

Inversión Térmica en AMM

Gisel Regina Benítez Calvillo | A00228137

Julio Avelino Amador Fernández | A01276513

Luis Eduardo Martínez Aguirre | A00840037

Miguel Angel González Gutiérrez | A01198604

Problema

La acumulación peligrosa de contaminantes en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) ocurre bajo condiciones específicas de estabilidad atmosférica que no son detectadas con suficiente precisión ni anticipación.

Este proyecto desarrolla una métrica de riesgo operativa que vincula directamente la inversión térmica con episodios críticos de contaminación, permitiendo a SIMA identificar y gestionar con mayor eficacia los eventos de estancamiento ambiental.

Pregunta de investigación

¿Cómo puede identificarse la inversión térmica a partir de condiciones meteorológicas, y qué relación guarda con la acumulación de contaminantes atmosféricos en el Área Metropolitana de Monterrey durante 2023 y 2024?

Variables

Estaciones

Datos	% imputados	% perdidos por Na	% atípicos borrados
SO2	6.71	6.71	7.76
CO	7.05	7.05	0
O3	5.01	5.01	2.96
NOx	4.11	4.11	0
NO2	4.31	4.31	3.84
PM2.5	29.56	29.56	4.43
PM10	3.67	3.67	4.36
TOUT	4.63	4.63	0.51
WSR	2.70	2.70	1.19
WDR	2.27	2.27	0
RH	10.18	10.18	0
SR	4.46	4.46	7.18

Se aplicó MICE (Multiple Imputation by Chained Equations) para preservar la estructura multivariada y evitar sesgos al completar valores faltantes.

NE2: 432 msnm
NE: 474 msnm
SE: 500 msnm
NTE: 503 msnm
NTE2: 520 msnm
SUR: 555 msnm
CE: 562 msnm
NO: 568 msnm
SO2: 636 msnm
SO: 674 msnm

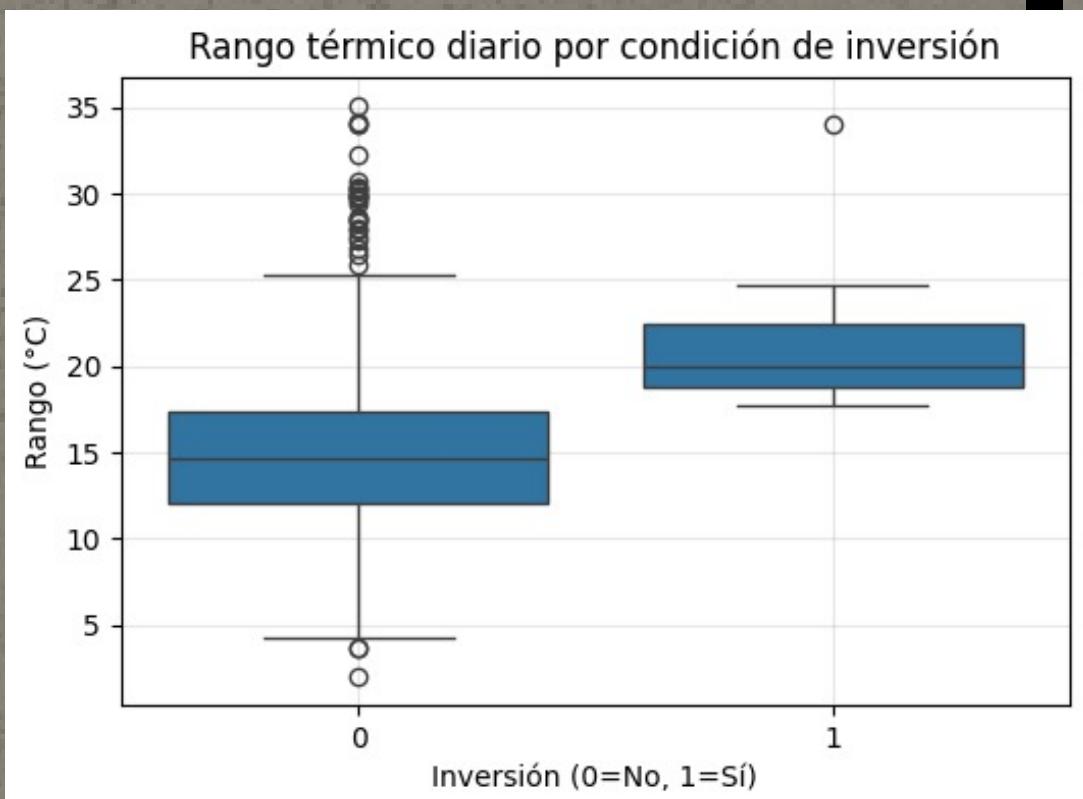
Se excluyeron 5 estaciones (NOROESTE2, NOROESTE3, NORESTE3, SURESTE2, SURESTE3) por su proximidad a zonas industriales y refinerías de Monterrey, donde emisiones irregulares podrían sesgar la medición de condiciones típicas de estabilidad urbana.

El enfoque prioriza capturar condiciones cotidianas y representativas del comportamiento atmosférico urbano en el AMM.

Inversión Térmica

Gradiente Vertical ($dT/dz > 0$)

