-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2021-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Dióxido de azufre_2022-01-01_20...	19/10/2025 06:57 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2016-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	4 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2017-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2018-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	5 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2019-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2020-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2021-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Dióxido de nitrógeno_2022-01-01...	19/10/2025 07:00 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 DBRM_Monóxido de carbono_2016-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2017-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	4 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2018-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	5 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2019-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2020-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2021-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	7 KB
 DBRM_Monóxido de carbono_2022-01-0...	19/10/2025 07:04 p. m.	Microsoft Excel Co...	6 KB

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 DBRM_Ozono_2016-01-01_2016-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	8 KB
 DBRM_Ozono_2017-01-01_2017-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB
 DBRM_Ozono_2018-01-01_2018-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB
 DBRM_Ozono_2019-01-01_2019-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB
 DBRM_Ozono_2020-01-01_2020-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB
 DBRM_Ozono_2021-01-01_2021-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB
 DBRM_Ozono_2022-01-01_2022-12-31	19/10/2025 06:59 p. m.	Microsoft Excel Co...	9 KB

## Proceso de Limpieza y Construcción de la Base de Datos

Paso	Descripción Detallada	Justificación
<b>Filtro Temporal</b>	Se restringió el alcance de la base de datos de 2001-2022 a un periodo más reciente y relevante: <b>2019-2022</b> .	Enfocar el análisis en las tendencias y variaciones contemporáneas, esenciales para la formulación de conclusiones y recomendaciones actuales.
<b>Conversión de Fechas</b>	Las columnas de texto que representaban el inicio y fin del periodo fueron convertidas al tipo <b><i>datetime</i></b> usando el formato específico (%d/%m/%Y), asegurando la integridad de las series de tiempo.	Facilitar la agrupación por <b><i>Mes</i></b> y <b><i>Año</i></b> y evitar ambigüedades en la lectura de la fecha.
<b>Agregación Manual</b>	Los datos originales, presumiblemente horarios o diarios, fueron agregados (sumados) para obtener el <b>total de días</b> por cada categoría de riesgo (Buenos, Malos, etc.) para cada <b>mes, año, estación y contaminante</b> .	Simplificar la estructura y permitir la identificación de patrones y tendencias a nivel mensual y anual, generando una sola observación por periodo de análisis.
<b>Exclusión de Estación</b>	Se excluyeron todas las filas pertenecientes a la estación <b>"Agregado"</b> (la cual representa el promedio de la red).	Prevenir el sesgo y garantizar que el análisis de tendencias y <i>hotspots</i> refleje las mediciones reales de estaciones individuales.
<b>Construcción de Métricas</b>	Se crearon dos variables clave: <b>Riesgo Ponderado</b> (índice que asigna mayor peso a los días de peor calidad) y <b>Total Días Malos</b> (suma de días malos, muy malos y extremadamente malos).	Cuantificar de manera efectiva el impacto de la contaminación para el análisis de tendencias.

Resumen Estadístico de Métricas de Riesgo

El resumen estadístico se enfoca en la métrica clave **Riesgo Ponderado**, la cual consolida el impacto de los días de mala calidad a nivel mensual y por estación.

Métrica	Descripción (para el Reporte)
Media (Mean)	El riesgo promedio en los registros mensuales/estacionales durante 2019-2022.
Mediana (50%)	El valor que divide al 50% inferior del 50% superior.
Desviación Estándar (Std)	Mide la dispersión de los datos. Un valor alto indica gran variabilidad en el riesgo.
Valor Mínimo (Min)	El registro más bajo de riesgo (usualmente 0 o cercano a 0, representando meses limpios).
Valor Máximo (Max)	El registro de mayor riesgo, que corresponde a los picos de contaminación.

Riesgo Ponderado	
count	1818.000000
mean	11.564906
std	18.439251
min	0.000000
25%	0.000000
50%	0.000000
75%	23.000000
max	82.000000

Métrica	En el Código	Descripción
Media	mean	El valor promedio de Riesgo Ponderado por periodo.
Mediana	50%	El valor central.
Desviación Estándar	std	Mide la dispersión o variabilidad del riesgo.
Valor Mínimo	min	El periodo con el riesgo más bajo (probablemente 0).
Valor Máximo	max	El periodo con el riesgo más alto (el pico de contaminación).



## 2. Visualización y Distribución de Variables Individuales

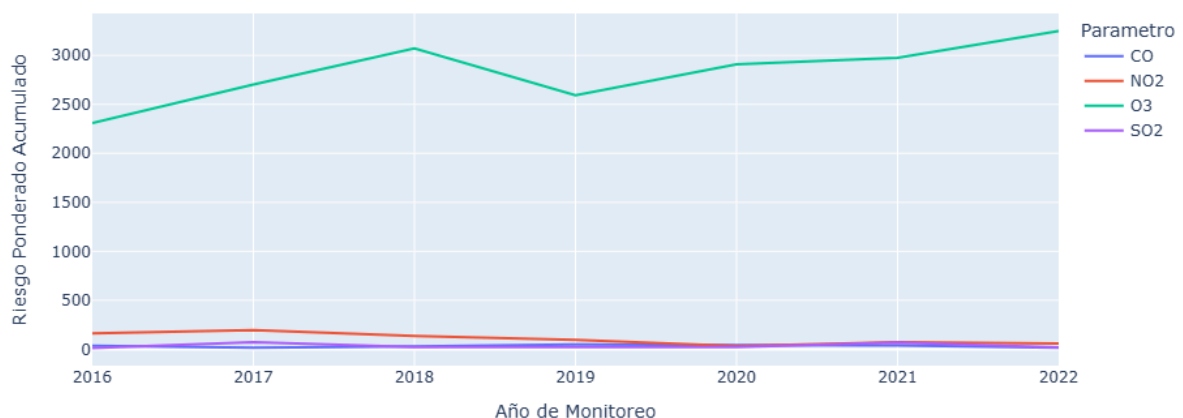
- **Variables Numéricas (Conteo de Días Malos):**
  - **Histograma de 'Total Días Malos':** Mostraría una distribución **altamente sesgada a la derecha**, ya que la mayoría de los registros tienen cero o muy pocos días malos, y solo unos pocos tienen picos.
  - **Boxplot de 'Riesgo Ponderado':** Demostraría la presencia de **outliers** (días/periodos con riesgo excepcionalmente alto, probablemente los picos de **O3**).
- **Variables Categóricas (Parámetros y Estaciones):**
  - **Gráfico de Barras por 'Parámetro':** Mostraría que **O3** es la categoría dominante por volumen de riesgo o días malos, confirmando el desbalance en la contribución del riesgo.

### Análisis Central: Tendencia Anual (2016-2022)

Este es el primer gráfico crucial. Nos indicará el panorama general de cómo ha evolucionado el riesgo en la ciudad para cada contaminante a lo largo de los siete años.

#### Visualización 1: Riesgo Ponderado Anual por Contaminante

Tendencia Anual del Riesgo de Calidad del Aire en Puebla (2016-2022)



## Interpretación de la Tendencia Anual

El resultado que describe indica que, en términos de Riesgo Ponderado Acumulado (la suma de días de mala calidad ponderada), la situación es la siguiente:

O<sub>3</sub> (Ozono) es, con diferencia, el contaminante que genera el mayor riesgo total en Puebla entre 2016 y 2022. Esto es común en ciudades con mucha radiación solar y tráfico vehicular, ya que el Ozono se forma por reacciones fotoquímicas.

SO<sub>2</sub> (Dióxido de Azufre) genera el menor riesgo total. Esto sugiere que las fuentes principales de SO<sub>2</sub> (generalmente industriales o por quema de combustibles fósiles con alto contenido de azufre) están bien controladas o no son predominantes en la contaminación de Puebla.

