

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ANÁLISIS TEMPORAL DE LOS NO_x Y EL OZONO Y
SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS
EN LIMA METROPOLITANA”**

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

ORLANDO FERNANDO BENITES MORALES

LIMA - PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ANÁLISIS TEMPORAL DE LOS NO_x Y EL OZONO Y
SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS
EN LIMA METROPOLITANA”**

Presentada por:

ORLANDO FERNANDO BENITES MORALES

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Quím. Mary Flor Césare Coral

PRESIDENTE

Mg. Sc. Armando Javier Aramayo Bazzetti

MIEMBRO

Lic. Fis. Juan Manuel Pesantes Rojas

MIEMBRO

Ph.D. Sergio Artemio Pacsi Valdivia

ASESOR

*A todo aquel que decidió tomar el camino correcto,
a pesar de que era el más complicado.*

AGRADECIMIENTOS

Al Ph.D. Sergio Pacsi Valdivia por darme los lineamientos necesarios para la elaboración del proyecto de tesis, así como por su asesoría en cada una de las etapas del desarrollo de esta investigación.

Al Instituto Metropolitano Protransporte de Lima (PROTRANSPORTE) por facilitarme sus registros horarios de dióxido de nitrógeno; temperatura del aire; radiación solar y, principalmente, de monóxido de nitrógeno; sin los cuales este trabajo no se hubiese podido realizar.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI) por brindar, tanto a mi como a muchos investigadores nacionales, sus registros horarios de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCION	1
II.	REVISION DE LITERATURA	5
2.1	Características físicoquímicas de los NO _x (NO _x = NO + NO ₂).	5
2.2	Características físicoquímicas del O ₃ .	7
2.3	Fuentes de emisión de los NO _x .	8
2.3.1	Fuentes naturales de liberación de NO.	9
2.3.2	Fuentes antropogénicas de liberación de NO.	13
2.3.3	Formación del NO ₂ a partir de sus precursores.	20
2.4	Fuentes de generación del O ₃ .	21
2.5	Efectos de los NO _x en la salud y el ambiente.	24
2.6	Efectos del O ₃ en la salud y el ambiente.	28
2.7	Monitoreo de los NO _x y del O ₃ .	30
2.8	Normativa nacional e internacional de calidad de aire.	33
2.9	Influencia de las variables meteorológicas en la concentración de los NO _x .	37
2.9.1	Dinámica diurna de los NO _x .	37
2.9.2	Dinámica nocturna de NO _x .	38
2.9.3	Otros parámetros meteorológicos relacionados.	39
2.10	Relación entre las concentraciones de NO _x y O ₃ .	39
2.11	Experiencia internacional sobre la variación temporal y espacial del NO _x .	40
2.12	Experiencia internacional sobre la influencia de las variables meteorológicas en la calidad del aire.	43
2.13	Radicales hidroxilos (OH), radicales perhidroxilos (HO ₂), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y radical nitrato (NO ₃).	44
2.13.1	Radical hidroxilo (OH) y perhidroxilo (HO ₂).	45
2.13.2	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).	46
2.13.3	Radical nitrato (NO ₃).	46
III.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	47
3.1	Área de estudio.	47
3.2	Materiales y equipos.	49
3.3	Procedimiento.	50
3.3.1	Análisis temporal de las concentraciones de NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	51

3.3.2	Análisis de correlación entre la concentración horaria del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	52
3.3.3	Análisis de regresión múltiple entre los niveles horarios de los NO _x y el O ₃ .	53
3.3.4	Análisis de la influencia de la temperatura y la radiación solar sobre los niveles de NO _x y el O ₃ .	57
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1	Análisis de la variación horaria, diaria, mensual y estacional del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.	58
4.1.1	Análisis de la variación horaria del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	62
4.1.2	Análisis de la variación diaria del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	79
4.1.3	Análisis de la variación mensual del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	91
4.1.4	Análisis de la variación estacional del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	96
4.1.5	Análisis de la variación multianual del NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ .	99
4.2	Análisis de la correlación entre la concentración horaria de NO, NO ₂ , NO _x y O ₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.	102
4.2.1	Análisis correlacional por estación.	102
4.2.2	Análisis correlacional por parámetro.	104
4.3	Determinación de la influencia de los NO _x en los niveles de O ₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.	108
4.4	Determinación de la influencia de la temperatura del aire y la radiación solar en la concentración de los NO _x y O ₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.	129
V.	CONCLUSIONES	156
VI.	RECOMENDACIONES	158
VII.	BIBLIOGRAFÍA	160
VIII.	ANEXOS	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Especies químicas de la familia de los óxidos de nitrógeno.	6
Tabla 2:	Principales propiedades fisicoquímicas de las especies de NOx.	6
Tabla 3:	Principales propiedades fisicoquímicas del O ₃ .	8
Tabla 4:	Emisiones de NOx de acuerdo al combustible utilizado.	19
Tabla 5:	Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad del aire, según el criterio poblacional.	33
Tabla 6:	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire.	34
Tabla 7:	Índices de Calidad de Aire para NO ₂ y O ₃ .	35
Tabla 8:	Guías de calidad del aire de la OMS.	35
Tabla 9:	Comparación de estándares de calidad de aire para diferentes países.	36
Tabla 10:	Área y población de los distritos de la zona norte de Lima Metropolitana.	47
Tabla 11:	Área y población de los distritos de la zona centro de Lima Metropolitana.	48
Tabla 12:	Características generales de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana.	50
Tabla 13:	Parámetros evaluados por estación.	52
Tabla 14:	Estadística general de las concentraciones de NOx y O ₃ en las estaciones de monitoreo de SENAMHI y PROTRANSPORTE para el periodo 2015 – 2018.	59
Tabla 15:	Correlación de la concentración horaria del NO ₂ y O ₃ por estación durante el periodo 2015-2018.	103
Tabla 16:	Correlación de la concentración horaria del NO ₂ , NO y NOx por estación durante el periodo 2015-2018.	104
Tabla 17:	Correlación de la concentración horaria del NO ₂ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.	105
Tabla 18:	Correlación de la concentración horaria del NO ₂ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.	106
Tabla 19:	Correlación de la concentración horaria del O ₃ , NO y NOx en la zona centro y norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.	107
Tabla 20:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ, SAT y MO1 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	109
Tabla 21:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM, SAT y MO1 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	110
Tabla 22:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ,	111

	SAT y MO1 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	
Tabla 23:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM, SAT y MO1 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	111
Tabla 24:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	112
Tabla 25:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	112
Tabla 26:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	113
Tabla 27:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	113
Tabla 28:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	114
Tabla 29:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	114
Tabla 30:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	132
Tabla 31:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	133
Tabla 32:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	134
Tabla 33:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	134
Tabla 34:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	135
Tabla 35:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	136
Tabla 36:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	136

- Tabla 37: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018. 137
- Tabla 38: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018. 137
- Tabla 39: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018. 138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Estructura química molecular del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno.	7
Figura 2:	Estructura química molecular del ozono.	8
Figura 3:	Comparación del LNOx y el NOx total emitido a la atmósfera.	10
Figura 4:	Transformación del nitrógeno mineral en suelo.	11
Figura 5:	Ruta de la quimiodesnitrificación adaptada de Chalk & Smith (1983) y Pilegaard (2013).	12
Figura 6:	Cantidades relativas de emisiones antropogénicas, biogénicas y de incendios forestales en los Estados Unidos de Norteamérica para el 2014.	13
Figura 7:	Fuentes de emisión de NOx en 27 países europeos para el 2006.	14
Figura 8:	Fuentes de emisión de NOx en los Estados Unidos de Norteamérica para el 2005.	15
Figura 9:	Dependencia entre la formación del NO y la razón aire/combustible.	17
Figura 10:	Dependencia entre los mecanismos de formación de NO y la temperatura de combustión.	19
Figura 11:	Mecanismo simplificado para la oxidación fotoquímica de metano en la atmósfera.	21
Figura 12:	Ciclo nulo de las reacciones de formación-destrucción de los NOx y el O ₃ .	22
Figura 13:	Producción de O ₃ a partir de COV y ecuación neta.	23
Figura 14:	Producción de O ₃ a partir de CO y ecuación neta.	24
Figura 15:	Representación de órganos objetivos de los NOx y patologías asociadas.	25
Figura 16:	Patologías asociadas a la toxicidad aguda y crónica de los NOx en pulmones.	26
Figura 17:	Impactos en la salud y ambientales de los NOx.	27
Figura 18:	Patologías asociadas al O ₃ .	29
Figura 19:	Efectos del O ₃ sobre las hojas de un álamo de tulipán, <i>Liriodendron tulipifera</i>	29
Figura 20:	Esquema del funcionamiento interno del analizador de NOx a través de la quimioluminiscencia.	31
Figura 21:	Esquema del funcionamiento interno del analizador de O ₃ a través de la absorción UV.	32
Figura 22:	Adaptación del ciclo diurno de los NOx influenciado por la radiación solar.	38
Figura 23:	Ciclo global de los compuestos nitrogenados en la atmósfera.	39

Figura 24:	Formación del ozono a partir de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.	40
Figura 25:	Evaluación temporal de las concentraciones de O ₃ y NO ₂ en un episodio del mes de Agosto de 2003	41
Figura 26:	Producción primaria del radical hidroxilo (OH) de acuerdo con la hora del día.	45
Figura 27:	Principales fuentes y sumideros de HOx.	46
Figura 28:	Mapa de clasificación climática según Thornthwaite y zonas centro y norte de Lima metropolitana.	48
Figura 29:	Mapa de estaciones de calidad de aire utilizados en el presente estudio.	49
Figura 30:	Estructura general de los modelos de regresión lineal múltiple.	54
Figura 31:	Diagramas de caja y bigotes de los datos de NO ₂ , O ₃ , NO y NO _x para el periodo 2015-2018.	61
Figura 32:	Histograma comparativo de las concentraciones de NO ₂ en las estaciones SAT y PPD para el periodo 2015-2018.	61
Figura 33:	Variación horaria mensual del NO ₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	63
Figura 34:	Variación horaria anual del NO ₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	66
Figura 35:	Variación horaria mensual del O ₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	70
Figura 36:	Variación horaria anual del O ₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	71
Figura 37:	Variación horaria mensual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	72
Figura 38:	Variación horaria anual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	74
Figura 39:	Variación horaria mensual del NO _x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	76
Figura 40:	Variación horaria anual del NO _x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	78
Figura 41:	Variación diaria mensual del NO ₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	80
Figura 42:	Desplazamientos por día en Lima y Callao para mayo del 2017.	81
Figura 43:	Variación diaria anual del NO ₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	83

Figura 44:	Variación diaria mensual del O ₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	85
Figura 45:	Variación diaria anual del O ₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	86
Figura 46:	Variación diaria mensual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	87
Figura 47:	Variación diaria anual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	88
Figura 48:	Variación diaria mensual del NO _x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	89
Figura 49:	Variación diaria anual del NO _x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	91
Figura 50:	Base y tope de la inversión térmica en la atmósfera de Lima - Callao.	92
Figura 51:	Variación mensual del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.	93
Figura 52:	Variación mensual del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.	95
Figura 53:	Variación estacional del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.	97
Figura 54:	Variación estacional del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.	98
Figura 55:	Variación multianual del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético y la línea roja corresponde a la guía anual de NO ₂ .	100
Figura 56:	Variación multianual del NO ₂ , NO, NO _x y O ₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético y la línea roja corresponde a la guía anual de NO ₂ .	101
Figura 57:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	118