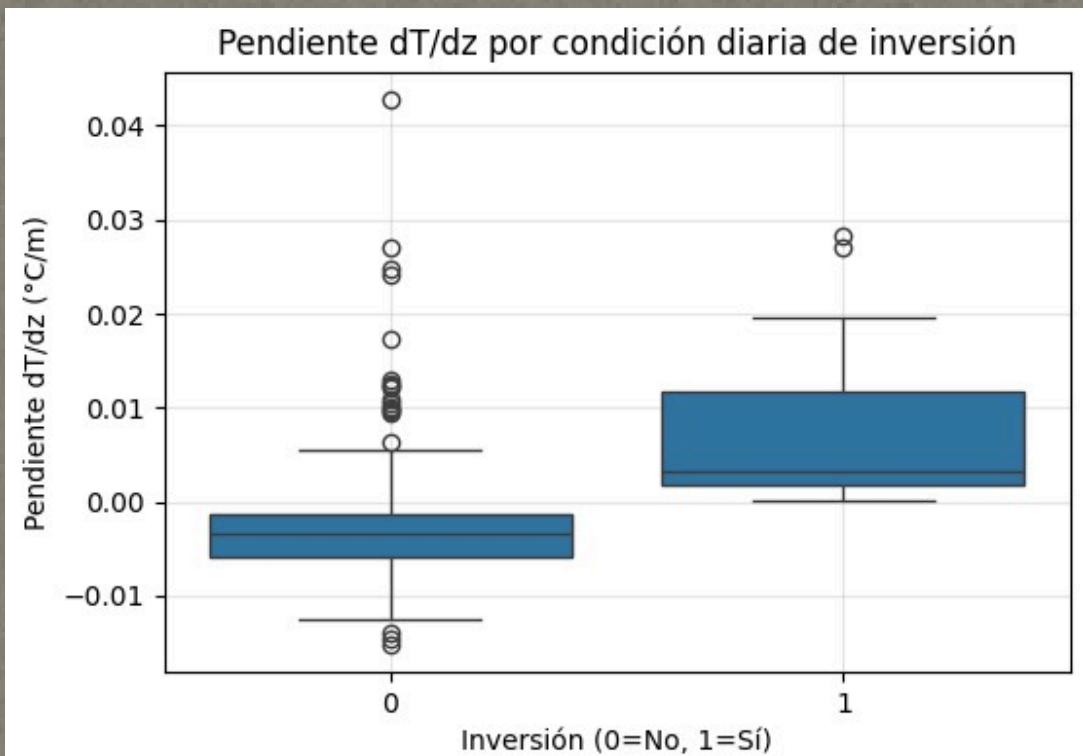
La IT se define por un aumento de temperatura con la altitud, generando una atmósfera fuertemente estratificada que impide el ascenso del aire y retiene contaminantes cerca del suelo (Bailey et al., 2011; Laggeron and Staquet, 2016; Fochesatto, 2015; Thostenson et al., 2024).