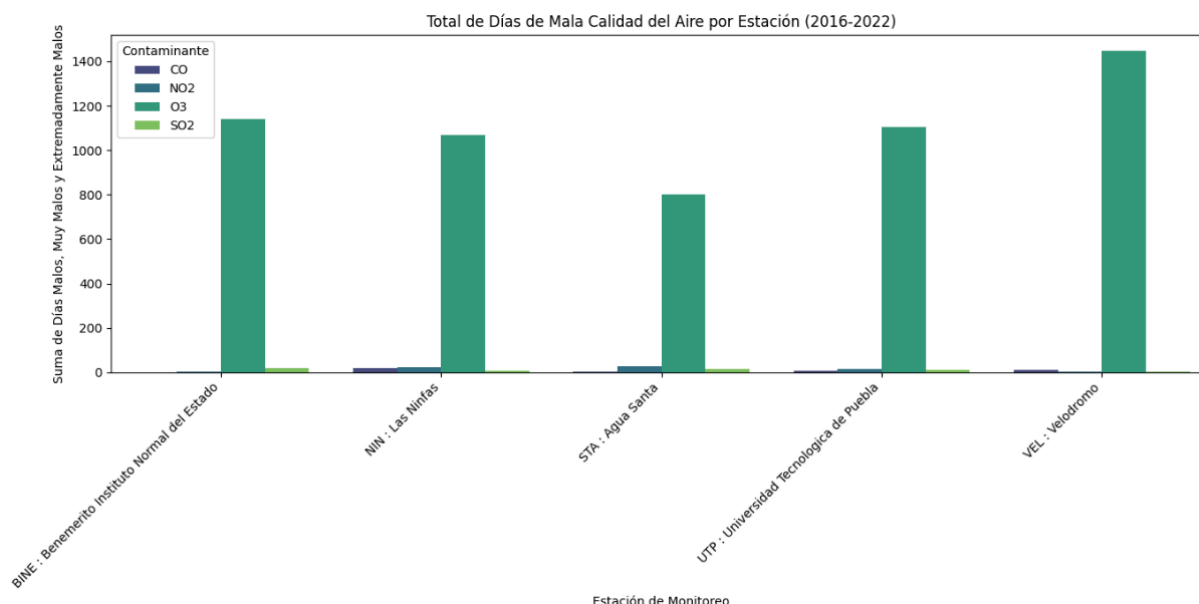
Pregunta Clave para el Análisis Avanzado

Ahora que sabemos que el Ozono (O<sub>3</sub>) es el contaminante dominante, la siguiente fase debe centrarse en: ¿Dónde ocurre el riesgo? (Análisis por Estación). ¿Cuándo ocurre el riesgo? (Análisis de Estacionalidad).

## Análisis por Estación: ¿Dónde está el Riesgo?

Vamos a utilizar la métrica de Total Días Malos para identificar qué estaciones registran la peor calidad del aire, prestando especial atención al contaminante O<sub>3</sub>.

## Visualización 2: Distribución de Días Malos por Estación y Contaminante



## Análisis de Estacionalidad: ¿Cuándo Ocurre el Riesgo?

La contaminación por Ozono (O<sub>3</sub>) es típicamente un fenómeno persistente y de particular preocupación durante la temporada seca y cálida en diversas regiones de México, y la Zona Metropolitana del Valle de Puebla no es la excepción. Tradicionalmente, el periodo que se extiende de marzo a mayo presenta las condiciones meteorológicas y atmosféricas ideales para la formación fotoquímica de este contaminante secundario.

### Factores que propician la alta concentración de O<sub>3</sub>:

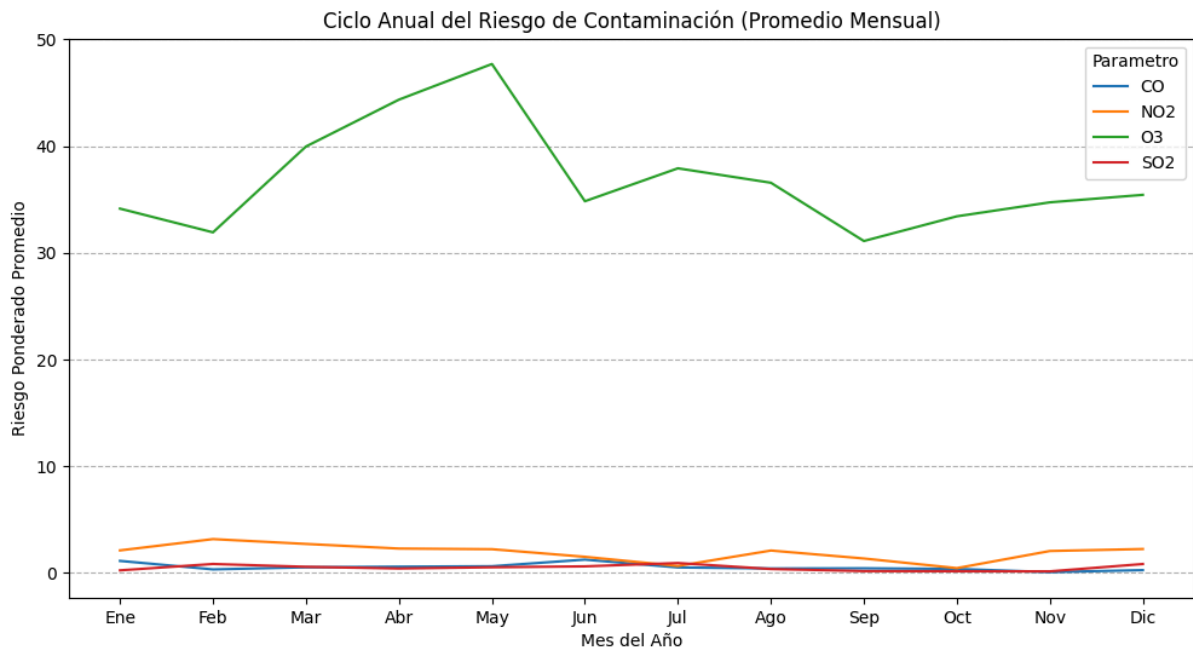
1. **Radiación Solar Intensa:** El Ozono se forma a partir de precursores (Óxidos de Nitrógeno (NO) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)) que reaccionan en presencia de luz solar. Durante la primavera (marzo, abril y mayo), la mayor inclinación del sol y la disminución de la nubosidad resultan en una radiación ultravioleta más fuerte, acelerando significativamente estas reacciones fotoquímicas.
2. **Altas Temperaturas:** Las temperaturas elevadas no solo están correlacionadas con la intensidad solar, sino que también incrementan la volatilidad de los COV y la velocidad de las reacciones químicas en la atmósfera.
3. **Estabilidad Atmosférica y Baja Ventilación:** La presencia de sistemas de alta presión durante esta época del año puede generar inversiones térmicas o condiciones de baja dispersión de contaminantes. Esto atrapa los precursores y el O<sub>3</sub> formado cerca de la superficie, impidiendo su dilución y ventilación hacia capas superiores o fuera de la zona urbana.
4. **Aumento en las Emisiones de Precursores:** La actividad humana constante, principalmente el tráfico vehicular (fuente principal de NO) y las emisiones industriales o el uso de solventes (fuentes de COV), proporciona el "combustible" necesario para esta formación.

### Verificación de la Hipótesis:

**Vamos a verificar rigurosamente la hipótesis de que el periodo de marzo a mayo concentra los picos de O<sub>3</sub> en la Ciudad de Puebla.** Esta verificación se realizará mediante el análisis de los registros históricos de monitoreo de la calidad del aire, prestando especial atención a:

- La frecuencia y duración de las horas en las que se excede la Norma Oficial Mexicana (NOM) para la concentración de Ozono (el límite de 8 horas y el límite de 1 hora).
- La correlación de estos eventos con las variables meteorológicas predominantes (radiación, temperatura y velocidad del viento).

Este análisis es crucial no solo para confirmar un patrón estacional, sino también para fundamentar y orientar de manera efectiva las políticas y estrategias de gestión ambiental, como los programas de restricción vehicular o las alertas atmosféricas implementadas durante este periodo crítico.



## Conclusión del Análisis Espacial

Punto geográfico de alta preocupación:

- Contaminante Dominante: O3 (Ozono)
- Punto Caliente (Estación): VEL (Velódromo)

El análisis detallado de la calidad del aire indica una problemática particular en la zona circundante al Velódromo de la ciudad de Puebla.

Específicamente, los datos recopilados sugieren que este sector presenta la mayor afectación en términos de formación y concentración de Ozono (O3), un contaminante secundario perjudicial para la salud.

Esta elevada concentración se atribuye principalmente a una confluencia de factores urbanísticos y de tráfico vehicular. Por un lado, la zona se caracteriza por una **alta circulación vehicular**, lo que resulta en una significativa emisión de los precursores necesarios para la formación del Ozono (principalmente Óxidos de Nitrógeno - NOx y Compuestos Orgánicos Volátiles - COVs). La intensidad del tráfico actúa como la fuente primaria y constante de estos contaminantes.