Figura 58:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	119
Figura 59:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	119
Figura 60:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	121
Figura 61:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	121
Figura 62:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	122
Figura 63:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	123
Figura 64:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	124
Figura 65:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	124
Figura 66:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	125
Figura 67:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	126
Figura 68:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	127
Figura 69:	Correlación entre el O ₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	127
Figura 70:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	128
Figura 71:	Variación horaria mensual de la temperatura del aire para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	130
Figura 72:	Variación horaria mensual de la radiación solar para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.	131
Figura 73:	Relación entre los NO _x , el O ₃ , la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones SBJ y SAT durante el periodo 2015-2018.	138
Figura 74:	Relación entre los NO _x , el O ₃ , la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones CDM y SAT durante el periodo 2015-2018.	139

Figura 75:	Relación entre los NO _x , el O ₃ , la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones SMP y MO2 durante el periodo 2015-2018.	139
Figura 76:	Relación entre los NO _x , el O ₃ , la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones CRB y MO2 durante el periodo 2015-2018.	139
Figura 77:	Relación entre los NO _x , el O ₃ , la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones PPD y MO2 durante el periodo 2015-2018.	140
Figura 78:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	142
Figura 79:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	142
Figura 80:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	143
Figura 81:	Niveles de NO _x históricos y calculados para la estación SAT y MO1 en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	143
Figura 82:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	145
Figura 83:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	145
Figura 84:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	146
Figura 85:	Niveles de NO _x históricos y calculados para la estación SAT y MO1 en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	146
Figura 86:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	148
Figura 87:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	148

Figura 88:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.	149
Figura 89:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	150
Figura 90:	Niveles de NOx históricos y calculados para la estación MO2 en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	150
Figura 91:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	152
Figura 92:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	152
Figura 93:	Correlación entre el O ₃ , los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.	153
Figura 94:	Niveles de O ₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	154
Figura 95:	Niveles de NOx históricos y calculados para la estación MO2 en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.	154

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1:	Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple para el O ₃ .	172
Anexo 2:	Inferencia estadística de modelos de regresión lineal simple para el O ₃ .	183
Anexo 3:	Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple para el O ₃ y NO _x que toman en cuenta parámetros meteorológicos.	214
Anexo 4:	Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple que toman en cuenta únicamente al NO _x y la radiación solar.	231

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el análisis temporal de la concentración de NO_x y O_3 registrados en Lima Metropolitana en el periodo 2015 – 2018, su correlación y la influencia de la temperatura del aire y la radiación solar sobre estos gases. Como parte de la metodología, se procesaron los datos horarios de NO_2 , NO , O_3 , temperatura del aire y radiación solar registrados por las estaciones de SENAMHI y PROTRANSPORTE; se estimó la concentración horaria de NO_x a partir de la suma de las concentraciones horarias de NO y NO_2 ; se calcularon los descriptores estadísticos; se generaron gráficas a diferentes escalas temporales; y se realizaron análisis correlacionales basados en el coeficiente de Spearman y análisis de regresión lineal múltiple para los niveles de NO_x y O_3 . Los resultados mostraron que ni los niveles horarios ni anuales de NO_2 y de O_3 superaron los ENCA del Perú ni incumplieron con las guías de la OMS para el periodo 2015 – 2018. Además, se obtuvieron significativas correlaciones positivas entre los NO_x y negativas entre el O_3 y los NO_x y ecuaciones de regresión lineal múltiple con altos coeficientes de determinación tomando en cuenta a los parámetros meteorológicos. Finalmente, se concluyó que el comportamiento horario de estos gases se vio influenciado principalmente por el tráfico vehicular y la radiación solar; la variación diaria, por el “efecto fin de semana”; el comportamiento mensual y estacional, por la intensidad de la capa de inversión térmica y la radiación solar; y el comportamiento multianual mostró una ligera tendencia ascendente para los niveles de NO_x . Aún más, el comportamiento horario del O_3 estuvo más relacionado con los parámetros meteorológicos; mientras que, el de los NO_x , con el tráfico vehicular.

Palabras claves: NO_x , O_3 , temperatura del aire, radiación solar, tráfico vehicular, variación temporal y Lima Metropolitana.

ABSTRACT

This study evaluates the temporal analysis of the concentration of NO_x and O_3 registered in Lima Metropolitana in the period 2015 – 2018, its correlation and the influence of air temperature and solar radiation on these gases. As part of the methodology, the hourly data for NO_2 , NO , O_3 , air temperature and solar radiation recorded by SENAMHI and PROTRANSPORTE stations were processed, the hourly NO_x concentrations was estimated from the sum of the hourly concentrations of NO and NO_2 ; statistical descriptors were calculated; graphs were generated at different time scales; and correlational analyzes based on the Spearman coefficient and multiple linear regression analyzes were performed for the NO_x and O_3 levels. The results showed that neither the hourly nor annual levels of NO_2 and O_3 exceeded the Peruvian ENCA or did not comply with the WHO guidelines for the period between 2015 – 2018. In addition, significant positive correlations were obtained between NO_x and negative correlations between O_3 and NO_x and multiple linear regression equations with high coefficients of determination taken into account meteorological parameters. Finally, it was concluded that the hourly behavior of these gases was mainly influenced by vehicular traffic and solar radiation; the daily variation, due to the “weekend effect”; the monthly and seasonal behavior, due to the intensity of thermal inversion layer and solar radiation; and the multi-year behavior showed a slight upward trend for NO_x levels. Furthermore, the hourly behavior of O_3 was more related to meteorological parameters; while that of the NO_x , with vehicular traffic.

Key words: NO_x , O_3 , air temperature, solar radiation, vehicular traffic, temporal variation and Lima Metropolitana.

I. INTRODUCCION

El aire atmosférico contiene diversos tipos de contaminantes gaseosos generados tanto por las actividades desarrolladas por los seres humanos como de manera natural. De entre estos, los óxidos de nitrógeno, también conocidos como NO_x (NO_x = NO + NO₂), y el ozono troposférico (O₃) son algunos de los más estudiados por su abundancia en lugares urbanizados y sus efectos adversos sobre las poblaciones de estos.

En específico, el dióxido de nitrógeno (NO₂) es el NO_x más monitoreado y es conocido internacionalmente como uno de los seis “contaminantes criterio” o de mayor relevancia en estudios enfocados en la evaluación de la calidad del aire. Sin embargo, una especie de NO_x que también posee una gran importancia en la dinámica de los contaminantes atmosféricos es el monóxido de nitrógeno (NO), aunque este es menos estable que el NO₂ (i.e. posee un menor tiempo de permanencia en el aire) y, por lo mismo, se suele encontrar en menor abundancia que este último y no suele ser incluido en los programas nacionales de control de la contaminación atmosférica (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 1999).

Los efectos negativos de las altas concentraciones de los NO_x y el O₃ se ven reflejados en la salud de las personas y en la calidad ambiental. En general, estos pueden exacerbar ciertas enfermedades respiratorias como infecciones pulmonares, incrementar la respuesta a alérgenos y ocasionar efectos adversos sobre el funcionamiento y/o anatomía de diferentes órganos humanos. Asimismo, el O₃, al ser un fuerte oxidante, puede ocasionar lesiones en los órganos vegetativos de las plantas; mientras que, los NO_x, junto con el dióxido de azufre (SO₂), pueden alterar ecosistemas completos a partir de la generación de lluvias ácidas. Adicionalmente, las altas concentraciones de los NO_x y el O₃, bajo ciertas condiciones, son responsables de la formación del denominado “*smog* fotoquímico” (BMI ICOPAL [ICOPAL], 2015; USEPA, 1999).

Se ha observado que, en la actualidad, existen pocos estudios realizados en Perú que evalúen de manera conjunta la influencia de los parámetros meteorológicos y de otros contaminantes gaseosos sobre los niveles de los NO_x y el O₃. Sin embargo, los resultados de investigaciones realizadas en otros países indican que la temperatura del aire y la radiación solar pueden favorecer la generación del O₃ y la formación de una especie de NO_x con respecto a otra. Aún más, los NO_x, junto con el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), son los principales precursores del O₃ y, por lo mismo, todos estos parámetros mencionados se relacionan entre sí y con la dinámica de los contaminantes atmosféricos (Milena, Calessio & Norte, 2014).

En el caso de Lima Metropolitana, son sumamente escasos los registros continuos (i.e. monitoreos de hora a hora), a largo plazo (i.e. durante más de un año) y en simultáneo de las concentraciones de NO, NO₂ y O₃. Por lo tanto, existe una falta de información sobre el comportamiento temporal de estos contaminantes y sobre su dinámica desarrollada bajo las condiciones específicas de dicha ciudad. Sin embargo, el Instituto Metropolitano Protransporte de Lima (PROTRANSPORTE) cuenta con dos estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas una en la zona norte y la otra en la zona centro de Lima Metropolitana y lleva registrando NO, NO₂, temperatura del aire y radiación solar de manera horaria desde el año 2015. Además, si bien la red de monitoreo nacional de calidad del aire, la cual es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), no realiza mediciones de la concentración de NO, esta lleva registrando contaminantes criterio como el O₃ y el NO₂ de manera horaria desde el año 2010 a partir de diez estaciones ubicadas en diferentes puntos de Lima Metropolitana (Instituto Metropolitano Protransporte de Lima [PROTRANSPORTE], 2011; Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI], 2010).

Adicionalmente, se ha evidenciado a partir de las mediciones realizadas en los últimos años por diferentes instituciones peruanas que la zona norte de Lima Metropolitana presenta valores altos de concentración para algunos contaminantes atmosféricos como el material particulado y, por el contrario, su zona centro presenta concentraciones que no superan los Estándares de Calidad Ambiental (ENCA) del aire del Perú (Espinoza, 2018).

Sin embargo, como se indicó previamente, no se cuenta con estudios específicos que muestren el comportamiento temporal de los NO_x y el O₃ en estas zonas de interés.

Por lo mencionado, en la presente investigación se evaluó la variación horaria, diaria, mensual y estacional de los NO_x y el O₃ y su interrelación con la temperatura del aire y la radiación solar en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana, con base en la información proporcionada por el PROTRANSPORTE y el SENAMHI.

En el presente trabajo de investigación, se definió un objetivo general con cuatro objetivos específicos.

Objetivo general:

Evaluar la variación temporal de las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y ozono troposférico (O₃) y determinar la influencia de la temperatura del aire y la radiación solar sobre estos contaminantes en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Objetivos específicos:

Analizar la variación horaria, diaria, mensual y estacional del NO, NO₂, NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Analizar la correlación entre la concentración horaria de NO, NO₂, NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Determinar la influencia de los NO_x en los niveles de O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Determinar la influencia de la radiación solar y la temperatura del aire en la concentración de los NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Características fisicoquímicas de los NO_x (NO_x = NO + NO₂).