Estabilidad Horizontal

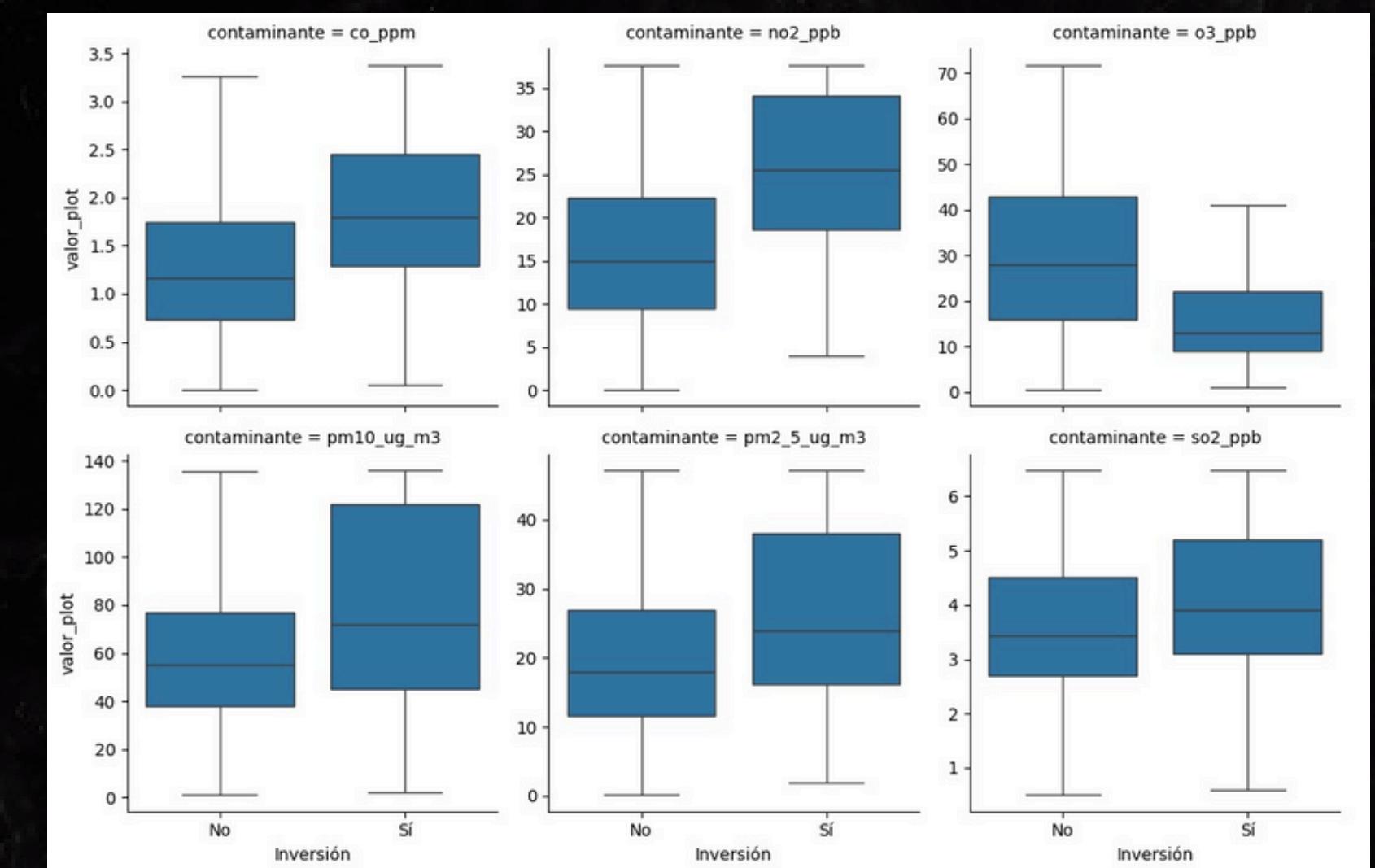
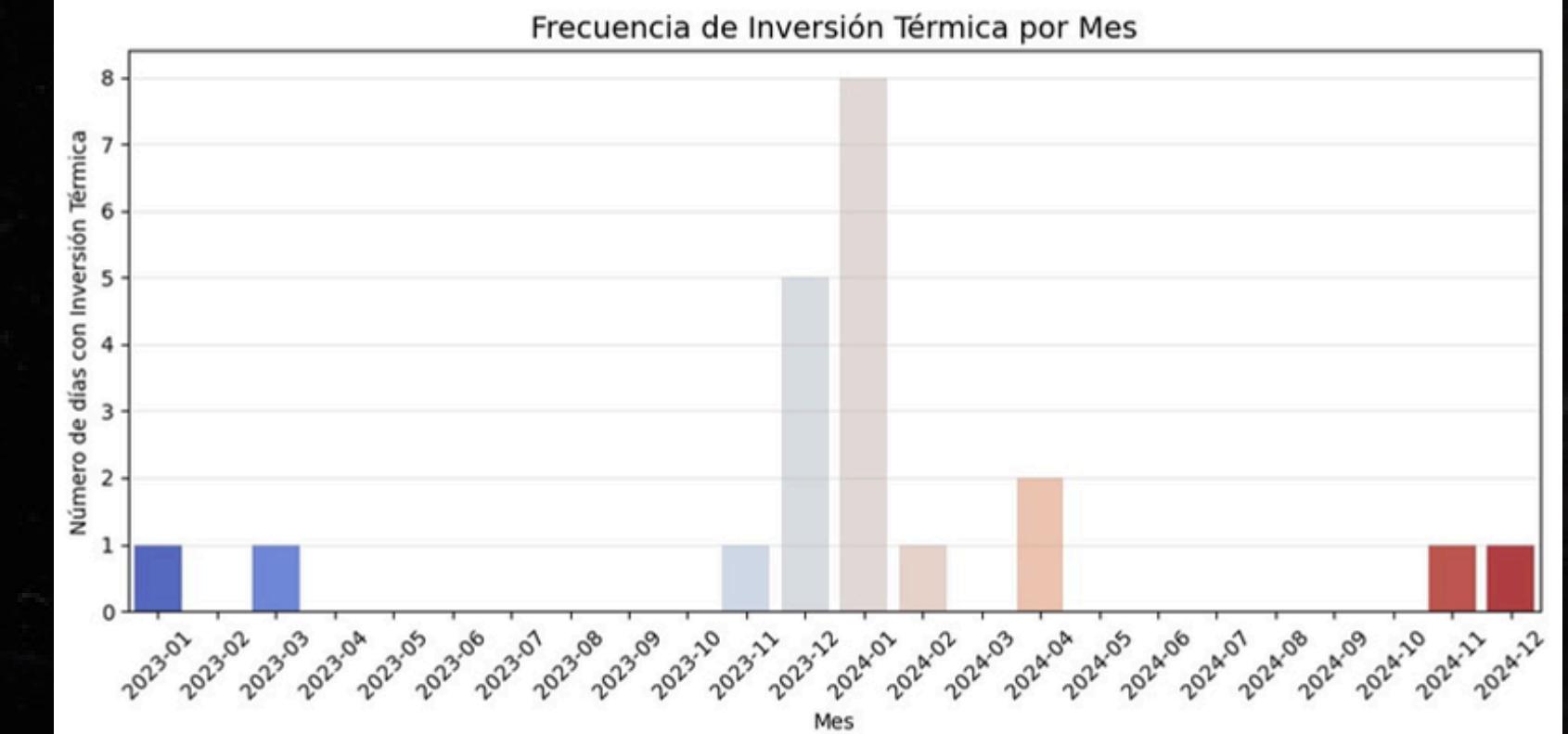
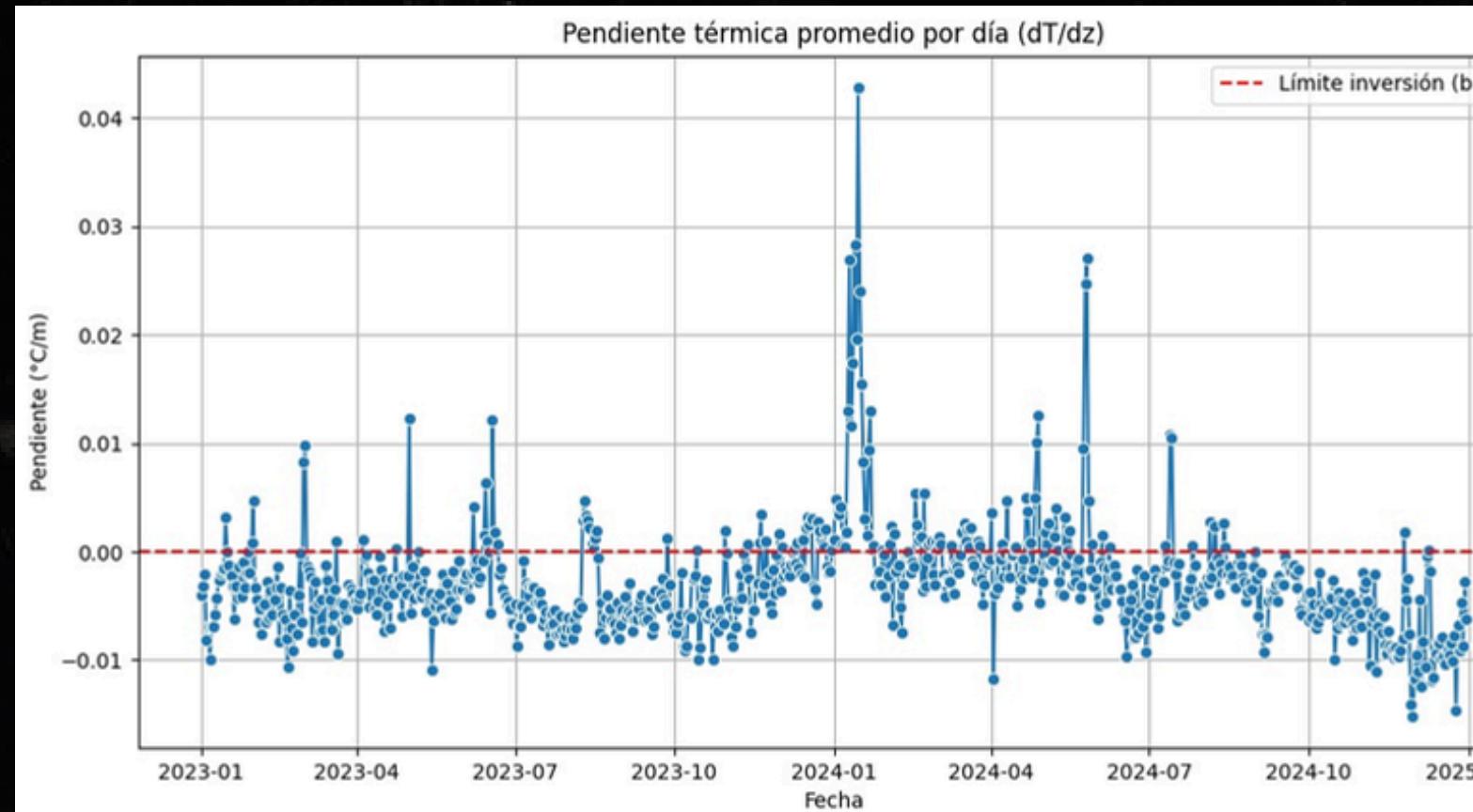
En noches despejadas y tranquilas, la pérdida de radiación terrestre enfriá la superficie y forma la inversión térmica; la nubosidad inhibe este mecanismo (Bailey et al., 2011; Conde-Oria and Rasilla, 2025; Thostenson et al., 2024).