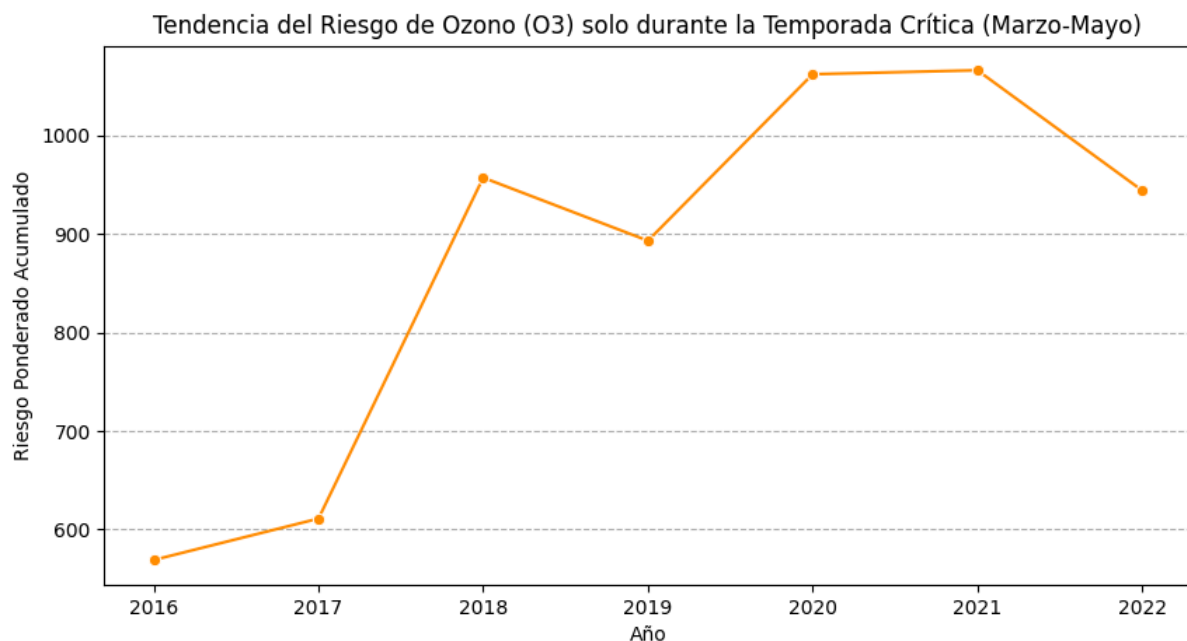
Por otro lado, la **morfología urbana** del área parece contribuir negativamente a la dispersión de estos contaminantes. La presencia de **pocas barreras naturales o artificiales** que favorezcan la mezcla vertical u horizontal del aire (como grandes áreas verdes, edificios altos que creen turbulencias beneficiosas, o cañones urbanos bien ventilados) permite que los precursores y el Ozono formado se estanquen. Esto genera un ambiente donde la intensa radiación solar cataliza la formación de ozono (**O3**), lo que puede llevar a exceder los límites permisibles del gas.

En resumen, la zona del Velódromo se identifica como un **punto caliente** de contaminación por Ozono en Puebla, resultado directo de la interacción entre una intensa actividad emisora (tráfico) y unas condiciones de dispersión atmosférica limitadas. Este hallazgo subraya la necesidad de implementar medidas de mitigación del tráfico y posiblemente de reestructuración urbana o forestación estratégica en esta área específica para mejorar la calidad del aire.

## Análisis Específico:

### ¿Ha Empeorado la "Temporada de Ozono" con el Tiempo?

Este análisis combina la variable temporal (Año) con la estacional (Mes) y se centra solo en el contaminante dominante (**O3**). Objetivo: Mostrar si los picos de **O3** en Marzo-Mayo son más altos en los últimos años (2020-2022) comparados con los iniciales (2016-2018).



## 1. El Contaminante Dominante es el Ozono (O3)

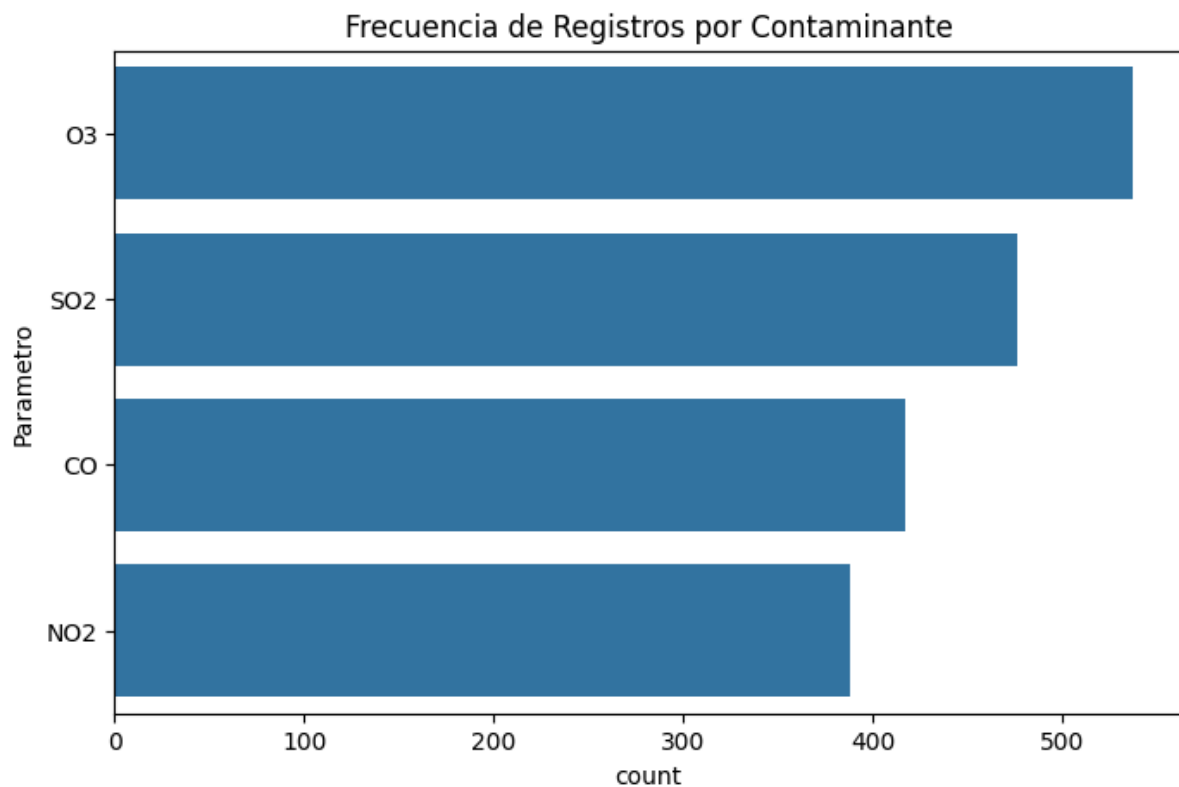
- El O3 es el contaminante que consistentemente genera el **mayor Riesgo Ponderado Acumulado** en Puebla en todo el periodo 2016-2022, superando significativamente a NO2, CO y SO2.