Existe siete especies químicas que conforman la familia de los óxidos de nitrógeno: el óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO), dióxido de dinitrógeno (N₂O₂), trióxido de dinitrógeno (N₂O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), tetróxido de dinitrógeno (N₂O₄) y pentóxido de dinitrógeno (N₂O₅) (Tabla 1). De entre estos, el N₂O₃ y N₂O₅ se encuentran en muy bajas concentraciones por su relativa alta reactividad; el N₂O₂ y N₂O₄ son dímeros que fácilmente se descomponen en dos moléculas de NO y en dos moléculas de NO₂, respectivamente; y el N₂O es un gas de efecto invernadero muy estable con una relativa baja toxicidad. En este sentido, en las evaluaciones de calidad ambiental se suelen utilizar como indicador de los NO_x a la suma del NO₂ con el NO o, como en la mayoría de los casos, a únicamente el NO₂, dado que esta última especie química es incluso más estable que el NO (USEPA, 1999). La presente investigación tomó en cuenta a la suma del NO y NO₂ (NO_x = NO + NO₂) como indicador para los NO_x.

En la base de datos PUBCHEM (2005a) se puede encontrar la recopilación de características fisicoquímicas tanto del monóxido de nitrógeno (NO) como del dióxido de nitrógeno (NO₂). En esta se indica que ambas moléculas son más pesadas que el aire, lo cual trae consigo que se necesite de turbulencias en la atmosfera para favorecer su ascenso y dispersión. Además, el NO₂ presenta puntos de fusión y ebullición relativamente más altos que el NO, relacionados con su presión de vapor (más elevado para el NO que para el NO₂) y con su calor de vaporización (menor para el NO que para el NO₂). Finalmente, el NO es una molécula que presenta una alta solubilidad en agua; mientras que, el NO₂ reacciona en presencia de agua. En la Tabla 2 se puede observar el resumen de las principales propiedades de estos contaminantes; mientras que, en la Figura 1 se presenta el modelo de estructura química molecular del NO y NO₂.

Tabla 1: Especies químicas de la familia de los óxidos de nitrógeno.

Fórmula	Nombre	Valencia del N	Propiedades
N ₂ O	Óxido nitroso	1	Gas incoloro Soluble en agua
NO	Óxido nítrico	2	Gas incoloro
N ₂ O ₂	Dióxido de dinitrógeno	2	Poco soluble en agua
N ₂ O ₃	Trióxido de dinitrógeno	3	Sólido negro Soluble en agua, se descompone en agua
NO ₂	Dióxido de nitrógeno	4	Gas marrón rojizo
N ₂ O ₄	Tetróxido de dinitrógeno	4	Muy soluble en agua, se descompone en agua
N ₂ O ₅	Pentóxido de dinitrógeno	5	Sólido blanco Muy soluble en agua, se descompone en agua

FUENTE: Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled (USEPA, 1999)

Tabla 2: Principales propiedades fisicoquímicas de las especies de NO_x.

Propiedad fisicoquímica	Especie de NO_x	
	Monóxido de nitrógeno (NO)	Dióxido de nitrógeno (NO₂)
Color	Incoloro	Marrón rojizo
Peso relativo del vapor	Más pesado que el aire	Más pesado que el aire
Combustibilidad	No combustible	No combustible
Peso molecular	30,006 g/mol	46,005 g/mol
Carga	Neutra	Neutra
Olor	Dulce	Irritable
Umbral de olor inferior	0,36 mg/m ³	2 mg/m ³
Umbral de olor superior	1,2 mg/m ³	10 mg/m ³
Punto de ebullición	-151,7 °C a 760 mmHg	21,15 °C a 760 mmHg
Punto de fusión	-163,6 °C a 760 mmHg	-9,3 °C a 760 mmHg
Solubilidad en agua	94 900 mg/L	Reacciona
Densidad de vapor	1,04 relativa al aire	1,58 relativa al aire
Presión de vapor	26 000 mmHg a 68 °F	720 mmHg a 68 °F
Calor de vaporización	3,293 Kcal/mol	9,110 Kcal/mol

FUENTE: Nitrogen Dioxide (PUBCHEM, 2005b)

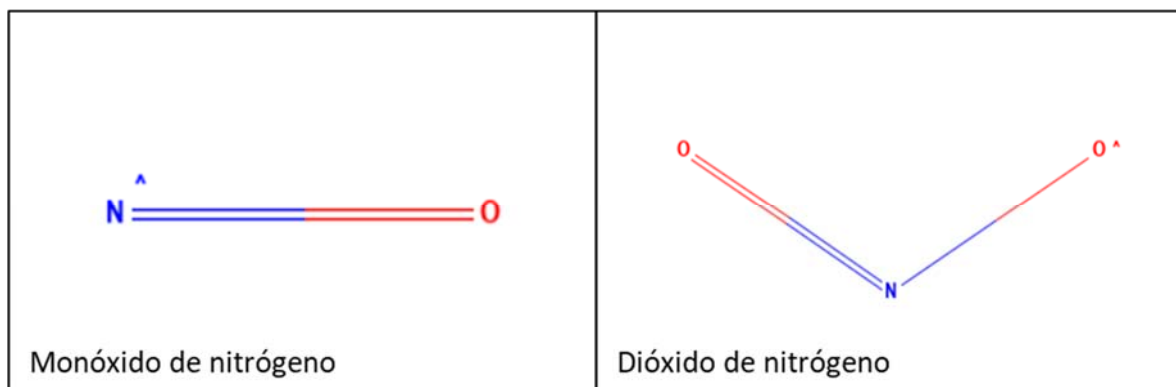


Figura 1: Estructura química molecular del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno.

FUENTE: Nitric Oxide (PUBCHEM, 2005a)

2.2 Características fisicoquímicas del O₃.

Las moléculas de ozono (O₃) se pueden clasificar de acuerdo con su ubicación en la capa atmosférica. En este sentido, se identifican dos tipos de ozono: el ozono troposférico o superficial y el ozono estratosférico. Si bien ambos cuentan con características fisicoquímicas idénticas, es importante mencionar esta distinción debido a que el primero es considerado como un contaminante atmosférico por sus efectos nocivos sobre las personas y el ambiente; mientras que, el segundo forma parte de la capa de ozono y absorbe la radiación ultravioleta proveniente del sol evitando que llegue a la superficie terrestre (Gobierno de Aragón, 2014; Houston Clean Air Network, 2020). Para fines de esta investigación, se tomó en cuenta únicamente al ozono troposférico.

En la base de datos PUBCHEM (2005c) se puede encontrar la recopilación de características fisicoquímicas del O₃. Al igual que el NO y el NO₂, el O₃ es una molécula más pesada que el aire, por lo que, relativamente, no es de fácil dispersión atmosférica. Además, el O₃ presenta el punto de fusión más bajo entre estos tres compuestos y un punto de ebullición mayor que el NO. Finalmente, el O₃ es una molécula considerada como insoluble en agua. En la Tabla 3 podemos observar el resumen de las principales propiedades de este contaminante y en la Figura 2 podemos observar el modelo de estructura química molecular del O₃.

Tabla 3: Principales propiedades fisicoquímicas del O₃.

Propiedad fisicoquímica	Ozono (O ₃)
Color	Incoloro a azulado
Peso relativo del vapor	Más pesado que el aire
Combustibilidad	No combustible
Peso molecular	47,998 g/mol
Carga	Neutra
Olor	Penetrante
Umbral de olor inferior	2 ppm
Umbral de olor superior	-
Punto de ebullición	-112 °C a 760 mmHg
Punto de fusión	-192,2 °C a 760 mmHg
Solubilidad en agua	Insoluble
Densidad de vapor	1,7 relativa al aire
Presión de vapor	41 257 mmHg a 10,4 °F
Calor de vaporización	0,815 Kcal/mol

FUENTE: Ozone (PUBCHEM, 2005c)

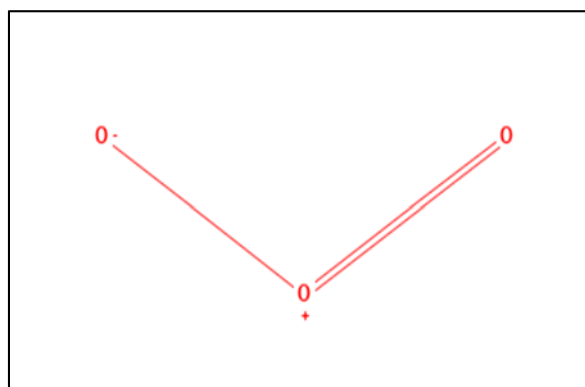


Figura 2: Estructura química molecular del ozono.

FUENTE: Ozone (PUBCHEM, 2005c)

2.3 Fuentes de emisión de los NO_x.

La generación de los NO_x se realiza de manera diferente para cada una de sus especies químicas. Esto se debe a que, si bien el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se pueden liberar directamente al ambiente a partir de fuentes naturales y antropogénicas, este último es formado principalmente a partir de precursores previamente liberados, como es el caso del mismo NO (Galán y Fernández, 2006; Ocak & Turalioglu, 2008).

2.3.1 Fuentes naturales de liberación de NO.

Existen dos principales procesos involucrados en la generación del NO a partir de fuentes naturales: la ocurrencia de actividad eléctrica en fenómenos meteorológicos y la actividad microbiana. En los siguientes párrafos se detalla más sobre ambos.

a. NO generado a partir de los rayos (LNO_x).

Uno de los procesos de generación del NO a partir de fuentes naturales se desarrolla gracias a los rayos, los cuales son descargas eléctricas producidas ya sea por la fricción que se da entre nubes o por la fricción entre nubes y la Tierra. Se ha encontrado que alrededor del mundo ocurren más de 1,2 billones de rayos al año, los cuales pueden alcanzar temperaturas de hasta 30 000 K (aproximadamente 29 727 °C) y, así, ser capaces de catalizar reacciones químicas atmosféricas como es la ruptura de las moléculas de nitrógeno molecular (N₂) y oxígeno molecular (O₂) para generar NO (llamado LNO_x, derivado de la primera letra de la palabra “rayo” en inglés, *Lightning*) de acuerdo a la Ecuación (1). Se estima que, en promedio, cada rayo transforma 7 Kg de nitrógeno presente en la atmósfera en NO y que anualmente representan entre 10 y 15% (8,6 Tg de NO_x) de las emisiones de NO_x a la atmósfera (Gasmi, Aljalal, Al-Basheer & Abdulahi, 2017; Kang & Pickering, 2018; LibreTexts, 2018; National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2009). Adicionalmente, en la Figura 3 se puede apreciar un ejemplo del aporte de NO_x producido por la ocurrencia de rayos (LNO_x) comparado con el total de NO_x emitido a la atmósfera en los Estados Unidos de Norteamérica durante julio del 2011.