Vientos suaves reducen la turbulencia y favorecen el estancamiento, permitiendo acumulaciones críticas; velocidades altas rompen la inversión y dispersan contaminantes (Laggeron and Staquet, 2016; Pasic et al., 2023; Ramírez-Sánchez et al., 2013).



Radiación<0.15kw/m², Viento<7.2km/h, dTout/dmsnm , IT=Si todas se cumplen

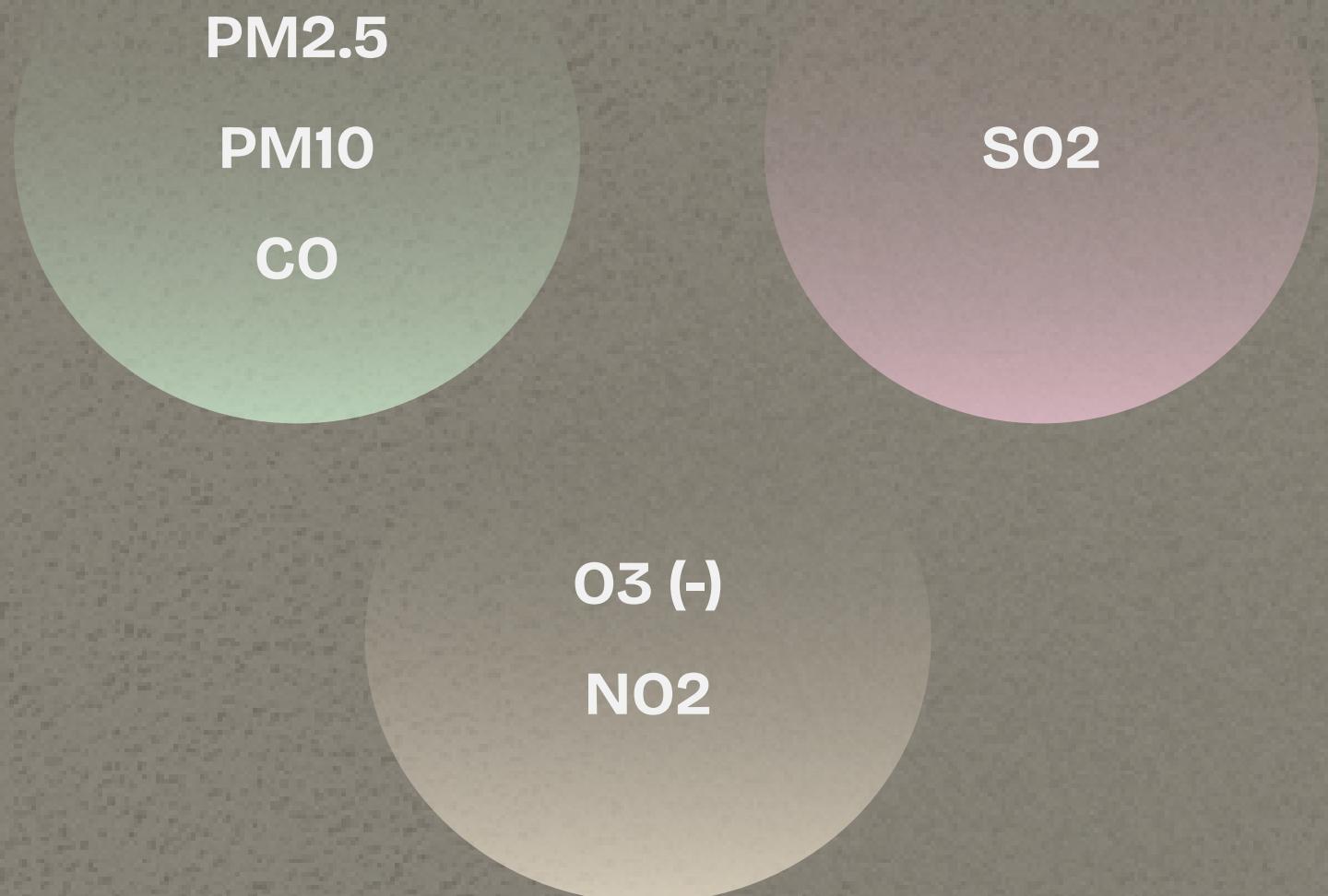
Exploración de datos



Análisis Factorial Exploratorio

Modelación y Descripción

- Análisis de interdependencia: Buscar similitudes entre variables y eliminar redundancias.
- Indicadores resumidos de variables
- Establece agrupaciones