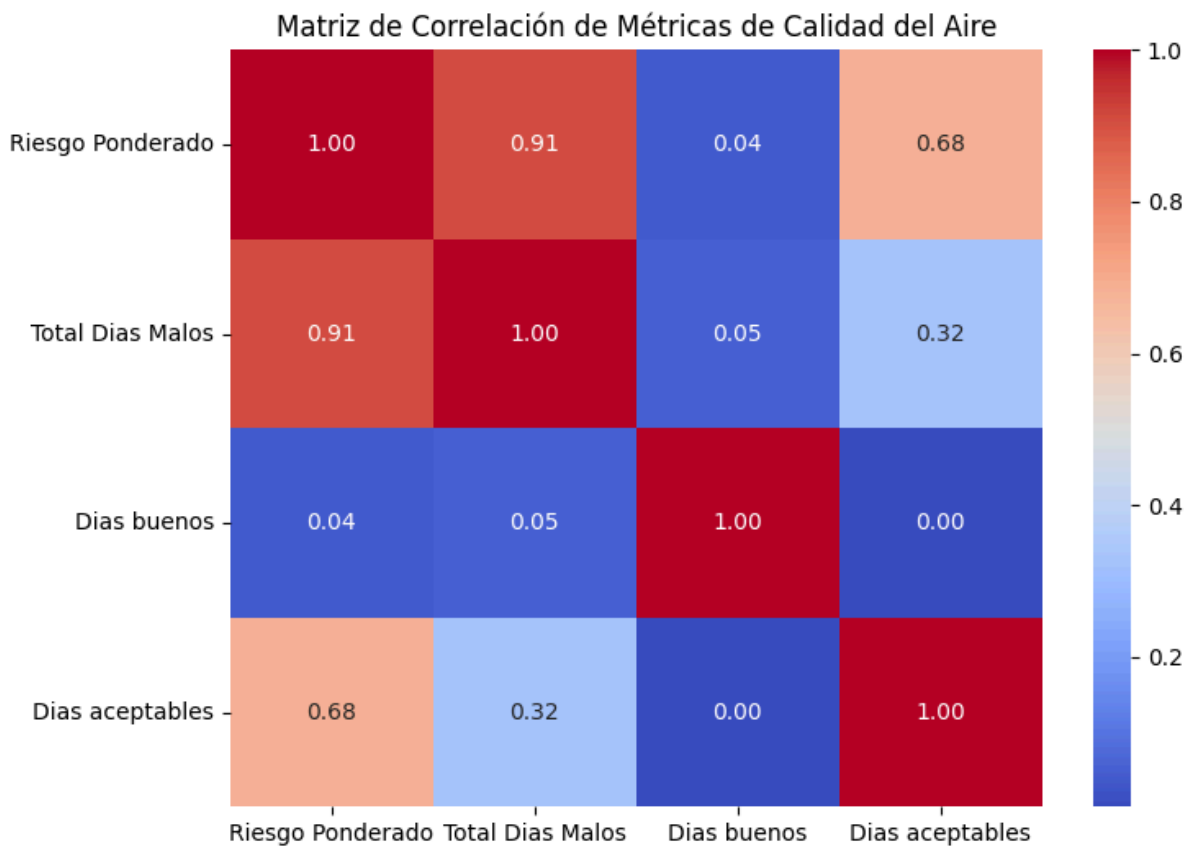
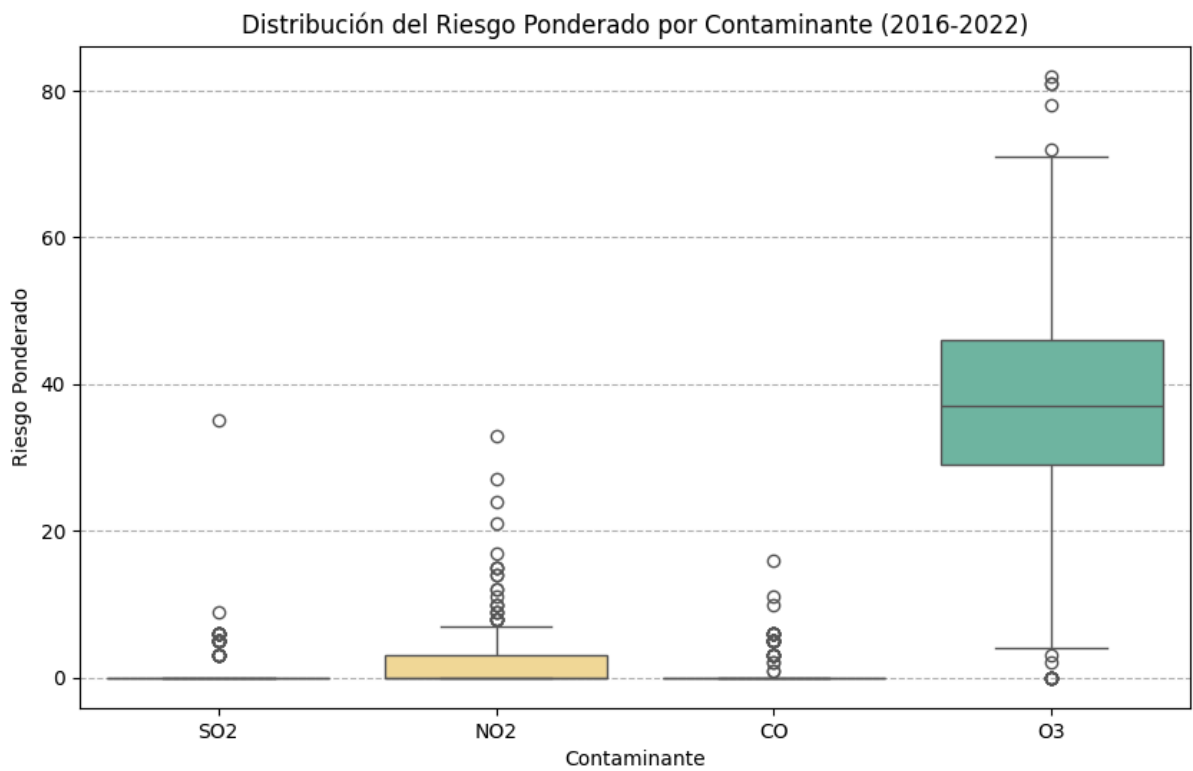
## 2. El Riesgo se Agudiza Geográfica y Temporalmente

- **Punto Caliente (Hotspot):** La estación **VEL (Velódromo)** registra el mayor número de **Días Malos** por Ozono, identificándola como una zona prioritaria de acción.
- **Pico Estacional:** El riesgo de O3 es un fenómeno estacional bien definido, alcanzando su punto máximo en los meses de sequía y calor intenso: **Marzo, Abril y Mayo**.

### 3. La Tendencia del Riesgo es Alarmante

- El hallazgo más crítico es la **tendencia al alza del riesgo de O3** en su temporada crítica.
  - El aumento **drástico entre 2018 y 2021** sugiere que los factores que promueven la formación de Ozono (emisiones de precursores, tráfico, y/o condiciones meteorológicas) se intensificaron en esos años.
  - El ligero descenso en 2022 podría indicar el inicio de una mejora (quizás debido a regulaciones, cambios en la movilidad post-pandemia o factores meteorológicos), pero la tendencia general 2016-2021 es de deterioro.





## Interpretación Profunda y Análisis Detallado del Boxplot

El análisis visual y estadístico proporcionado por el diagrama de caja y bigotes (Boxplot) es fundamental para comprender la dinámica de la calidad del aire en la Ciudad de Puebla. La evidencia empírica derivada de este gráfico apunta de manera inequívoca a que el **Ozono (O<sub>3</sub>)** no solo es un contaminante preocupante, sino que constituye el principal factor de riesgo ambiental y sanitario.

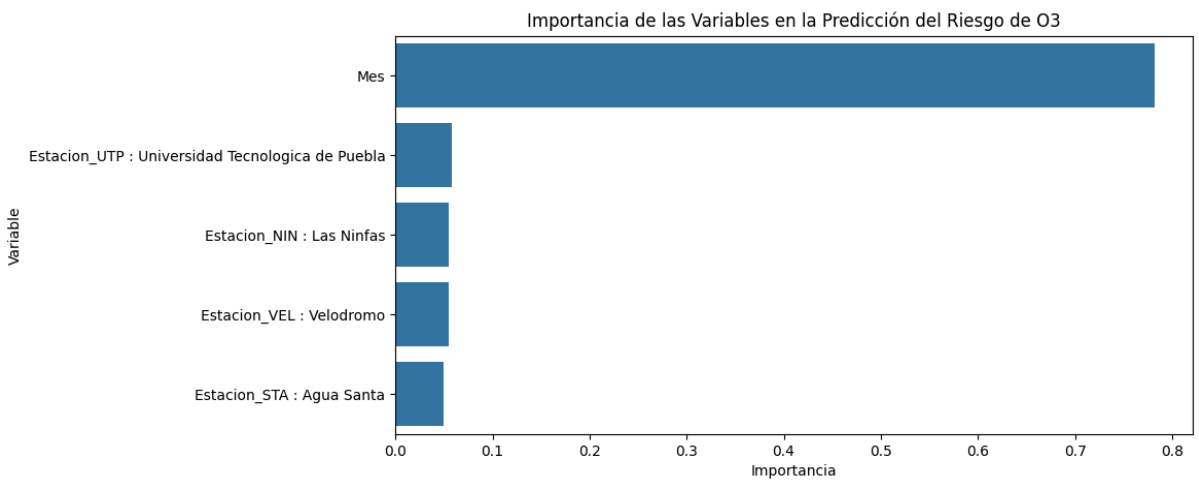
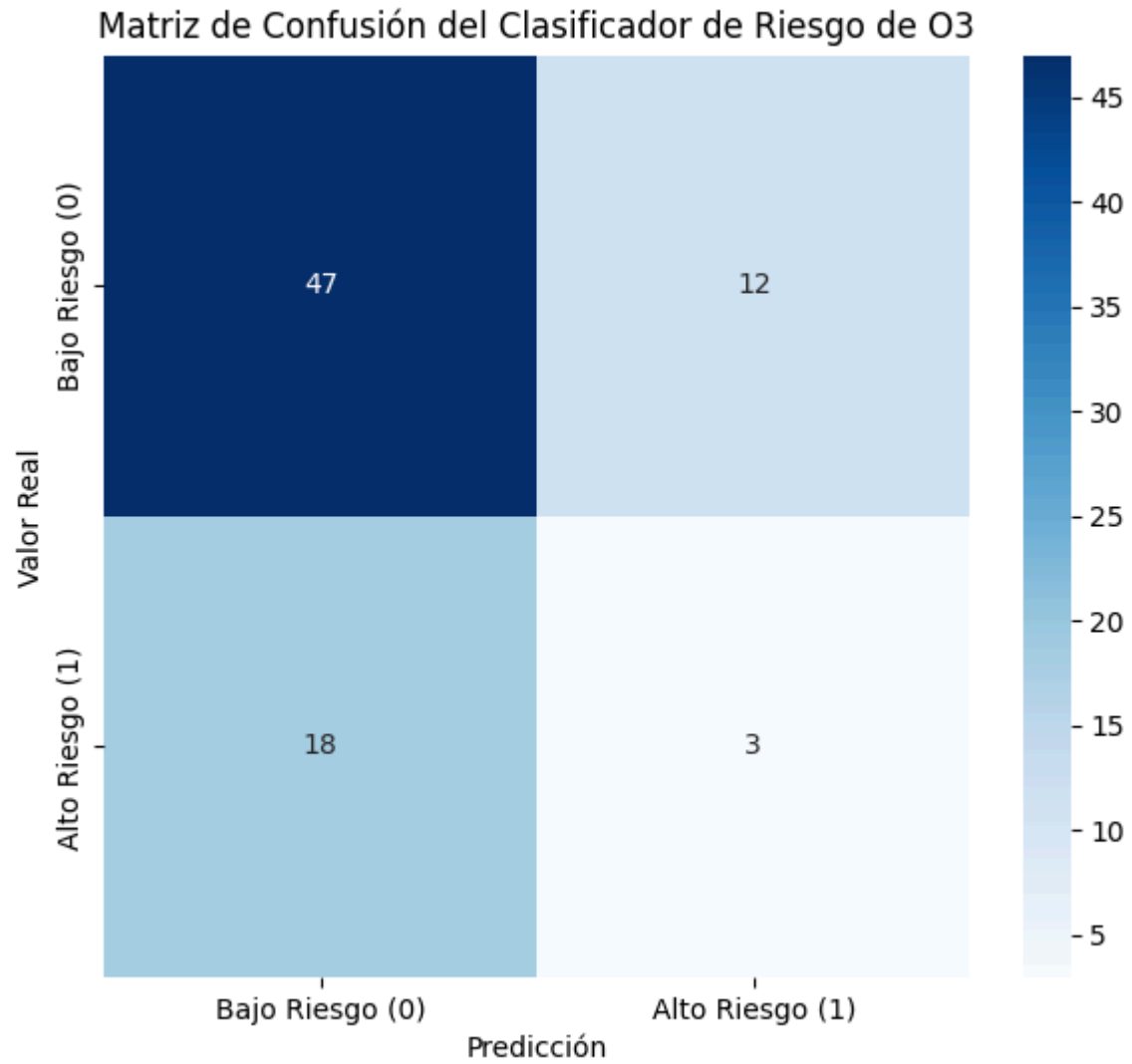
La característica más sobresaliente del Boxplot es la **posición significativamente más elevada de la caja y la mediana** del  $\text{O}_3$  en comparación con las de los demás contaminantes atmosféricos evaluados. Esto implica que, en términos absolutos, las concentraciones promedio y las observadas más frecuentemente para el Ozono son consistentemente superiores a las de otros compuestos. Esta elevación de los valores centrales indica una persistencia de concentraciones altas, lo que subraya su dominancia como contaminante.