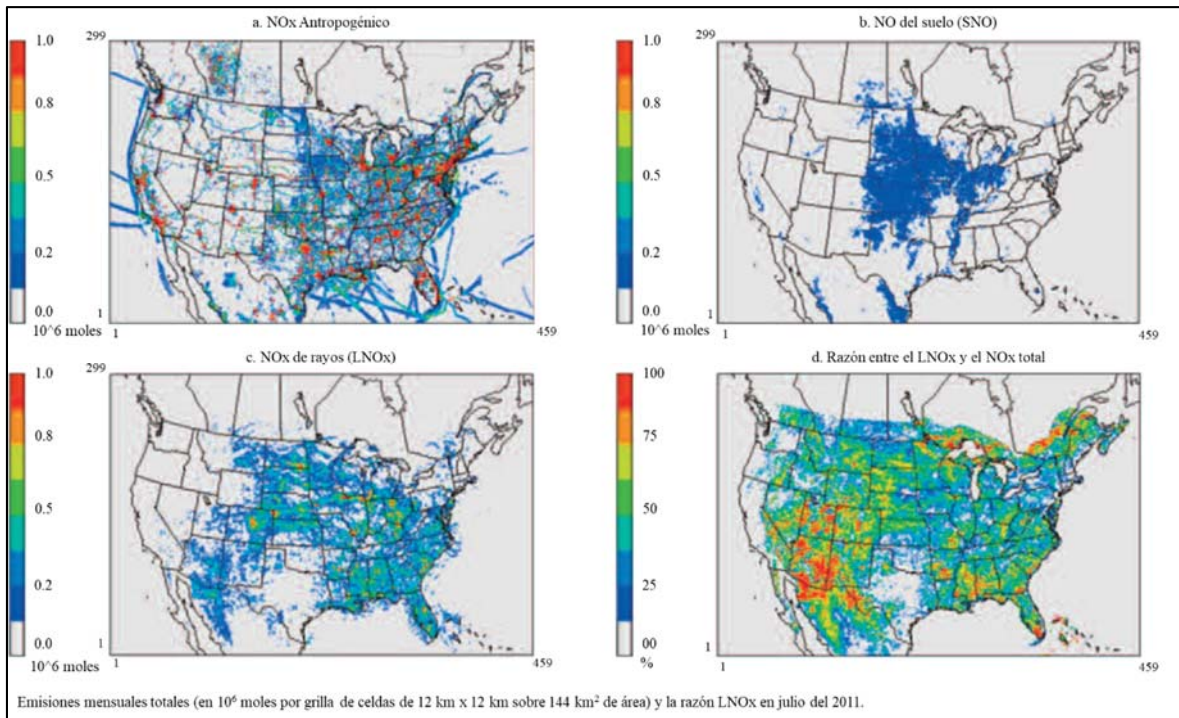


Figura 3: Comparación del LNO_x y el NO_x total emitido a la atmósfera.

FUENTE: Lightning NO_x Emissions and the Implications for Surface Air Quality over the Contiguous United States (Kang & Pickering, 2018)



b. NO generado a partir de la actividad microbiana en suelos (SNO).

Otra fuente natural de emisiones de NO es la actividad microbiana del suelo (llamado SNO derivado de la primera letra de la palabra “suelo” en inglés, *Soil*) a partir de los procesos de: i) nitrificación, ii) desnitrificación, iii) desnitrificación nitrificante y iv) quimiodesnitrificación. Los tres primeros procesos son llevados a cabo por microorganismos como las nitrosobacteria y las nitrobacterias; mientras que, el último depende de los productos generados por la actividad microbiana y de los agentes reductores del medio. Se estima que la contribución del suelo a la emisión de compuestos nitrogenados a la atmósfera es de 13 a 21 Tg de N anualmente, y que toma principal relevancia en zonas donde hay poca actividad antropogénica (Pilegaard, 2013; Thomson, Giannopoulos, Pretty, Baggs & Richardson, 2012; Wrage, Velthof, van Beusichem & Oenema, 2001).

Para el caso de la nitrificación, el NO es producido a partir de la oxidación del amonio (NH_4^+) como parte del metabolismo de los organismos autotróficos nitrosobacterias en presencia de O_2 . Posteriormente, otros organismos autotróficos, las nitrobacterias, transforman el nitrito (NO_2^-) (originado de una parte del NO generado previamente) a nitrato (NO_3^-) en presencia de oxígeno. Sin embargo, en condiciones anóxicas, estas últimas transforman el NO_3^- en NO_2^- y finalmente en NO. Por otro lado, los organismos heterotróficos nitrificadores producen NO_3^- y NO en condiciones aeróbicas, especialmente en suelos de bosques. En la Figura 4 se puede apreciar de manera resumida los compuestos involucrados en este proceso (Pilegaard, 2013).

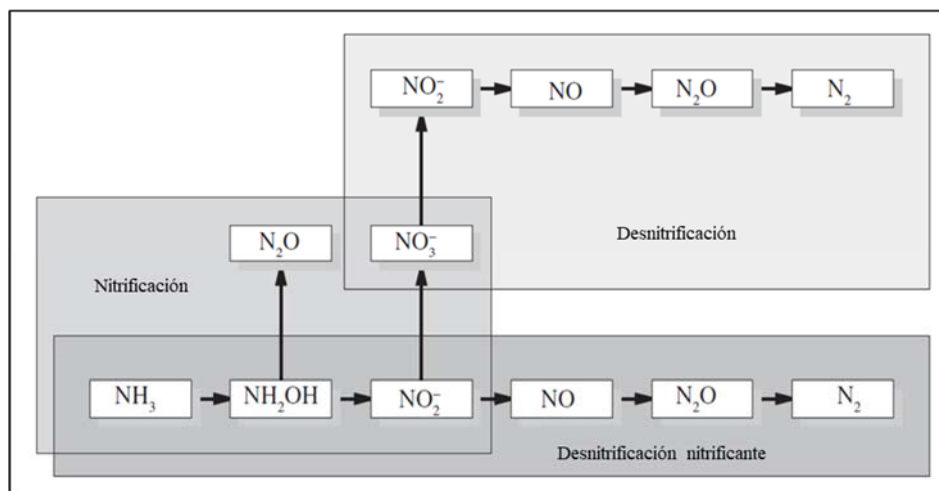


Figura 4: Transformación del nitrógeno mineral en suelo.

FUENTE: Processes regulating nitric oxide emissions from soils (Pilegaard, 2013) /
Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide (Wrage *et al.*, 2001)

Para el caso de la desnitrificación, las bacterias y hongos comprometidos en este proceso reducen los óxidos de nitrógeno a productos gaseosos. Si bien el producto principal es el N_2 , se cree que, en condiciones anaeróbicas, el NO también toma un papel importante como sub producto. En la Figura 4 se puede apreciar de manera resumida los compuestos involucrados en este proceso (Pilegaard, 2013).

Para el caso de la desnitrificación nitrificante (proceso diferente al de la nitrificación-desnitrificación simultánea, que simplemente es el acoplamiento de la nitrificación con la desnitrificación), el proceso es llevado a cabo por autótrofos oxidadores de amoníaco

(NH₃) los cuales liberan N₂, N₂O y NO como productos de su metabolismo. En la Figura 4 se puede apreciar de manera resumida los compuestos involucrados en este proceso (Wrage *et al.*, 2001).

Finalmente, el cuarto proceso involucrado en las emisiones de NO desde el suelo debido a la actividad microbiana es la quimiodesnitrificación. Este proceso se da a pH bajo y consiste en la formación de NO a partir de NO₂⁻ de origen microbiano, sin formar parte de las reacciones netamente biológicas. Debido a su vínculo con la nitrificación, resulta muy difícil separar la producción de NO y N₂O generado a partir de estos dos procesos. En la Figura 5 se puede apreciar la adaptación de lo descrito anteriormente sobre este proceso (Chalk & Smith, 1983; Pilegaard, 2013).

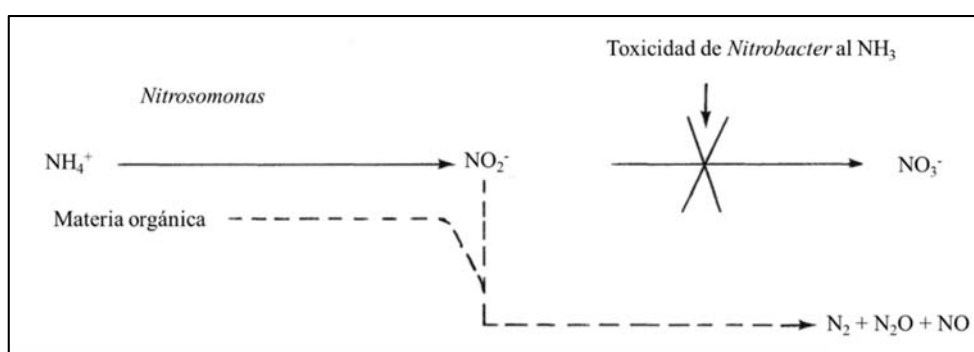


Figura 5: Ruta de la quimiodesnitrificación adaptada de Chalk & Smith (1983) y Pilegaard (2013).

FUENTE: Chemodenitrification (Chalk & Smith, 1983) / Processes regulating nitric oxide emissions from soils (Pilegaard, 2013)

c. NO generado a partir de otras fuentes naturales.

Existen fuentes naturales que aportan en una menor medida con la emisión del NO como son los procesos naturales en donde interviene la quema de biomasa, la actividad microbiana de los océanos y las erupciones volcánicas (Fundación Crana, 2014; Galán & Fernández, 2006). El primero tiene un comportamiento similar a lo descrito en las siguientes secciones sobre la generación de los NO_x a partir de combustión; el segundo es similar a lo descrito para la actividad microbiana en suelos y el último emite NO de manera

poco significativa comparado con otros compuestos nitrogenados que sí se liberan en gran medida durante una erupción volcánica.

2.3.2 Fuentes antropogénicas de liberación de NO.

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (2019), las principales fuentes de emisión de NO a la atmósfera se relacionan con actividades humanas. En la Figura 6 se aprecia la comparación entre las emisiones antropogénicas de NO y las emisiones de NO relacionadas a la actividad biológica y a los incendios forestales. En esta figura se evidencia que las actividades humanas contribuyen considerablemente en las emisiones de NO en comparación a las fuentes naturales, similar a lo que se puede apreciar en la Figura 3.

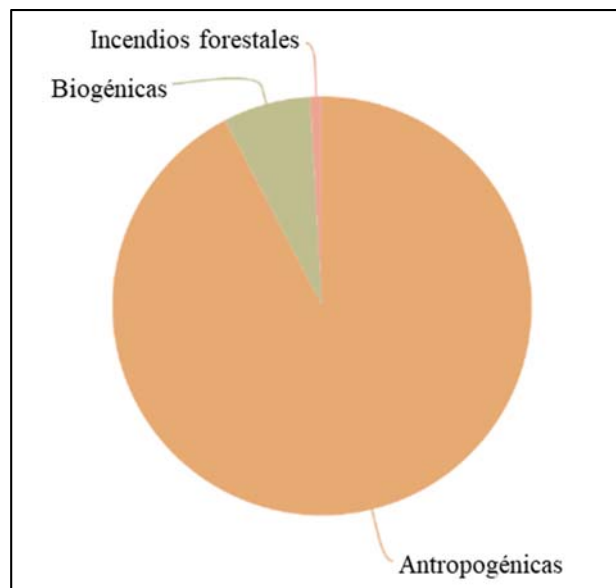


Figura 6: Cantidades relativas de emisiones antropogénicas, biogénicas y de incendios forestales en los Estados Unidos de Norteamérica para el 2014.

FUENTE: Nitrogen Oxides Emissions (USEPA, 2019)

Por otro lado, de acuerdo con Popescu & Ionel (2010), las principales fuentes antropogénicas de NO son el parque automotor y las compañías de electricidad y calefacción. En la Figura 7 y Figura 8 se aprecia la contribución de diferentes sectores a las emisiones antropogénicas de NO en países europeos y en los Estados Unidos de

Norteamérica, respectivamente. Ambas figuras comparten al transporte por carretera como la principal actividad antropogénica emisora de NO, lo cual evidencia una relación positiva entre los niveles de este contaminante y la combustión interna derivada del tráfico vial. Además, comparten a la generación eléctrica o a las compañías eléctricas como otra de sus principales fuentes de emisión.