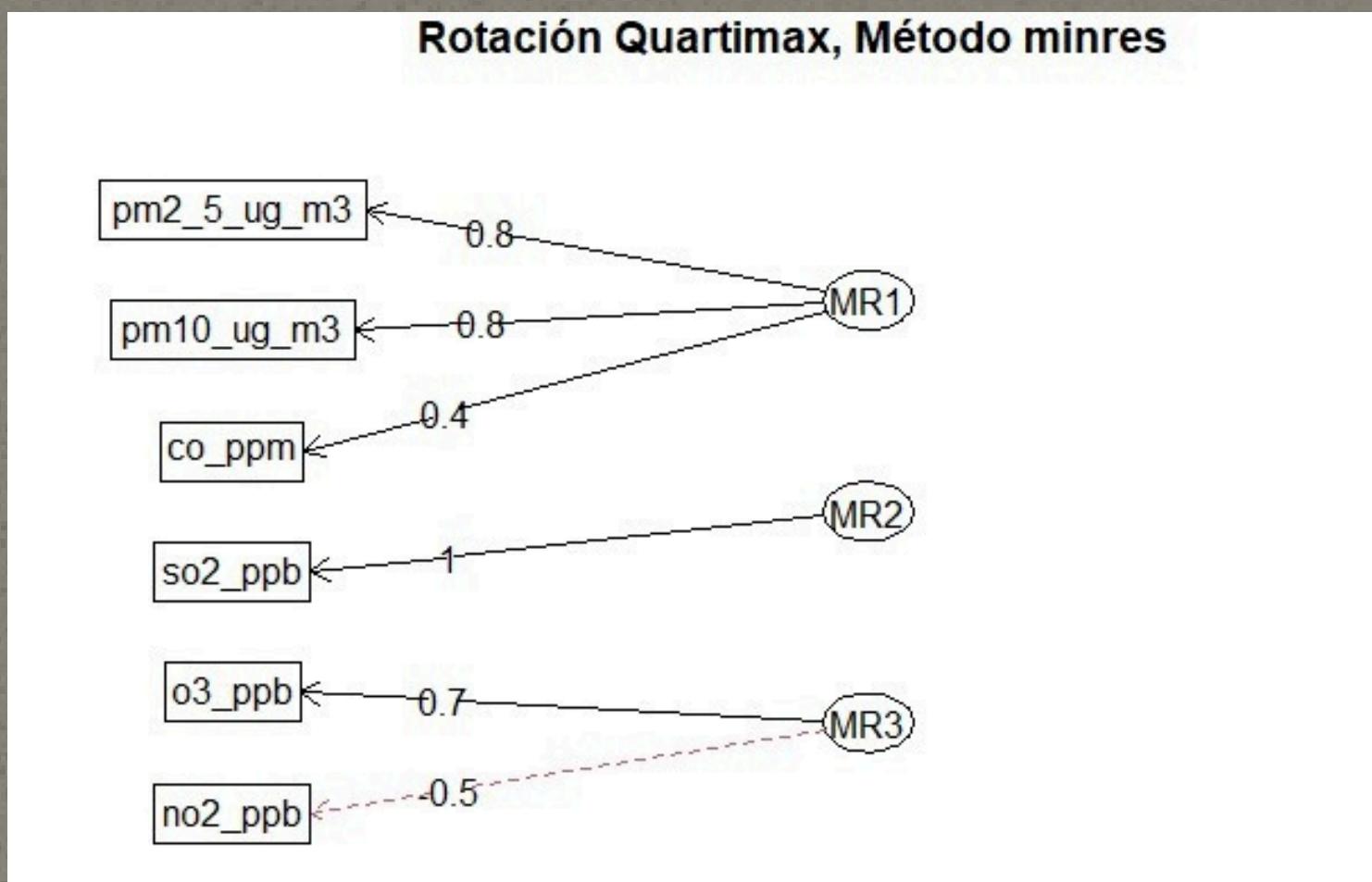


Análisis Factorial

Resultados

- 62.3% de varianza explicada
- Factor 1: Vehicular/Particulado
- Factor 2: Industrial
- Factor 3: Fotoquímico

Se interpreta que es posible simplificar a los contaminantes de una manera regular, pero que es posible hacer análisis a partir de dichos factores para llegar a conclusiones decentes



	MR1	MR2	MR3
Suma de Pesos Cuad	1.822	1.118	0.796
Proporción de Var	0.304	0.186	0.133
Var acumulada	0.304	0.490	0.623