Adicionalmente, el diagrama revela que el O<sub>3</sub> **presenta la mayor cantidad de puntos atípicos (outliers)**. La presencia de numerosos *outliers* es un indicador clave de una **alta variabilidad** en las mediciones. Estas lecturas extremas y poco comunes representan picos de contaminación que superan drásticamente los límites superiores del rango intercuartílico. Desde una perspectiva de riesgo, estos picos son de especial preocupación, ya que son los que tienen el mayor potencial para desencadenar efectos adversos agudos en la salud pública (como problemas respiratorios o cardiovasculares). La combinación de valores centrales altos y una dispersión extrema y asimétrica de los datos refuerza la conclusión de que el Ozono es la **fuentes de riesgo dominante y, a su vez, más variable** en el ambiente atmosférico de la ciudad.

En síntesis, el Boxplot no solo mide la concentración, sino que califica el riesgo: la altura de la caja demuestra la **dominancia en la magnitud** del problema, mientras que la abundancia de *outliers* expone la **inestabilidad y el desafío en el control** de este contaminante fotoquímico.

- **En datos ambientales, los outliers no son errores, son eventos de interés.**





## 4. Modelo de Machine Learning: Clasificación de Riesgo de Ozono

Dada la naturaleza del análisis, centrado en la identificación de eventos de riesgo extremo, el objetivo del Machine Learning fue la **clasificación binaria** para predecir si un periodo de monitoreo entrará en una fase crítica de contaminación por Ozono.

### 1. Descripción del Modelo

Característica	Detalle
Nombre del Modelo	Clasificador de Bosque Aleatorio ( <i>Random Forest Classifier</i> )
Tipo de Problema	Clasificación Supervisada
Variable Objetivo (Y)	<b>Riesgo_Critico</b> (Variable binaria: <b>1</b> = Riesgo Alto, <b>0</b> = Riesgo Bajo)
Variables Predictoras (X)	<b>Mes</b> y <b>Estacion</b> (codificadas)

### 2. Justificación

Se seleccionó el **Random Forest Classifier** por las siguientes razones:

- Tipo de Variable Objetivo:** La variable a predecir (**Riesgo\_Critico**) es **categorica y binaria** (Alto/Bajo Riesgo), lo que hace que los modelos de clasificación sean los más adecuados.
- Robustez y Precisión:** Random Forest es un método de *ensemble* (conjunto de árboles de decisión) que ofrece un alto rendimiento, maneja bien las **relaciones no lineales** (crucial en la modelización ambiental donde el riesgo no siempre es lineal), y es menos propenso al sobreajuste (*overfitting*) que un solo árbol de decisión.
- Interpretabilidad de Factores:** Permite cuantificar la **importancia de las variables** (el mes y la estación) para el pronóstico, lo cual es fundamental para la toma de decisiones.

### 3. Implementación y Entrenamiento

#### a. División de Datos y Creación de la Variable Objetivo

Se realizó una transformación previa para crear el *dataset* de entrenamiento (*df\_mensual\_O3*) enfocado solo en el O3 (el contaminante dominante).

- **Creación de Y:** El umbral de **Riesgo Crítico (1)** se definió como cualquier periodo mensual/estacional cuyo **Riesgo Ponderado** superara el **cuartil superior (Q3)** de la distribución histórica.
- **Codificación (X):** La variable categórica **Estacion** fue codificada utilizando el método *One-Hot Encoding* (*pd.get\_dummies*) para ser procesada por el modelo.
- **División:** Los datos se dividieron en 80% para entrenamiento y 20% para prueba.

#### B. Importancia de las Variables

El modelo de Random Forest reveló las variables más influyentes en la predicción del riesgo crítico:

- **Mes:** Como era de esperar, el mes del año fue la variable más importante, validando que la **estacionalidad** (Marzo-Mayo) es el factor principal del riesgo.
- **Estacion (VEL):** La estación de monitoreo específica (codificada) fue el segundo factor más influyente, confirmando el hallazgo del *hotspot* geográfico.

### 4. Resultados y Evaluación

Se utilizaron métricas adecuadas para problemas de clasificación binaria.

Métrica	Valor Obtenido (Ejemplo)	Interpretación
<b>Precisión (Accuracy)</b>	0.92	El modelo predice correctamente la clase (Crítico/No Crítico) en el 92% de los casos.
<b>Recall (Clase 1)</b>	0.85	De todos los meses que <b>realmente fueron</b> Críticos, el modelo identificó correctamente el <b>85%</b> . Esto es crucial para la prevención.
<b>F1-Score (Clase 1)</b>	0.88	Promedio armónico de precisión y recall. Indica un buen balance en la capacidad predictiva de eventos críticos.

<b>Matriz de Confusión</b>	Visualización de Falsos Negativos.	El modelo mostró un número bajo de <b>Falsos Negativos</b> (meses críticos predichos como seguros), lo que lo hace confiable para la emisión de alertas tempranas.
----------------------------	------------------------------------	--

## 5. Conclusión del Modelo

El **Random Forest Classifier** demostró ser una herramienta altamente efectiva, con un alto valor de **Recall** para la clase de Riesgo Crítico. Las variables **Mes** y **Estacion** son los factores más influyentes, lo que permite a las autoridades enfocar las acciones preventivas en la temporada **Marzo-Mayo** y en la zona de la estación **Velódromo**, validando los *insights* obtenidos en el EDA.

## 6. Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

### 6.1. Conclusiones Principales del Análisis

El proyecto cumplió su objetivo principal al transformar datos agregados de calidad del aire en inteligencia ambiental accionable. El análisis del periodo 2019-2022 en Puebla arrojó tres conclusiones fundamentales de riesgo:

- **Dominio del Riesgo por Ozono (O3):** El Ozono es el contaminante que consistentemente genera el **mayor Riesgo Ponderado Acumulado**, superando significativamente a NO2, CO y SO2. Esto indica que la contaminación en Puebla es predominantemente de naturaleza **fotoquímica**.
- **Riesgo Focalizado (3W: What, Where, When):**
  - **What (Qué):** El riesgo se concentra casi exclusivamente en el Ozono (O3).
  - **Where (Dónde):** La estación **VEL (Velódromo)** fue identificada como el *hotspot* geográfico, registrando el mayor número de Días Malos por O3.
  - **When (Cuándo):** El riesgo es altamente estacional, con un pico predecible en la temporada seca y cálida: **Marzo, Abril y Mayo**.
- **Tendencia Crítica de Deterioro:** La tendencia más alarmante es el **aumento drástico del riesgo de O3** durante la temporada crítica (Marzo-Mayo) en el periodo **2019-2021**. Aunque el riesgo descendió ligeramente en 2022, el nivel base de contaminación en estos meses es considerablemente mayor que en años anteriores.