Existen tres mecanismos mediante los cuales se produce NO durante los procesos de combustión interna: el mecanismo térmico (NO térmico), el mecanismo rápido (NO rápido) y el mecanismo combustible (NO combustible) (Andrews, 2013; Aslan, 2018; Popescu & Ionel, 2010). Los detalles de estos son explicados en las siguientes secciones.

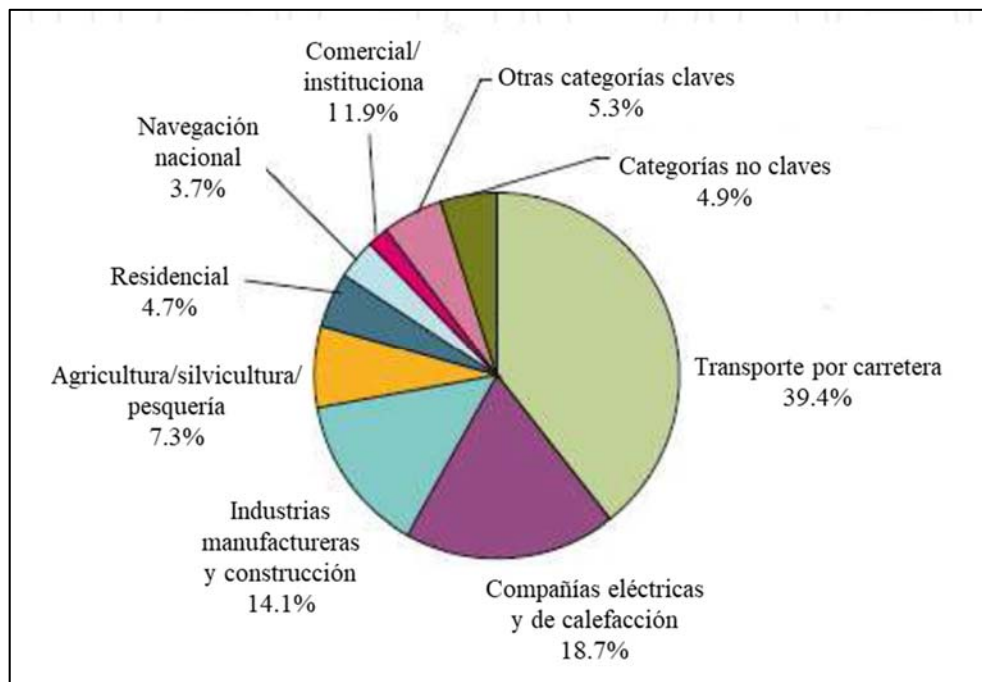


Figura 7: Fuentes de emisión de NO_x en 27 países europeos para el 2006.

FUENTE: Anthropogenic Air Pollution Sources (Popescu & Ionel, 2010)

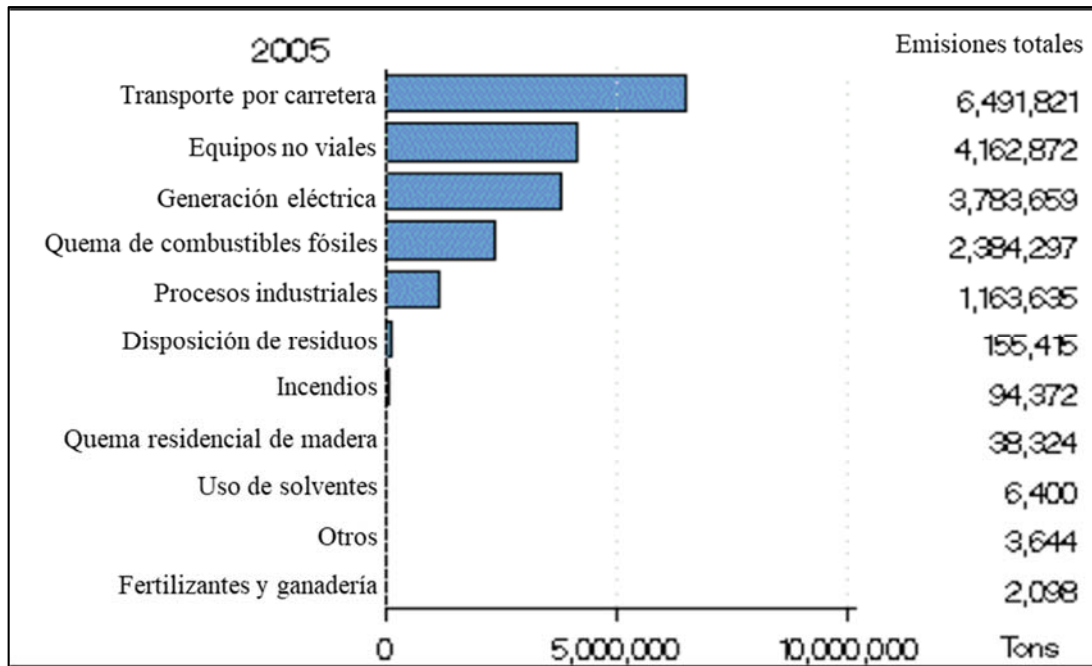


Figura 8: Fuentes de emisión de NOx en los Estados Unidos de Norteamérica para el 2005.

FUENTE: Anthropogenic Air Pollution Sources (Popescu & Ionel, 2010)

a. Mecanismo térmico (NO térmico).

El NO térmico es generado por la reacción que se da entre el N₂ y el O₂ en cámaras de combustión a altas temperaturas (aproximadamente a partir de los 1300 °C) (Cofala & Syri, 1988; E Instruments, 2016; Popescu & Ionel, 2010). Este mecanismo tiene dos variantes que dependen de la cantidad de O₂ en el medio y en la cantidad de combustible.

La primera variante de este mecanismo se da cuando el contenido de O₂ en el medio se encuentra en exceso (es decir, no es una limitante). Las altas temperaturas permiten la ruptura de la molécula de O₂ en dos átomos reactivos de oxígeno que reaccionan con el N₂ del medio liberando NO y un átomo reactivo de nitrógeno como se aprecia en la Ecuación (2). Posteriormente, este átomo puede reaccionar con otra molécula de O₂ del medio para producir otra molécula de NO y un átomo libre de oxígeno como se aprecia en la Ecuación (3), creando así una reacción cíclica de estos átomos y moléculas catalizados por las altas temperaturas (Aslan, 2018; Popescu & Ionel, 2010).



La segunda variante se desarrolla a partir de la inclusión de una cantidad elevada de combustible. En este caso, además de las reacciones anteriores, también se lleva a cabo la reacción de los átomos reactivos de nitrógeno con radicales hidroxilos pertenecientes al combustible de acuerdo a la Ecuación (4) (Popescu & Ionel, 2010).



Ambas variantes dependen, además del contenido de oxígeno y de las temperaturas elevadas, de la temperatura de combustión (propiedad intrínseca de cada combustible), del tiempo de residencia a altas temperaturas en la cámara de combustión de la mezcla de aire y combustible y de la relación entre el aire y el combustible en el medio (razón aire/combustible) (Popescu & Ionel, 2010). Con respecto a la temperatura de combustión, se ha observado que los motores que usan diésel emiten mayores cantidades de NO comparados con los que usan gasolina debido a las mayores temperaturas alcanzadas durante la combustión de los primeros. Por otro lado, a mayor tiempo de residencia de la mezcla aire/combustible se emitirá mayor cantidad de NO. Por último, se ha observado que una razón aire/combustible con un valor alrededor de la unidad (01) produce el pico de temperatura en la cámara de combustión, logrando una mayor producción de NO tal como se aprecia en la Figura 9 (Aslan, 2018; Popescu & Ionel, 2010).

Finalmente, se ha observado que, para este mecanismo, cada aumento en 1% de la temperatura a partir de los 1 700 °C ocasiona el incremento en un 20% de las emisiones de NO (Popescu & Ionel, 2010).

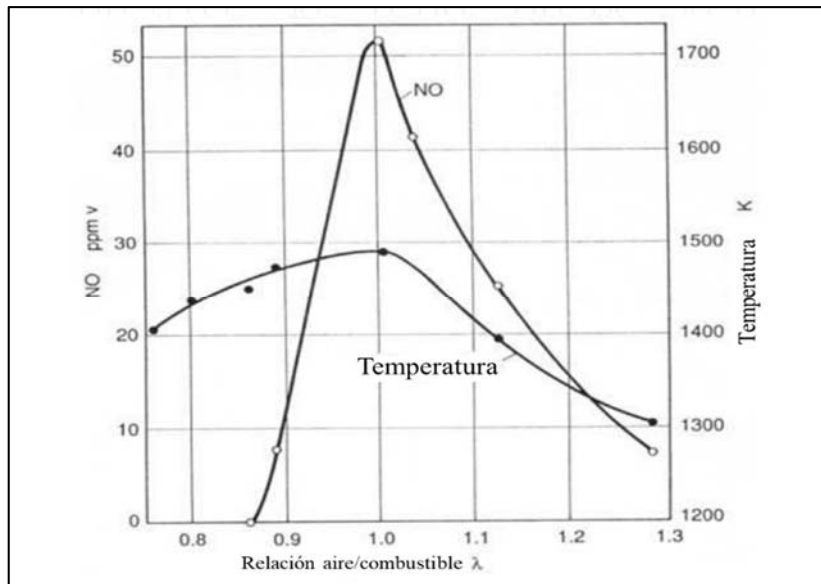


Figura 9: Dependencia entre la formación del NO y la razón aire/combustible.

FUENTE: Anthropogenic Air Pollution Sources (Popescu & Ionel, 2010)

b. Mecanismo rápido (NO rápido).

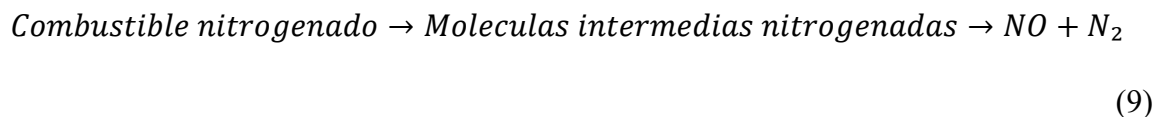
El mecanismo rápido debe su nombre a que ocurre en la cámara de combustión aun cuando la temperatura y el nivel de oxígeno es bajo (E Instruments, 2016; Fluent Incorporated, 2003b; Popescu & Ionel, 2010). A diferencia del mecanismo térmico, en este caso los radicales que reaccionan son principalmente el CH, CH₂ y el CN de acuerdo a la Ecuación (5), Ecuación (2), Ecuación (6), Ecuación (7) y Ecuación (8). Cabe señalar que la Ecuación (8) es específica para el CH₂, y el HCN formado continua la ruta de la Ecuación (6) y Ecuación (7).