Modelación

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_nx_n+b)}}$$

Regresión Logística

Basado en factores

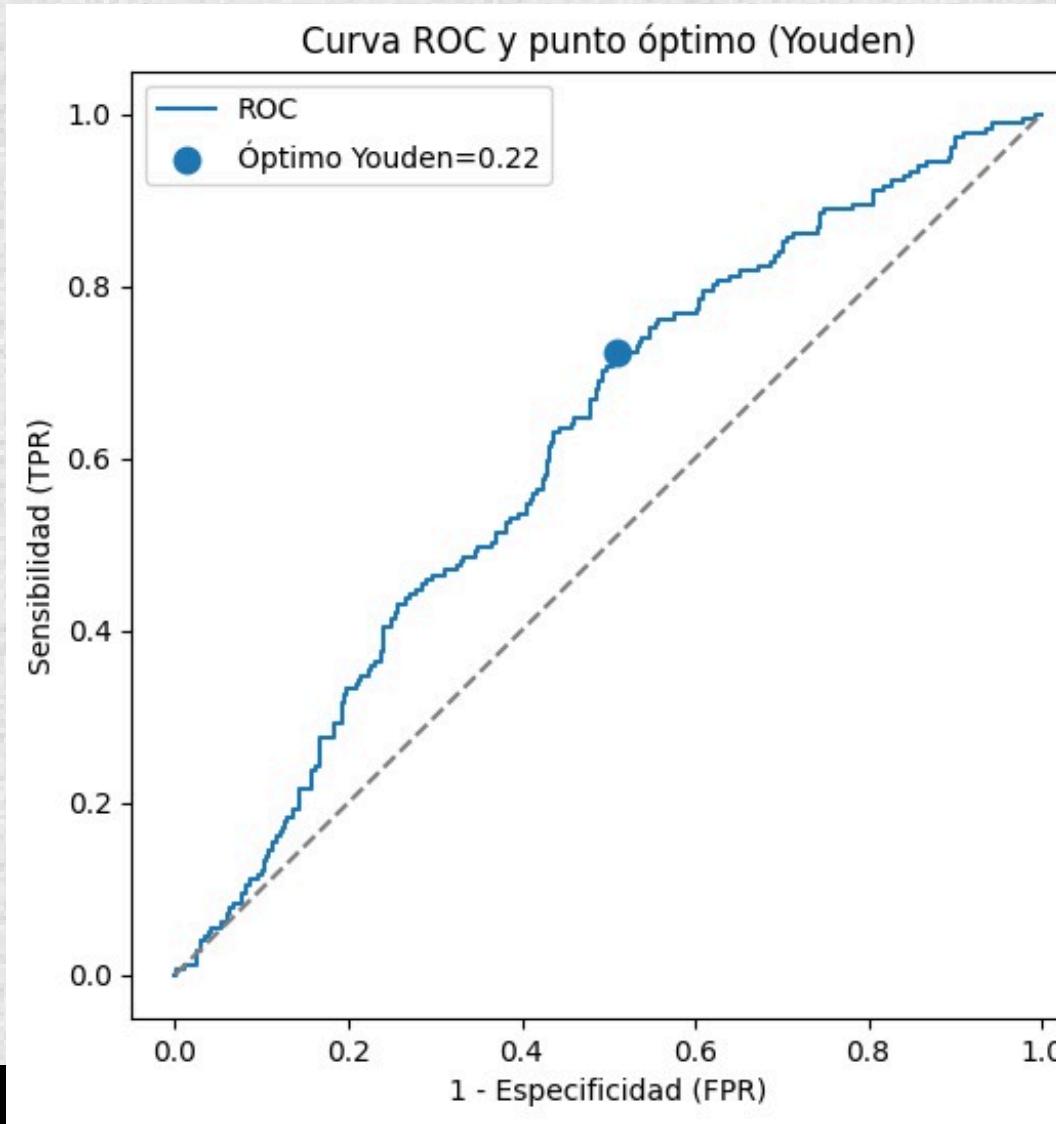
Para mayor interpretabilidad

Evaluar relación lineal directa

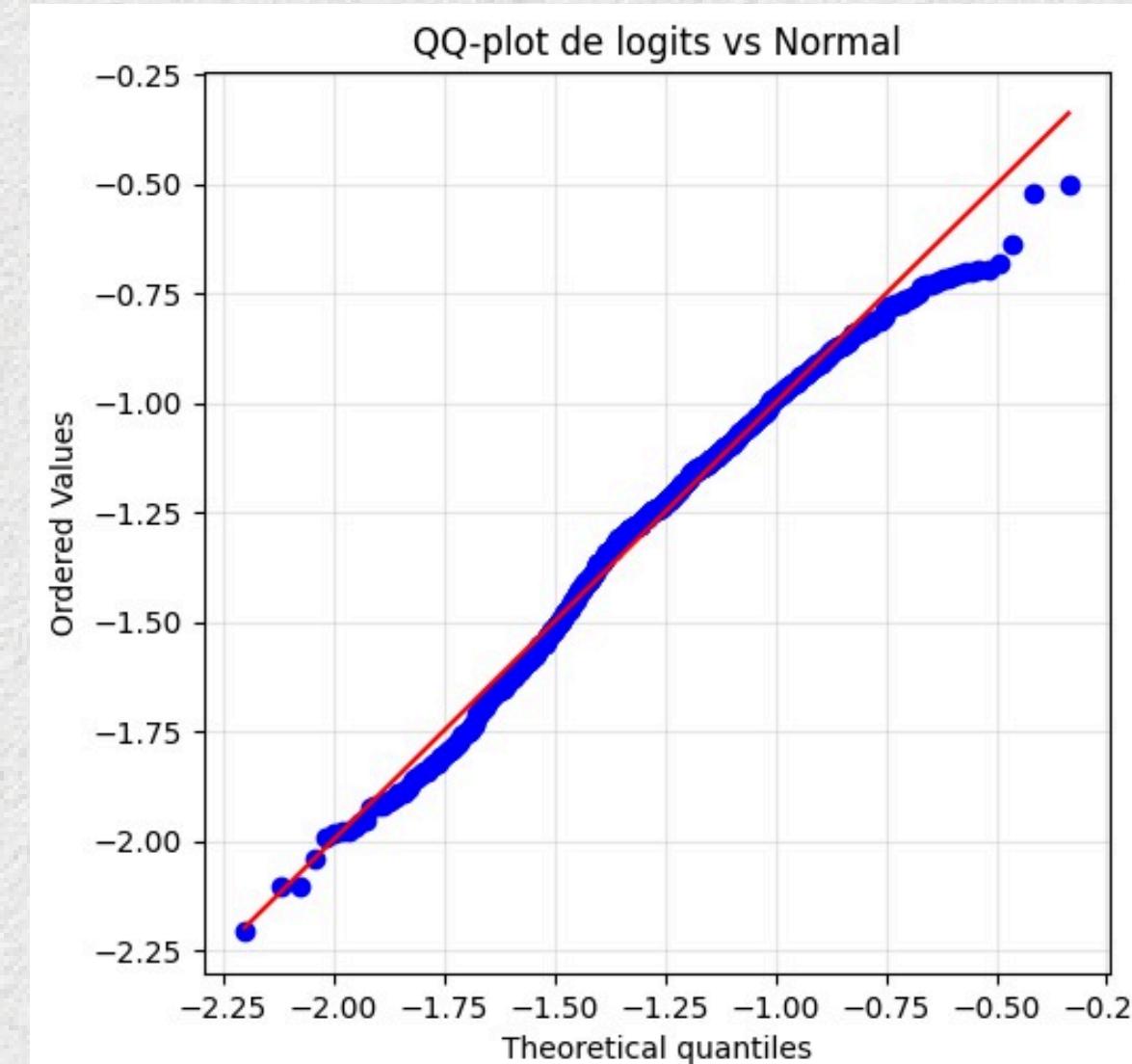
Contaminantes vs odds