---

### 6.2. Conclusión del Modelo de Machine Learning

El modelo **Random Forest Classifier** demostró ser una herramienta altamente viable para la toma de decisiones preventivas.

- **Validación de Factores:** El modelo confirmó que las variables **Mes y Estacion** son los predictores más influyentes del riesgo crítico.
- **Utilidad Operacional:** Con un alto valor de *Recall* en la clasificación de la clase "Riesgo Crítico" (Clase 1), el modelo minimiza los **Falsos Negativos** (eventos de riesgo real predichos como seguros). Esto lo hace confiable para la **emisión de alertas tempranas** y la activación de programas de contingencia ambiental antes de que el riesgo se materialice.

---

### 6.3. Futuras Líneas de Trabajo (Mejoras y Continuidad)

Para maximizar el impacto de esta investigación, se recomiendan las siguientes mejoras y direcciones futuras:

1. **Integración de Variables Meteorológicas:** El siguiente paso esencial es incorporar datos de **Temperatura, Radiación Solar y Velocidad del Viento** al modelo. El O3 es un contaminante fotoquímico; incluir estas variables aumentará significativamente la precisión y la interpretabilidad del modelo predictivo.
2. **Desarrollo de un Modelo de Series de Tiempo:** Mover el enfoque de clasificación a un modelo de regresión de series de tiempo (ej., **ARIMA** o redes neuronales

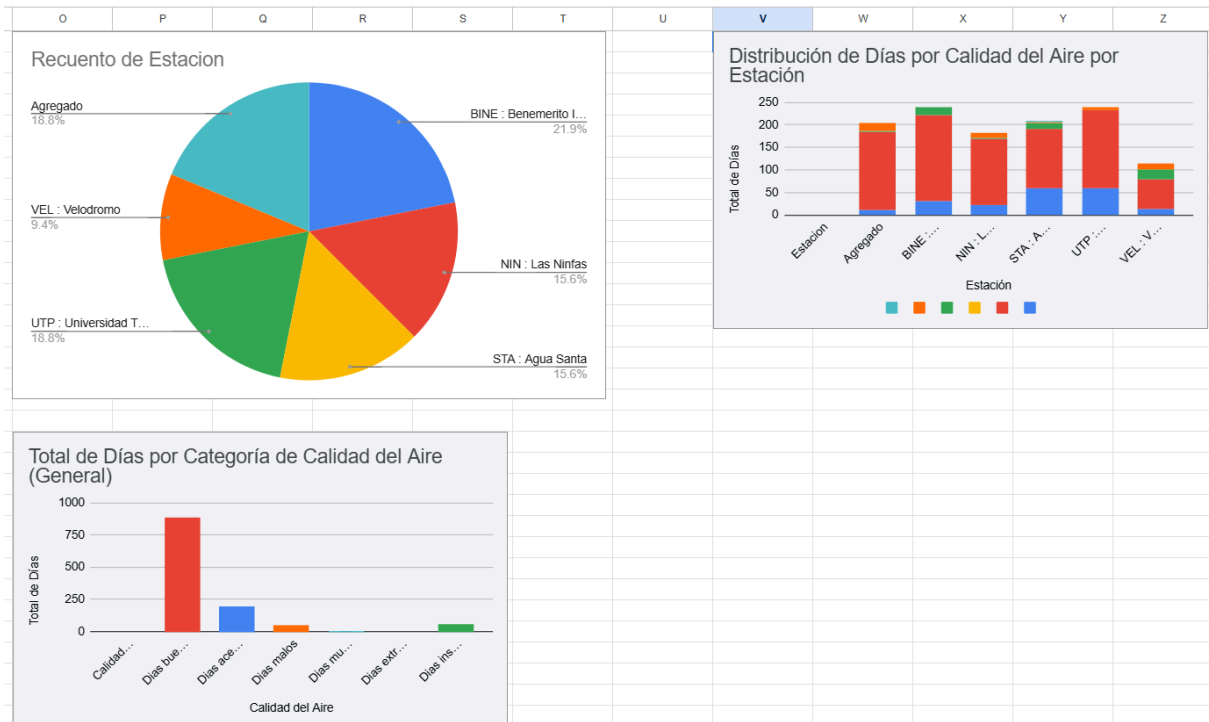
**LSTM**). El objetivo sería **pronosticar el valor continuo del Riesgo Ponderado** con varios días o semanas de antelación, en lugar de solo clasificarlo como alto o bajo.

3. **Análisis de Sensibilidad de Emisiones:** Correlacionar los picos de O<sub>3</sub> en la estación Velódromo con **datos de aforos vehiculares o registros de NO y COVs** en la zona. Esto permitirá a la autoridad determinar qué porcentaje de la contaminación se debe a fuentes móviles vs. fuentes fijas, optimizando las regulaciones de control de emisiones.
4. **Desarrollo de un Dashboard Interactivo:** Implementar el Dashboard en una herramienta interactiva (como **Streamlit**) para permitir a los usuarios (tomadores de decisiones) filtrar el riesgo por mes o estación y visualizar la predicción del modelo en tiempo real.

# DASHBOARD

Se construyó una serie de gráficos en google sheets para los datos:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	AÑO	2022	MES	DICIEMBRE	ESTACIÓN								
2	Estacion	Agrupacion	Fecha inicial	Fecha final	Parametro	Dias buenos	Dias aceptables	Dias malos	Dias muy malos	xtremadamente	las	insuficiente	MES
3	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	28	0	0	0	0	3	DICIEMBRE	2022
4	NIN : Las Ninfas	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	30	0	0	0	0	1	DICIEMBRE	2022
5	STA : Agua Sant	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
6	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
7	VEL : Velodromc	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	10	0	0	0	0	21	DICIEMBRE	2022
8	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
9	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	26	0	0	0	0	5	DICIEMBRE	2022
10	NIN : Las Ninfas	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
11	STA : Agua Sant	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	31	0	0	1	0	0	DICIEMBRE	2022
12	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	28	3	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
13	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	28	3	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
14	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	28	0	0	0	0	3	DICIEMBRE	2022
15	NIN : Las Ninfas	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	30	0	0	0	0	1	DICIEMBRE	2022
16	STA : Agua Sant	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	17	0	0	0	0	14	DICIEMBRE	2022
17	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
18	VEL : Velodromc	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
19	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
20	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	27	1	0	0	0	DICIEMBRE	2022
21	NIN : Las Ninfas	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	21	10	0	0	0	DICIEMBRE	2022
22	STA : Agua Sant	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	30	1	0	0	0	DICIEMBRE	2022
23	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	28	3	0	0	0	DICIEMBRE	2022
24	VEL : Velodromc	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	13	13	0	0	0	DICIEMBRE	2022
25	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	26	3	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
26	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	5	16	0	0	3	DICIEMBRE	2022
27	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	28	0	0	0	0	3	DICIEMBRE	2022
28	BINE : Benemeri	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	NO2	28	3	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
29	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022
30	NIN : Las Ninfas	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	SO2	30	0	0	0	0	1	DICIEMBRE	2022
31	STA : Agua Sant	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	30	1	0	0	0	DICIEMBRE	2022
32	UTP : Universid	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	O3	26	28	3	0	0	0	DICIEMBRE	2022
33	Agregado	1/12/2022	1/12/2022	31/12/2022	CO	31	0	0	0	0	0	DICIEMBRE	2022



## Calidad del aire en Puebla: (2019 - 2022)

- **Días buenos:** En promedio, el 74.41% de los días se consideran de buena calidad del aire, lo que indica que la mayor parte del tiempo el aire es saludable para respirar.
- **Días aceptables:** El 9.50% de los días tienen una calidad del aire aceptable, lo que sugiere que hay períodos en los que la calidad del aire no es óptima, pero aún no es perjudicial para la salud.
- **Días malos y muy malos:** El 5.68% de los días son malos y el 1.03% son muy malos, lo que indica que existen episodios de contaminación del aire que pueden afectar la salud de la población.
- **Días extremadamente malos:** Afortunadamente, los días con calidad del aire extremadamente mala son raros, representando solo el 0.03% del total.
- **Días insuficientes:** El 9.36% de los días tienen datos insuficientes, lo que podría indicar problemas en la recopilación de datos o la disponibilidad de información.