Finalmente, se ha observado que este mecanismo genera NO de manera proporcional al número de átomos de carbono presentes por unidad de volumen y que ha tomado mayor interés debido a la disminución de las emisiones por el mecanismo térmico gracias a las políticas ambientales aplicadas (Fluent Incorporated, 2003b).



c. Mecanismo combustible (NO combustible).

El NO combustible debe su nombre a que es generado a partir del nitrógeno contenido en los combustibles y al exceso de O₂ en la cámara de combustión. En un primer paso, el nitrógeno es contenido como parte del radical CN para posteriormente reaccionar con el O₂ y forma NO. Por esto, los cuatro factores que lideran este mecanismo es el contenido de nitrógeno en el combustible, la cantidad de oxígeno en la cámara de combustión, el tiempo de reacción y la temperatura de la llama. En la Ecuación (9) se puede apreciar un resumen del mecanismo combustible (E Instruments, 2016; Fluent Incorporated, 2003a).



Cabe precisar que, si bien los dos productos generados por este mecanismo son el N₂ y el NO, la cantidad a producirse de cada uno de ellos depende de las reacciones de oxidación y, por lo mismo, del contenido de O₂ en la cámara de combustión. El N₂ comienza a generarse una vez que las reacciones de reducción toman lugar. Además, las moléculas intermedias nitrogenadas suelen ser el HCN y el NH₃ (Fluent Incorporated, 2003a).

Como se mencionó previamente, el contenido de nitrógeno en el combustible es uno de los factores determinantes para este mecanismo. En la Tabla 4 se puede apreciar una comparación entre diferentes combustibles y la emisión promedio de NO_x producidos por cada uno de estos. Se puede observar que la emisión de NO_x para el hidrogeno es cero debido a que es un cálculo teórico, aunque en la práctica se puede generar NO_x debido a los otros dos mecanismos (E Instruments, 2016).

Tabla 4: Emisiones de NO_x de acuerdo al combustible utilizado.

Combustible	Emisión de NO _x (10 ⁻³ kg NO _x /kg Combustible)
Petróleo	3,0
Querosene	3,0
Carbón	4,5
Propano	2,3
Gasolina	27,0
Hidrógeno	0,0
Gas natural	1,0
Butano	2,3
Madera, abedul con contenido de humedad al 20%	0,7

FUENTE: Combustion of Fuels and Nitrogen Oxides (NO_x) Emission (The Engineering ToolBox, 2009)

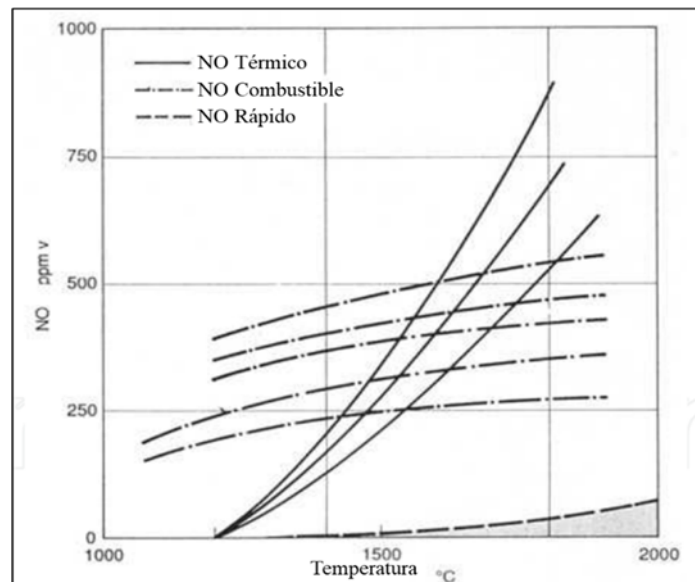


Figura 10: Dependencia entre los mecanismos de formación de NO y la temperatura de combustión.

FUENTE: Anthropogenic Air Pollution Sources (Popescu & Ionel, 2010)

Finalmente, se ha observado que el mecanismo rápido genera precursores para este mecanismo (Fluent Incorporated, 2003b). La relación entre los tres mecanismos con la cantidad de NO y la temperatura se aprecia en la Figura 10. Allí se observa que las curvas de NO combustible pueden variar de acuerdo al tipo de combustible.

2.3.3 Formación del NO₂ a partir de sus precursores.

Como se ha mencionado con anterioridad, el dióxido de nitrógeno (NO₂) es formado principalmente a partir de la reacción de precursores previamente liberados al ambiente. Por un lado, el NO puede ser oxidado por el O₂ para formar NO₂ siempre y cuando el NO se encuentre en elevadas concentraciones y el medio tenga niveles bajos de ozono troposférico (O₃). La reacción se da de acuerdo a la Ecuación (10) (Galán y Fernández, 2006; Jiang, Hay & Fisher, 2005).



Por otro lado, dado que las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la Ecuación (10) ocurren raramente de manera natural, este no se forma significativamente mediante esta ruta. En este sentido, existe otra ruta de generación de NO₂ (la cual es considerada como la ruta principal) a partir de la reacción entre el NO con el O₃ de acuerdo a la Ecuación (11) (Galán y Fernández, 2006; Jiang *et al.*, 2005; Ocak & Turalioglu, 2008).



A menor escala, el NO puede reaccionar con el radical HO₂ o con otro radical peróxido (RO₂) derivado de las reacciones que sufren en la atmósfera los COV, de tal manera que se libera NO₂. Si bien esta reacción no es predominante en el aire, es la principal ruta responsable de la formación de NO₂ sin necesidad de consumir O₃, lo cual fomenta la acumulación en el ambiente de este último gas. Las reacciones se dan de acuerdo a la Ecuación (12) y Ecuación (13) (Galán y Fernández, 2006; Jiang *et al.*, 2005; Leu, 1979).

En general, las reacciones de formación y destrucción que involucran a los NO_x y al O₃ generan un ciclo nulo de acuerdo a la Ecuación (14), Ecuación (15) y Ecuación (16). En estas se puede apreciar que en un primer momento el NO₂ es destruido, a través de la acción de la luz a longitudes de ondas menores a 420 nm, a NO y a un átomo de oxígeno reactivo. El átomo reactivo de oxígeno reacciona con una molécula de oxígeno (O₂) utilizando un correactante “M” (como el nitrógeno molecular o N₂) y generando una molécula de O₃. Posteriormente, el O₃ generado reacciona con el NO también generado anteriormente para reponer el NO₂ y O₂ consumidos en las reacciones previas. De esta manera, y debido a que el correactante “M” no se ve afectado durante este proceso, al sumar estas tres ecuaciones el resultado es nulo para todos los elementos (la producción o pérdida neta para todas las especies involucradas es igual a cero), tal como se aprecia en la Figura 12 (DaViz, 2008; Monks *et al.*, 2015).

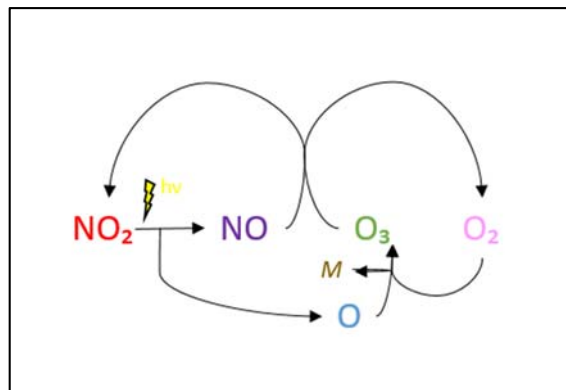


Figura 12: Ciclo nulo de las reacciones de formación-destrucción de los NO_x y el O₃.

FUENTE: Tropospheric Ozone: Background Information (DaViz, 2008) / Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer (Monks *et al.*, 2015)

Por lo mencionado anteriormente, y de acuerdo con la Figura 11, existen rutas adicionales relacionadas a la producción neta de O₃ en la troposfera. Sin embargo, estas rutas no han sido estudiadas en su totalidad y toman en cuenta otras especies como son los COV y el CO. En este sentido, lo que se sabe al respecto es que tanto los COV como el CO pueden reaccionar con otras especies químicas en la atmósfera para generar HO₂, el cual es un precursor para la formación del O₃ a partir de su reacción con el NO (reacción que no requiere del consumo de O₃) (DaViz, 2008; Monks *et al.*, 2015; Sanderson, 2007).

En un primer momento, el COV reacciona con un radical hidroxilo (OH) y O₂ presente en la atmósfera para formar un radical peróxido orgánico (RO₂) (para el caso del ejemplo de la Figura 11, el metano es convertido a la especie CH₃O₂) y una molécula de agua. Luego, el RO₂ reacciona con una molécula de NO y con O₂ para formar NO₂, una molécula con grupo carbonilo (CARB) (para el caso del ejemplo de la Figura 11, un formaldehído HCHO que posteriormente puede transformarse a una molécula de CO) y un radical HO₂. Por su lado, el CO puede reaccionar con los radicales OH y el O₂ del medio para formar dióxido de carbono (CO₂) y HO₂. Este CO puede haber sido generado a partir de reacciones de destrucción del CARB o por otros procesos de liberación de CO. Finalmente, los radicales HO₂ formados reaccionan con NO del medio para formar NO₂ que finalmente generará O₃ de acuerdo con la Ecuación (14), Ecuación (15) y Ecuación (16) vistas anteriormente (DaViz, 2008; Monks *et al.*, 2015). El conjunto de ecuaciones de producción de O₃ a partir de COV y la ecuación de formación neta se puede apreciar en la Figura 13; mientras que, el conjunto de ecuaciones de producción de O₃ a partir de CO y la ecuación de formación neta se puede apreciar en la Figura 14.

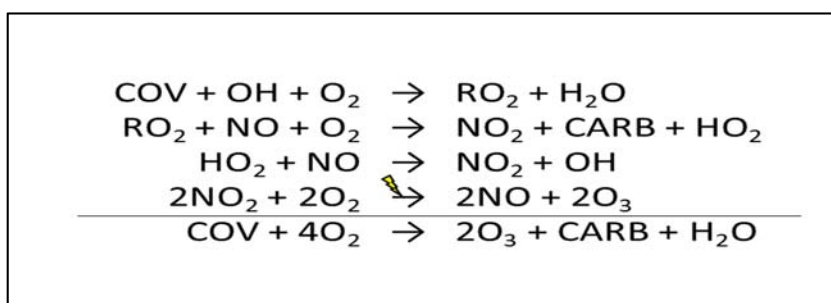


Figura 13: Producción de O₃ a partir de COV y ecuación neta.

FUENTE: Tropospheric Ozone: Background Information (DaViz, 2008)

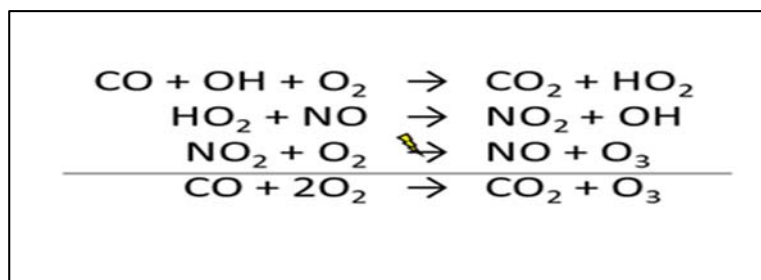


Figura 14: Producción de O₃ a partir de CO y ecuación neta.