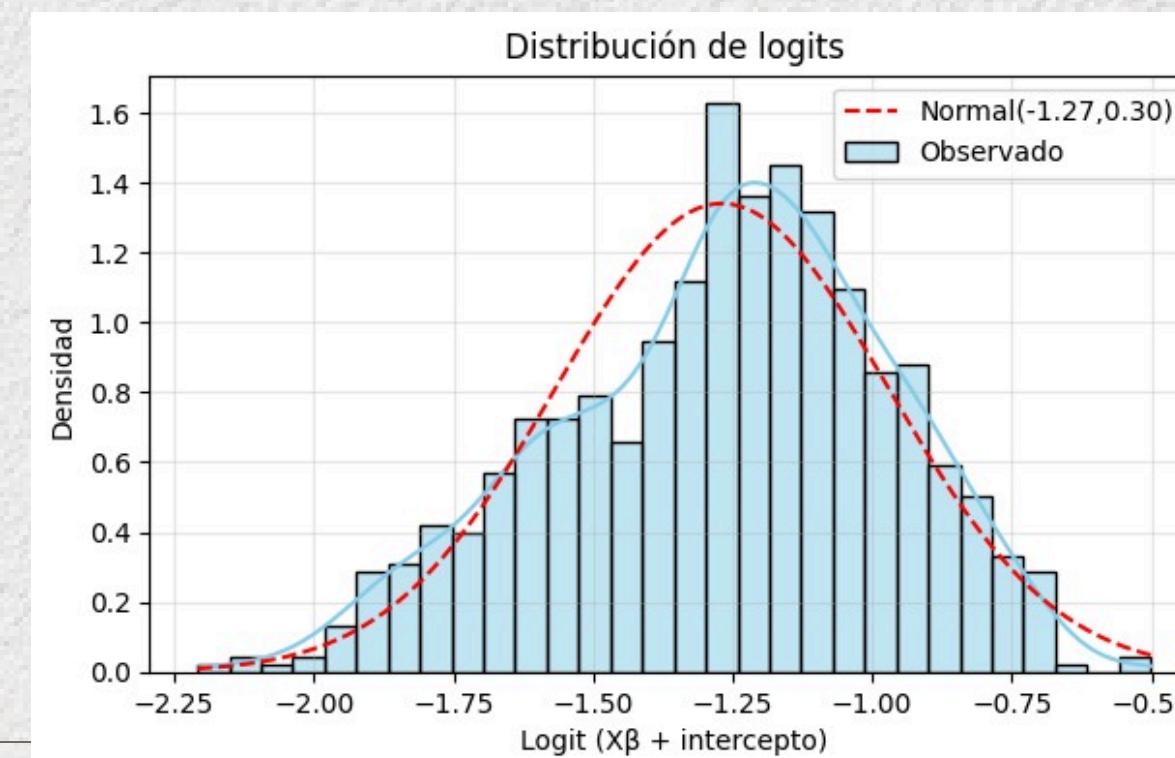
Desempeño del modelo



Distribución Logits



Predichos		
Reales	1	0
1	304	315
0	50	131



Regresión Logística

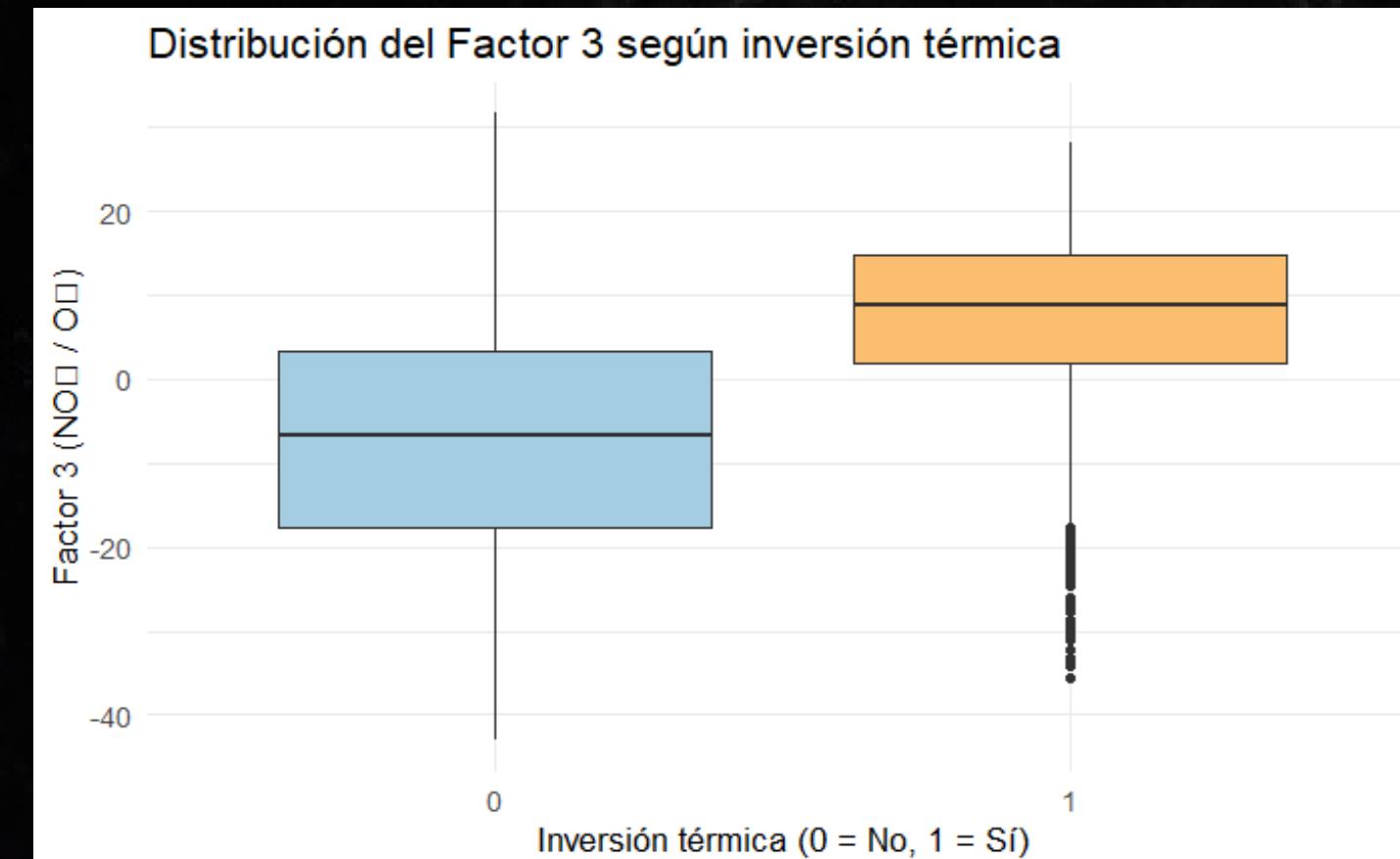
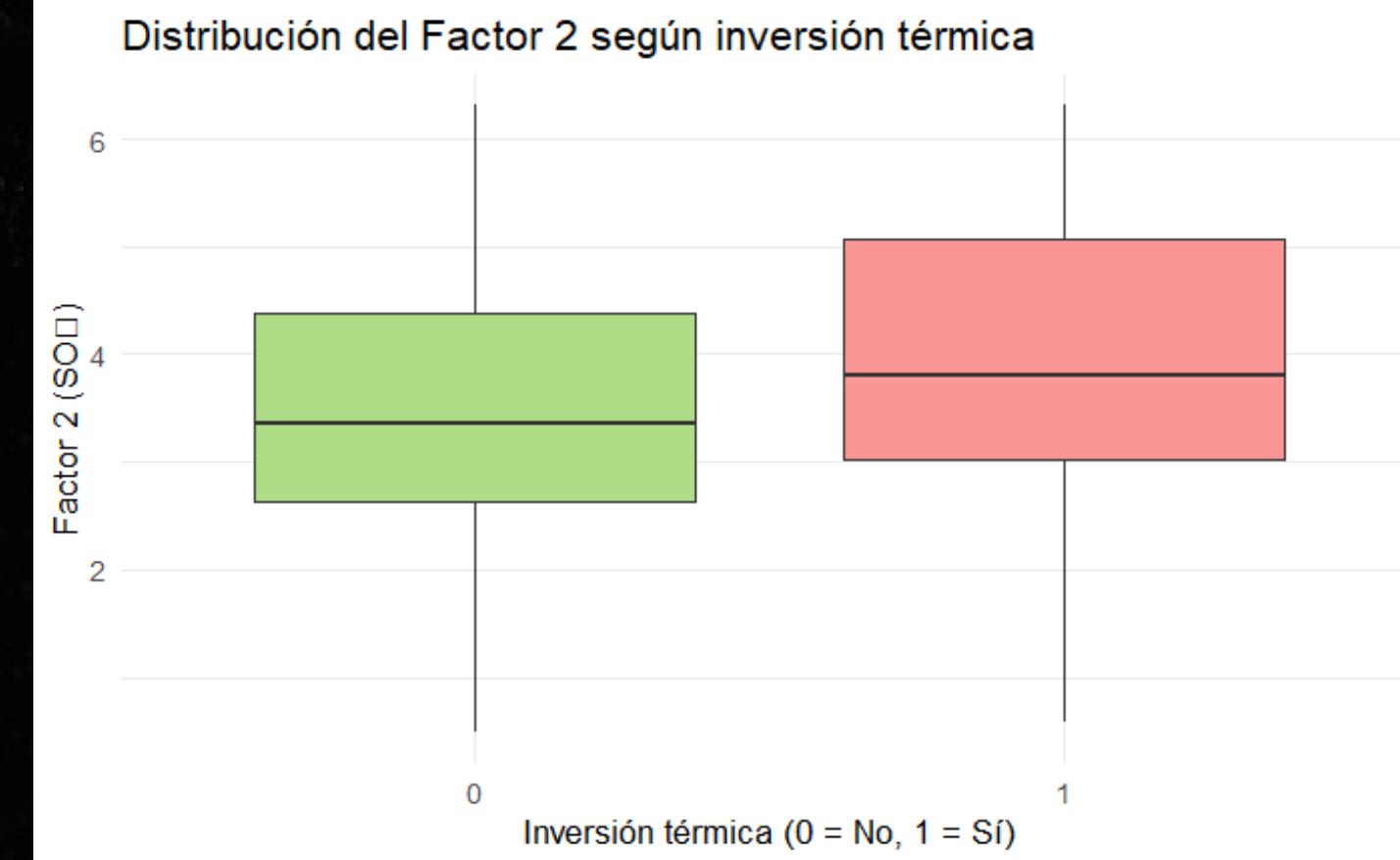
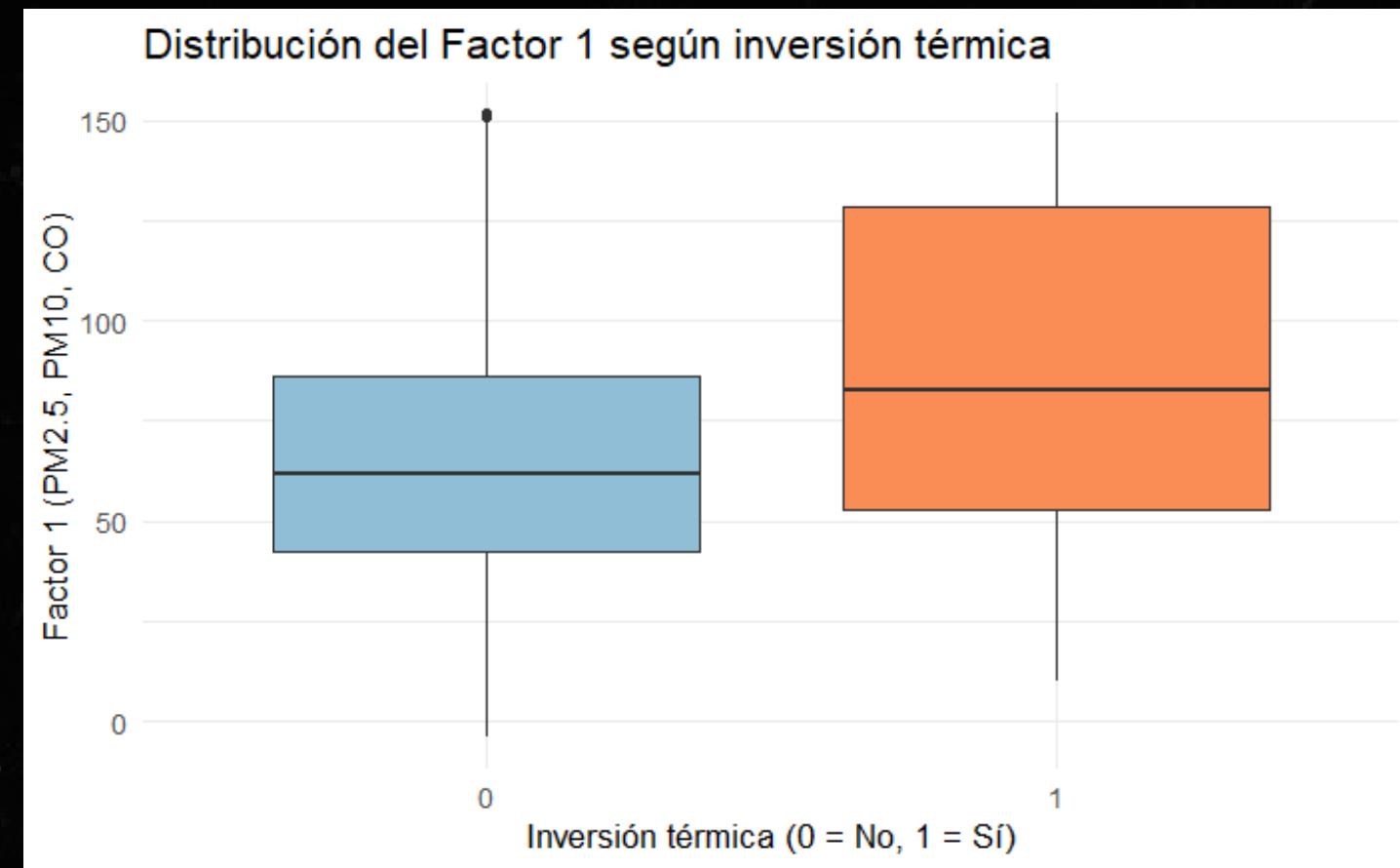
Resultados