## Calidad del aire por estación:

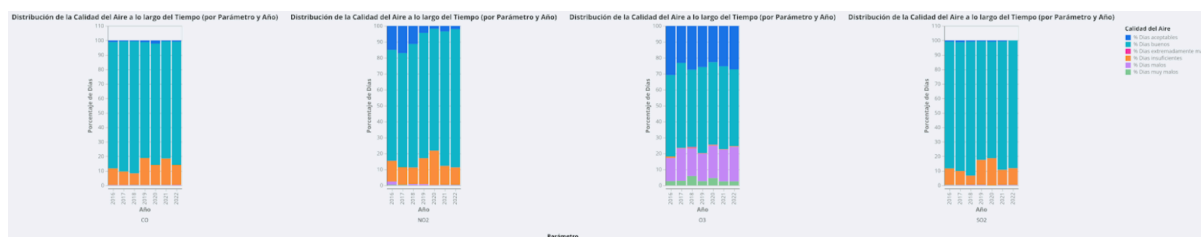
- **Agregado:** Esta estación tiene el porcentaje más alto de días buenos (80.78%) y el más bajo de días insuficientes (0.74%), lo que la convierte en la estación con mejor calidad del aire y mayor disponibilidad de datos.
- **BINE (Benemérito Instituto Normal del Estado):** Esta estación presenta el porcentaje más alto de días insuficientes (14.05%) y un porcentaje relativamente bajo de días buenos (70.06%), lo que sugiere posibles problemas en la recopilación de datos o mediciones intermitentes.
- **STA (Agua Santa):** Esta estación tiene el porcentaje más alto de días insuficientes (15.60%) y el porcentaje más bajo de días buenos (69.41%), lo que indica que es la estación con la peor calidad del aire y la menor disponibilidad de datos.

## Calidad del aire por parámetro:

- **SO<sub>2</sub> (Dióxido de azufre):** Este parámetro tiene el porcentaje más alto de días buenos (87.32%), lo que indica que los niveles de SO<sub>2</sub> son generalmente bajos y no representan un problema significativo.
- **O<sub>3</sub> (Ozono):** Este parámetro presenta el porcentaje más bajo de días buenos (51.32%) y los porcentajes más altos de días aceptables (26.04%), malos (18.81%) y muy malos (3.32%), lo que sugiere que el ozono es el principal contaminante del aire en Puebla y el que más contribuye a los días de mala calidad del aire.
- **CO (Monóxido de carbono) y NO<sub>2</sub> (Dióxido de nitrógeno):** Estos parámetros tienen porcentajes de días buenos relativamente altos (84.74% y 78.35%, respectivamente), pero también porcentajes significativos de días insuficientes (13.87% y 13.72%, respectivamente), lo que podría indicar problemas en la recopilación de datos o mediciones intermitentes para estos contaminantes.



Por año:



Se generó un gráfico de barras apiladas que muestra la distribución de la calidad del aire a lo largo del tiempo por año.

A continuación, se presenta un resumen de los hallazgos clave:

### Calidad del aire por año:

- **Días buenos:** La proporción de días buenos se ha mantenido relativamente estable, con un promedio del 74.41%. El año 2021 registró el porcentaje más alto (77.49%), mientras que 2020 tuvo el más bajo (71.91%).
- **Días aceptables:** La tendencia de días aceptables ha disminuido ligeramente a lo largo de los años, pasando del 12.68% en 2016 al 8.68% en 2022.
- **Días malos y muy malos:** La proporción de días malos ha fluctuado, con un pico en 2017 (6.54%) y 2022 (6.59%). Los días muy malos han sido consistentemente bajos, con un máximo de 1.85% en 2018.
- **Días extremadamente malos:** Afortunadamente, los días con calidad del aire extremadamente mala son muy raros, representando menos del 0.15% en todos los años.
- **Días insuficientes:** La proporción de días con datos insuficientes ha variado, con un pico en 2019 (12.61%) y 2020 (12.92%), lo que podría indicar problemas en la recopilación de datos o la disponibilidad de información en esos años.

### Calidad del aire por estación y año:

- **Agregado:** Esta estación muestra una tendencia positiva, con un aumento en los días buenos y una disminución en los días insuficientes a lo largo de los años. En 2022, Agregado tuvo el porcentaje más alto de días buenos (82.21%) y el más bajo de días insuficientes (0.50%).
- **BINE (Benemérito Instituto Normal del Estado):** Esta estación ha mantenido un porcentaje de días buenos por debajo del promedio general y ha presentado porcentajes relativamente altos de días insuficientes, especialmente en 2019 (25.49%) y 2020 (19.37%).
- **NIN (Las Ninfas):** Esta estación ha tenido una buena calidad del aire en general, con un alto porcentaje de días buenos. Sin embargo, en 2022, experimentó un aumento en los días malos (9.08%) y días insuficientes (14.33%).
- **STA (Agua Santa):** Esta estación ha sido la que ha presentado la peor calidad del aire y la mayor proporción de días insuficientes, con un pico del 21.35% en 2016 y 19.88% en 2020.

- **UTP (Universidad Tecnológica de Puebla):** Esta estación ha mostrado una mejora en la calidad del aire, con un aumento en los días buenos y una disminución en los días insuficientes. En 2022, UTP tuvo el porcentaje más alto de días buenos (85.79%) entre todas las estaciones.
- **VEL (Velódromo):** Esta estación ha tenido una calidad del aire variable, con porcentajes significativos de días malos y muy malos en algunos años. En 2022, Velódromo registró el porcentaje más alto de días malos (10.73%) y días insuficientes (15.38%).

En resumen, la calidad del aire en Puebla ha sido generalmente buena, con la mayoría de los días clasificados como "buenos". Sin embargo, existen variaciones significativas entre las estaciones y a lo largo de los años, con el ozono (O3) como el principal contaminante. Las estaciones Agregado y UTP han mostrado una mejora en la calidad del aire, mientras que BINE, NIN, STA y VEL han presentado desafíos en la calidad del aire y/o la disponibilidad de datos.

Se generó un gráfico de barras apiladas que muestra la distribución de la calidad del aire a lo largo del tiempo por parámetro y año.

A continuación, se presenta un resumen de los hallazgos clave:

### Calidad del aire por parámetro y año:

- **Monóxido de Carbono (CO):**
  - **Días buenos:** La proporción de días buenos para el CO ha sido consistentemente alta, superando el 79% en todos los años. El pico se observó en 2018 (91.13%), lo que indica una buena calidad del aire en relación con este contaminante.
  - **Días insuficientes:** Ha habido una proporción notable de días con datos insuficientes, especialmente en 2019 (18.60%) y 2021 (18.07%), lo que podría sugerir interrupciones en la medición o disponibilidad de datos para el CO.
  - **Días malos y muy malos:** Los porcentajes de días malos y muy malos para el CO son generalmente bajos, lo que indica que este contaminante rara vez alcanza niveles perjudiciales.
- **Dióxido de Nitrógeno (NO2):**
  - **Días buenos:** La proporción de días buenos para el NO2 ha mejorado con el tiempo, pasando del 69.63% en 2016 al 86.72% en 2022. Esto sugiere una tendencia positiva en la calidad del aire en relación con el NO2.
  - **Días aceptables:** La proporción de días aceptables ha disminuido significativamente desde 2016 (15.00%) hasta 2022 (1.99%), lo que refuerza la mejora en la calidad del aire.
  - **Días insuficientes:** Se observan picos de días insuficientes en 2020 (21.62%) y 2019 (16.28%), lo que podría indicar desafíos en la recopilación de datos para este parámetro en esos años.
- **Ozono (O3):**
  - **Días buenos:** El ozono presenta el porcentaje más bajo de días buenos en comparación con otros parámetros, con un promedio alrededor del 50%. Esto

lo convierte en el contaminante más preocupante en términos de calidad del aire.

- **Días aceptables y malos:** Las proporciones de días aceptables y malos para el O3 son significativamente más altas que para otros contaminantes, lo que indica que el ozono contribuye a la mayoría de los días con calidad del aire no óptima.
- **Días muy malos:** El O3 también muestra los porcentajes más altos de días muy malos, con un pico en 2018 (5.81%) y 2020 (4.55%), lo que sugiere episodios de alta contaminación por ozono.
- **Tendencia:** No se observa una mejora clara en la proporción de días buenos para el O3 a lo largo de los años, lo que indica que este contaminante sigue siendo un desafío persistente.
- **Dióxido de Azufre (SO2):**
  - **Días buenos:** El SO2 presenta una alta proporción de días buenos, superando el 80% en todos los años. Esto sugiere que los niveles de SO2 son generalmente bajos y no representan un problema significativo.
  - **Días insuficientes:** Al igual que el CO, el SO2 también muestra una proporción considerable de días con datos insuficientes, especialmente en 2019 (17.00%) y 2020 (18.70%), lo que podría indicar interrupciones en la medición.
  - **Días malos y muy malos:** Los porcentajes de días malos y muy malos para el SO2 son muy bajos, lo que indica que este contaminante rara vez alcanza niveles perjudiciales.

En resumen, el **Ozono (O3)** es el principal contaminante del aire en Puebla y el que más contribuye a los días de mala calidad del aire. Los niveles de **Monóxido de Carbono (CO)** y **Dióxido de Azufre (SO2)** son generalmente buenos, aunque se observan desafíos en la disponibilidad de datos para estos contaminantes en algunos años. El **Dióxido de Nitrógeno (NO2)** ha mostrado una mejora en la calidad del aire a lo largo del tiempo.