FUENTE: Tropospheric Ozone: Background Information (DaViz, 2008) / Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer (Monks *et al.*, 2015)

Cabe señalar que, en el caso de la formación de O₃ a partir de COV, el metano es únicamente un ejemplo de estos compuestos. Otros alcanos también reaccionan de manera similar a lo expuesto anteriormente, como es el caso del etano.

2.5 Efectos de los NO_x en la salud y el ambiente.

Los seres humanos están expuestos a diversas concentraciones de NO_x a lo largo de sus vidas. Por lo mismo, estas moléculas entran al organismo ya sea por medio de la respiración o por el contacto con la piel, y pueden afectar tanto al funcionamiento como a la anatomía de los órganos (Tox Town, 2017). En la Figura 15 se aprecia un resumen de los órganos objetivo de los NO_x y las patologías asociadas.

Debido a que es difícil evitar la presencia de una especie de NO_x al evaluar la respuesta a la exposición de la otra, resulta complicado discriminar los efectos del NO frente a los del NO₂. Por ello, se suele tomar en consideración el efecto conjunto de estos dos óxidos de nitrógeno. De esta manera, se pueden diferenciar tanto sus efectos a largo plazo como los efectos a corto plazo (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2016). En la Figura 16 se puede apreciar un resumen entre las patologías asociadas a la toxicidad aguda y crónica en pulmones, su principal órgano objetivo.

Exposiciones por largos periodos de tiempo a concentraciones bajas de NO_x pueden generar problemas en el sistema respiratorio, incluso con valores por debajo de lo que las guías internacionales recomiendan. Sin embargo, es difícil separar el efecto que otros contaminantes pudieran tener sobre estos resultados. Así mismo, exposiciones por largos periodos de tiempo a altas concentraciones de NO_x pueden causar mutaciones genéticas, daños a fetos en desarrollo, disminución de la fertilidad femenina, dilatación del corazón y la muerte. Sin embargo, no se ha comprobado que los NO_x tengan efectos carcinogénicos (ATSDR, 2016; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2005; The Toxicology Data Network [TOXNET], 1998; Tox Town, 2017).

Exposiciones por cortos periodos de tiempo pueden afectar a las funciones pulmonares, como también pueden producir irritación en los ojos, nariz y garganta, y una sensación de falta de aliento, cansancio y náuseas. Aún más, exposiciones a corto plazo a niveles muy altos pueden causar quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos que se encuentran en la garganta y el tracto respiratorio superior, lo cual puede producir acumulación de líquido en los pulmones y la muerte (ATSDR, 2016; OMS, 2005; TOXNET, 1998).

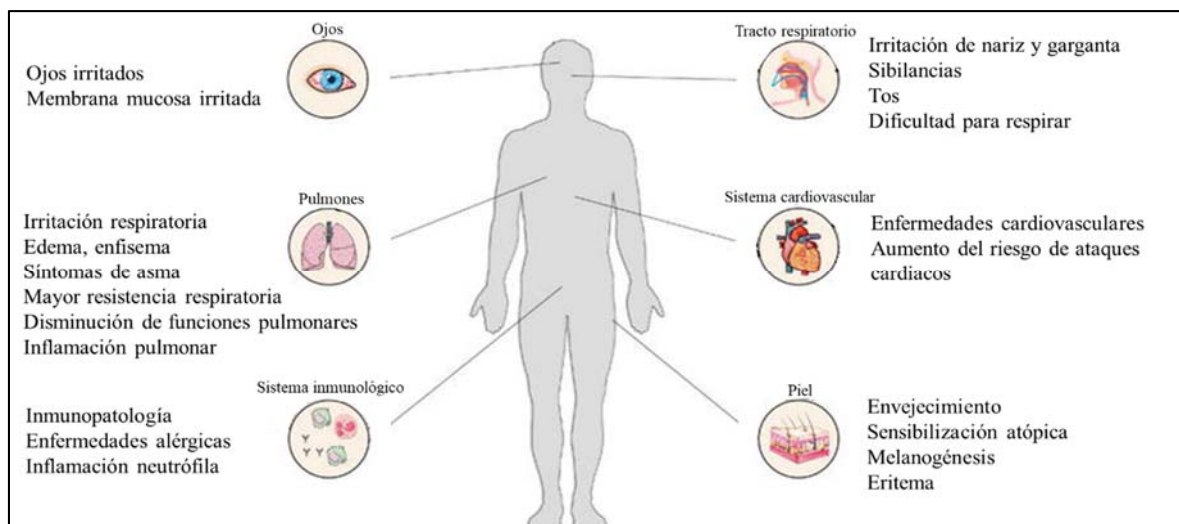


Figura 15: Representación de órganos objetivos de los NO_x y patologías asociadas.

FUENTE: The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure? (Depayras *et al.*, 2018)

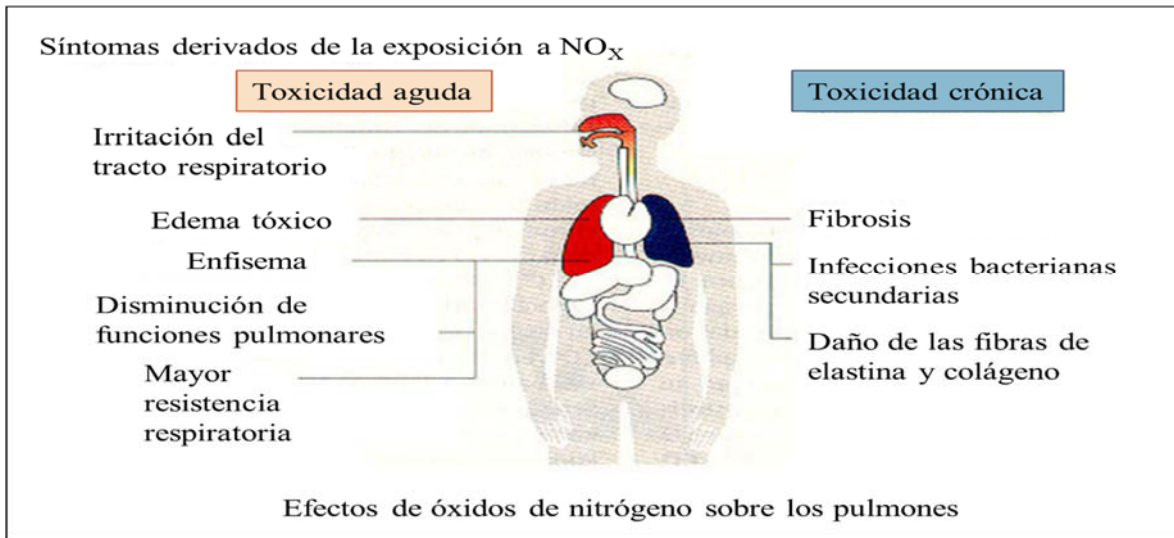


Figura 16: Patologías asociadas a la toxicidad aguda y crónica de los NO_x en pulmones.

FUENTE: Pollutants and Their Effects On Environment (DesktopClass, 2019)

Las concentraciones atmosféricas de NO_x también pueden producir daños al medio ambiente y estos se aprecian principalmente sobre la vegetación. Pueden generar efectos negativos sobre las hojas y el crecimiento de las plantas, así como volverlas vulnerables frente a otras enfermedades. Además, los NO_x contribuyen a la formación de la lluvia ácida, la cual perjudica a la vegetación por su efecto corrosivo. Así mismo, los NO_x contribuyen en la formación de material particulado y O₃, los cuales están asociados a efectos negativos específicos adicionales hacia la vegetación (BMI ICOPAL [ICOPAL], 2015; Scottish Environment Protection Agency [SEPA], 2016). En la Figura 17 se aprecia un resumen de los efectos sobre la salud y el ambiente de los NO_x.



Figura 17: Impactos en la salud y ambientales de los NO_x .

FUENTE: NO_x : How nitrogen oxides affect the way we live and breathe (USEPA, 1998)

2.6 Efectos del O₃ en la salud y el ambiente.

De manera similar que para los NO_x, los seres humanos estamos expuestos a diversas concentraciones de O₃ a lo largo de nuestras vidas. En ese sentido, estas moléculas ingresan a nuestro organismo ya sea por medio de la respiración (principalmente durante la formación del *smog* en verano) o por el contacto con la piel (al tocar agua purificada o tratada con ozono) (Tox Town, 2019). En la Figura 18 se aprecia un resumen de las patologías relacionadas a la exposición a O₃.

La exposición aguda al O₃ puede causar dolor en el pecho, dolor de cabeza, tos, sibilancias, dificultad para respirar, irritación en pulmones y garganta y congestión. Aún más, exposiciones más altas pueden generar neumonía. Estos efectos se pueden percibir a tan solo 10 a 30 minutos de exposición. Las personas más propensas a experimentar estos efectos son las personas con asma, niños, adultos mayores, personas que se encuentran frecuentemente en exteriores y personas con ciertas características genéticas y con deficiencia para asimilar ciertos nutrientes como la vitamina C y E (ATSDR, 2019; OMS, 2005; Tox Town, 2019; USEPA, 2018).

La exposición crónica al O₃ puede causar daños en los pulmones y reducción de su función, inflamación en las vías respiratorias, dificultad respiratoria, agravamiento de las enfermedades pulmonares, aumento en los ataques de asma y mayor riesgo de muerte prematura por enfermedad cardíaca o pulmonar. Adicionalmente, últimos estudios han relacionado a la exposición a O₃ con el aumento de la probabilidad de diabetes. La exposición del O₃ en este caso suele suceder temprano al mediodía y empieza a disminuir al finalizar la tarde y al llegar el anochecer (ATSDR, 2019; Holm *et al.*, 2018; Monks *et al.*, 2015; Tox Town, 2019).

De igual manera que los NO_x, las concentraciones atmosféricas de O₃ también pueden producir daños al medio ambiente, y estos se aprecian principalmente sobre la vegetación. Entre estos efectos se encuentra la interferencia con la capacidad de las plantas sensitivas a producir y almacenar alimento, haciéndolas más susceptibles a ciertas enfermedades, insectos, otros contaminantes, a la competencia y a las condiciones meteorológicas.

Además, el O₃ daña las hojas de árboles y otras plantas, impactando negativamente la apariencia de vegetación urbana; y reduce el crecimiento de árboles y el rendimiento de cultivos, potencialmente impactando la diversidad de especies en los ecosistemas. Adicionalmente, el O₃ afecta la calidad de hábitats y los ciclos de agua y nutrientes (MNN, 2009; Monks *et al.*, 2015; USEPA, 2017a). En la Figura 19 se aprecia el efecto de la exposición al O₃ en las hojas de un álamo de tulipán, *Liriodendron tulipifera*.