Logits casi normales

Podemos decir que hay cierta relación explicativa de los contaminantes

Predictor regular

Tiene una exactitud buena, pero no maneja buena sensibilidad



Resultados obtenidos

Analizar diferencias

para ambos casos, cuando hubo y no hubo.

Es apreciable

como el comportamiento de los factores
difiere

Discusión y Conclusión

La variable binaria de Inversión Térmica (IT) evidenció diferencias sistemáticas en los niveles de contaminantes entre días con y sin IT, confirmando su validez operativa: bajo IT se incrementan PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂ y SO₂, mientras que el ozono (O₃) disminuye, en concordancia con patrones descritos en valles urbanos (Largeron & Staquet, 2016; Trinh et al., 2018; Rasilla et al., 2022).

El análisis factorial reveló tres componentes interpretable: uno asociado a fuentes vehiculares (PM y CO), otro a emisiones industriales (SO₂) y un tercero a dinámica fotoquímica (NO₂/O₃), lo que respalda la estructura fuente-estabilidad (Pasic et al., 2023; Conde-Oria & Rasilla, 2025).

La regresión logística mostró buen ajuste teórico (logits ~ normales), pero desempeño predictivo moderado, atribuible a la omisión de variables meteorológicas clave (radiación, viento, altura de mezcla) y a la falta de una métrica continua de intensidad de IT.

Los resultados son consistentes con la literatura y evidencian una relación robusta entre IT y concentración de contaminantes.