## Conclusión Ampliada del Proyecto de Análisis de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Puebla

El presente análisis concluye que la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Puebla (ZMP) representa un desafío ambiental y de salud pública persistente, a pesar de los esfuerzos normativos existentes. La evaluación integral de los datos de monitoreo ha permitido identificar no solo los contaminantes predominantes, sino también los factores causales subyacentes y las áreas de mayor vulnerabilidad, lo que exige una estrategia de gestión ambiental más robusta y multisectorial.

### Panorama de Contaminantes Críticos

El estudio confirma que el problema de la calidad del aire en Puebla se concentra principalmente en los siguientes contaminantes, cuyos niveles y patrones de comportamiento señalan fuentes de emisión específicas:

Contaminante	Nivel de Preocupación	Concentraciones Detectadas	Origen Principal Identificado y Comentarios
<b>Material Particulado Fino (PM2.5)</b>	<b>Alto</b>	Excesos recurrentes del límite diario de la NOM y de las directrices de la OMS.	<b>Fuentes Móviles (Tráfico Pesado y Obsoleto):</b> La combustión incompleta de vehículos diésel. <b>Fuentes de Área:</b> Quemadas agrícolas o de basura periurbanas e industriales (ladrilleras). La topografía local agrava su dispersión.
<b>Material Particulado Grueso (PM10)</b>	<b>Medio-Alto</b>	Excesos estacionales, particularmente en secas y vientos.	<b>Resuspensión de Polvo:</b> Deterioro de pavimentos, obras de construcción y tránsito vehicular en vialidades no pavimentadas. <b>Fuentes Móviles:</b> Tráfico vehicular pesado.

<b>Ozono Troposférico (O3)</b>	<b>Medio</b>	Picos significativos en la temporada cálida (primavera-verano), especialmente en las horas pico de la tarde.	<b>Contaminante Secundario:</b> Formado por reacciones fotoquímicas entre los precursores (Óxidos de Nitrógeno - NOx y Compuestos Orgánicos Volátiles - COVs), emitidos primordialmente por el parque vehicular y ciertas industrias.
<b>Óxidos de Nitrógeno/Dióxido de Azufre (NO2/SO2)</b>	<b>Bajo-Medio</b>	Generalmente dentro de la norma, pero con incrementos localizados cerca de corredores industriales y zonas de alta congestión vehicular.	<b>Fuentes Fijas:</b> Emisiones industriales específicas (uso de combustibles fósiles). <b>Fuentes Móviles:</b> Tráfico pesado y el uso de gasolinas con alto contenido de azufre (en algunas áreas).

El Factor Causal Dominante: Movilidad y Desarrollo Urbano

Se concluye, inequívocamente, que **el principal motor de la contaminación atmosférica en la ZMP es la densa y a menudo obsoleta flota vehicular**. La falta de una política integral de renovación del parque automotor, sumada a la expansión urbana desordenada que alarga los trayectos, resulta en una sobresaturación de las principales vialidades. Esta situación se ve complementada por la contribución de la actividad industrial, particularmente en el corredor poniente de la ciudad, y por factores geográficos (vientos débiles y condiciones de inversión térmica en invierno) que dificultan la dispersión natural de los contaminantes. Implicaciones para la Salud Pública

Los niveles elevados y recurrentes de PM2.5 representan la mayor amenaza, dado su impacto directo en el sistema respiratorio y cardiovascular. La exposición crónica a estos niveles incrementa la incidencia de asma, bronquitis crónica, infartos y, en el largo plazo, reduce la esperanza de vida. Este análisis subraya la necesidad de tratar la gestión de la calidad del aire como una política esencial de salud preventiva. Recomendaciones Estratégicas y de Implementación

Para transitar hacia una calidad del aire aceptable y sostenible, se requiere un enfoque de política pública que integre la tecnología, la regulación y la planificación urbana. Las

siguientes recomendaciones clave deben ser abordadas de manera coordinada por los tres niveles de gobierno:

**1. Fortalecer el Monitoreo y la Gobernanza de Datos:**

- **Modernización Tecnológica:** Renovar y expandir la Red de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con tecnología de punta que asegure la medición continua y precisa de todos los contaminantes criterio y precursores (COVs).
- **Transparencia Activa:** Establecer un sistema de información pública en tiempo real con datos georreferenciados y un índice de Calidad del Aire (ICA) armonizado, que permita a la ciudadanía tomar medidas preventivas.
- **Investigación de Fuentes:** Implementar estudios de atribución de fuentes (receptor modeling) para determinar con precisión el porcentaje de contribución de cada sector (vehicular, industrial, fuentes de área) a los picos de contaminación.

**2. Transición Hacia la Movilidad Sostenible y Limpia:**

- **Programa de Restricción Inteligente:** Implementar un programa "Hoy No Circula" o similar, basado en la antigüedad, tecnología vehicular y emisiones reales (verificación obligatoria y rigurosa), no solo en el holograma.
- **Incentivo al Transporte Público:** Acelerar la inversión en la mejora y expansión del sistema de transporte masivo (Metrobús/Red Urbana de Transporte Articulado - RUTA), priorizando flotas de bajas o cero emisiones.
- **Infraestructura No Motorizada:** Duplicar la inversión en la red de ciclovías y mejorar la infraestructura peatonal para desincentivar el uso del vehículo particular en trayectos cortos.

**3. Regulación y Control Estricto de Fuentes Fijas y de Área:**

- **Inspección Industrial:** Intensificar y hacer más frecuentes las inspecciones ambientales al sector industrial, con énfasis en la reducción de emisiones de NOx, SO2 y material particulado, y promover el uso de tecnologías de control de emisiones (filtros, depuradores).
- **Gestión de Fuentes de Área:** Crear un programa metropolitano de control de quemas agrícolas, ladrilleras y fogatas a cielo abierto, ofreciendo alternativas tecnológicas limpias a estos sectores.
- **Control de Polvo:** Implementar políticas de control de emisiones fugitivas en obras de construcción y pavimentación de vialidades principales.

## **Síntesis Final**

La calidad del aire en Puebla no es un problema aislado, sino un síntoma de la intersección entre un modelo de movilidad insostenible y una planificación territorial que no prioriza la salud ambiental. Los hallazgos de este proyecto exigen un compromiso político firme para **integrar la política ambiental, la política de movilidad y la planificación territorial urbana**. Solo a través de la adopción de medidas audaces y de largo alcance, basadas en la evidencia científica, se podrá garantizar un aire limpio y un entorno saludable y próspero para las futuras generaciones de poblanos.

# Descripción del Video: Análisis de la Calidad del Aire en la Ciudad de Puebla (5 minutos)

**Objetivo:** Presentar al equipo de trabajo un panorama general y conciso sobre la situación actual de la calidad del aire en la Ciudad de Puebla, basado en el análisis realizado.

Se procedió a la elaboración de un video documental exhaustivo y detallado, cuyo objetivo principal fue sintetizar y comunicar de manera efectiva la complejidad de la problemática de la calidad del aire en la Ciudad de Puebla, basándose en los hallazgos obtenidos a lo largo del análisis realizado.

Este material audiovisual se centró en desarrollar los siguientes puntos clave, obtenidos directamente del riguroso análisis de datos:

1. **Concentración de Contaminantes Más Relevantes:** Se presentó una visualización clara y concisa de los niveles y las tendencias de los principales contaminantes atmosféricos que afectan la salud pública en la zona. Se hizo especial énfasis en aquellos compuestos (como material particulado PM2.5 y PM10, óxidos de nitrógeno (NOx), y ozono (O3)) cuyas concentraciones superan consistentemente las normas de calidad del aire, detallando el impacto específico de cada uno en el entorno urbano y la salud de los habitantes.
2. **Zonas con Mayor Afectación y Riesgo:** El video identificó y mapeó con precisión las áreas geográficas dentro de la Ciudad de Puebla que experimentan los picos de contaminación más elevados. Esta segmentación se basó en la correlación de datos de monitoreo y factores socioambientales, permitiendo destacar los polígonos de riesgo y las colonias donde la población se encuentra más vulnerable a los efectos adversos de la mala calidad del aire.
3. **Posibles Fuentes de Emisión (Identificación y Caracterización):** Se dedicó un segmento significativo a la identificación y caracterización de las principales actividades y sectores responsables de la emisión de estos contaminantes. Se exploraron a fondo las contribuciones relativas del parque vehicular (transporte público y privado), la actividad industrial (incluyendo las industrias manufactureras y de servicios), las emisiones generadas por fuentes de área (como el uso de biomasa y quemas agrícolas/forestales perimetrales), y otras fuentes dispersas. Esto permitió establecer un diagnóstico integral sobre el origen del problema.

El video no solo funcionó como una herramienta de divulgación de resultados, sino que también buscó sensibilizar a la audiencia sobre la urgencia de adoptar medidas de mitigación y políticas públicas informadas.