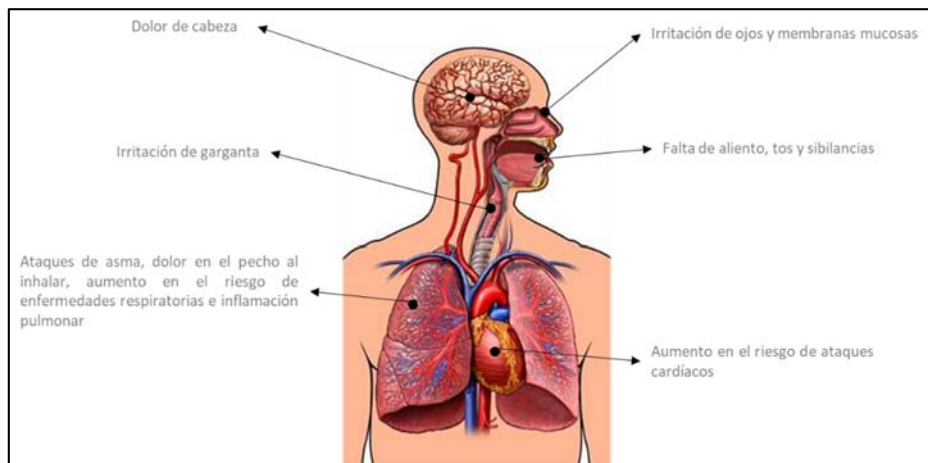


Figura 18: Patologías asociadas al O₃.

FUENTE: Estudio de sustancias tóxicas (ATSDR, 2019) / Human Health Effects of Ozone (Holm *et al.*, 2018) / Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer (Monks *et al.*, 2015) / Ozone (Tox Town, 2019)



Figura 19: Efectos del O₃ sobre las hojas de un álamo de tulipán, *Liriodendron tulipifera*

FUENTE: Ecosystem Effects of Ozone Pollution (USEPA, 2017a)

2.7 Monitoreo de los NO_x y del O₃.

Actualmente, Perú cuenta con las pautas de siete (07) protocolos de monitoreo relacionados a la calidad de aire: i) el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Gestión de los Datos de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) aprobado mediante R.D. N° 1404/2005/DIGESA (en adelante, protocolo de DIGESA), ii) el Protocolo para el Monitoreo de Emisiones Atmosféricas y Calidad del Aire de la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Harina de Residuos Hidrobiológicos del Ministerio de Producción (PRODUCE) aprobado mediante R.M. N° 194-2010-PRODUCE (en adelante, protocolo de pesquería), iii) el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones para Actividades Minero Metalúrgicas (en adelante, protocolo de minería), iv) el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones Sub Sector Hidrocarburos (en adelante, protocolo de hidrocarburos), v) el Protocolo de Monitoreo de Emisiones Atmosféricas para la Industria Manufacturera aprobado mediante R.M. N° 026-2000-ITINCI-DM (en adelante, protocolo de manufactura), vi) el Protocolo Nacional de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS) del Ministerio del Ambiente (MINAM) aprobado mediante R.M. N° 201-2016-MINAM (en adelante, protocolo de CEMS), y vii) el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire del MINAM aprobado mediante D.S. N° 010-2019-MINAM (en adelante, protocolo del MINAM). Si bien este último protocolo derogó al resto como parte de sus disposiciones, este es muy reciente y continúa en proceso de implementación.

De entre estos protocolos, los que se relacionan con los contaminantes NO, NO₂, NO_x y/o O₃ son el protocolo de DIGESA, el protocolo de minería, el protocolo de hidrocarburos, el protocolo de manufactura, el protocolo CEMS y el protocolo del MINAM. Entre otras cosas, en estos documentos se señala el método de muestreo y de análisis a utilizar, los periodos de muestreo y la cantidad y forma de ubicar los puntos de muestreo. Debido a que tanto el NO como el NO₂ forman parte de los NO_x, su monitoreo se realiza de manera similar (Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA], 2005; Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2012b, MINEM, 2012a; Ministerio de Industria Turismo integración y Negociaciones Comerciales Internacionales [MITINCI], 2000; Ministerio de Producción [PRODUCE], 2010; Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016b, MINAM, 2019). Para el presente estudio, se toma al protocolo de DIGESA y al protocolo del MINAM como los

documentos con las pautas correspondientes al monitoreo de NO_x y O_3 debido al ámbito en el que se aplican.

El método de referencia para la medición del NO y del NO_2 es a través de la quimioluminiscencia (DIGESA, 2005; MINAM, 2019). Este método consiste en la medición fotométrica de la intensidad de luz generada a partir de la reacción quimioluminiscente del NO con el ozono (O_3) a longitudes de ondas mayores a 600 nm. Cabe resaltar que, la medición de la concentración del NO se puede realizar de manera directa a partir de una muestra de aire sin previo tratamiento. Sin embargo, para la cuantificación del NO_2 y del NO_x es necesario medir la cantidad de NO presente inicialmente en la muestra; transformar a través de un convertidor de molibdeno todo el NO_2 de una muestra a NO y obtener la medición de la suma del NO formado con el NO preexistente; y, finalmente, sustraer la medición de NO presente inicialmente en la muestra a la medición de la suma de NO preexistente y NO formado para solo tener el dato del NO formado por el NO_2 . La suma del NO_2 y el NO da como resultado el NO_x . En la Figura 20 se aprecia el esquema del funcionamiento interno de un analizador de NO_x a través de la quimioluminiscencia.

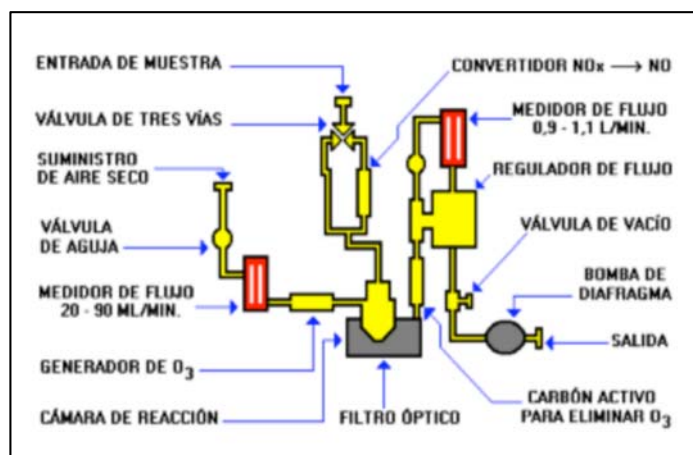


Figura 20: Esquema del funcionamiento interno del analizador de NO_x a través de la quimioluminiscencia.

FUENTE: Analizadores y Técnicas de Análisis. España: Ministerio para la Transición Ecológica (Municipalidad de Madrid, 2015)

El método de referencia para la medición del O_3 es a través de la fotometría de absorción ultravioleta (DIGESA, 2005; MINAM, 2019). Este método consiste en el ingreso de una muestra de aire a una cámara óptica para ser sometida a radiación incidente de rayos UV. En un primer momento, la muestra de aire es pasada por un filtro que elimina el O_3 contenido. Luego, este aire libre de O_3 es irradiado con rayos UV y la radiación no absorbida es determinada mediante un fotodetector. Por otro lado, otra muestra de aire es irradiada con rayos UV sin haber pasado por el filtro de O_3 , y se mide la radiación no absorbida mediante un fotodetector. Luego, la diferencia logarítmica de los niveles de radiación permite conocer la cantidad de radiación UV absorbida por el O_3 de la muestra. Finalmente, el nivel de absorción de UV por parte de la muestra es proporcional a la concentración de O_3 . En la Figura 21 se aprecia el esquema del funcionamiento interno de un analizador de O_3 a través de la absorción UV.

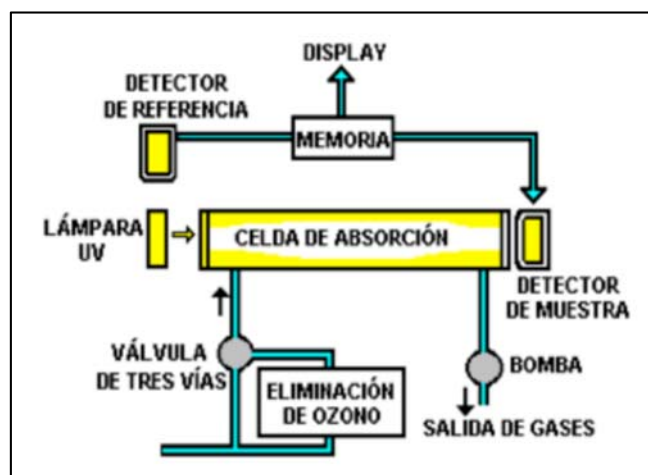


Figura 21: Esquema del funcionamiento interno del analizador de O_3 a través de la absorción UV.

FUENTE: Analizadores y Técnicas de Análisis. España: Ministerio para la Transición Ecológica (Municipalidad de Madrid, 2015)

Así mismo, el periodo de muestro debe ser a nivel horario y a nivel anual para los NO_x con el fin de comparar los datos frente a los estándares nacionales de calidad ambiental para estos contaminantes. De manera similar, el periodo de muestreo debe ser de 8 horas para el O_3 . En cuanto a los métodos de muestreo equivalentes, los protocolos señalan que estos se realizan a través de la espectrometría de absorción óptica diferencial con calibración *in*

situ, a través de métodos modificados de Griess-Saltzman, o mediante el método de la trietanolamina por espectrofotometría para el caso de los NO_x. Por su lado, los métodos de muestro equivalentes para el O₃ se realizan a través de la quimioluminiscencia con etileno, a través de la espectrometría de absorción óptica diferencial con calibración *in situ*, a través de la cromatografía líquida gas/sólido, a través del método NBKI, a través del método del 1,2 dipiridil etileno/espectrofotometría, a través del método del yoduro de potasio, a través del método del nitrito de sodio/carbonato de sodio/glicerina por cromatografía de iones o a través de la reflectancia del índigo carmín. Adicional a esto, es recomendable la medición de los parámetros meteorológicos para un posterior análisis de correlación. Para la ubicación de los puntos de monitoreo, se debe asegurar que el área esté libre de edificios y árboles en un radio de 10 metros; que la estación tenga una distancia mínima de 20 metros de cualquier fuente industrial; la entrada del equipo de muestreo debe encontrarse entre 1,5 a 4 metros de altura del piso, y que los parámetros meteorológicos se midan a 10 metros. Por último, la cantidad de puntos de monitoreo puede escogerse dependiendo a las recomendaciones que se brinda en la Tabla 5 con respecto a la población urbana involucrada (DIGESA, 2005; MINAM, 2019).

Tabla 5: Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad del aire, según el criterio poblacional.

Población (miles de habitantes)	Número mínimo de estaciones de monitoreo
0 - 249	1
250 - 749	2
750 - 999	3
1 000 - 1 499	4
1 500 - 1 999	5
2 000 - 2 749	6
2 750 - 3 749	7
3 750 - 4 749	8
4 750 - 5 999	9
≥ 6 000	10

FUENTE: Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (MINAM, 2019)

2.8 Normativa nacional e internacional de calidad de aire.

A nivel nacional, a partir del año 2001 se cuenta con los Estándares Nacionales de Calidad del Aire (ENCA), los cuales son concentraciones de contaminantes atmosféricos que deben

ser cumplidos para evitar efectos negativos sobre la población y el medio ambiente. En la Tabla 6 se exponen los ENCA para NO₂ y O₃ de acuerdo con el año de aprobación (MINAM, 2017).

Tabla 6: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire.

Norma		Parámetro	
		NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
Criterio de evaluación		Para 1 hora, no exceder más de 24 veces al año. Para anual, media aritmética anual.	Máxima media diaria, no exceder más de 24 veces al año.
D.S. N°074-2001-PCM	Anual	100	-
	1 hora	200	-
	8 horas	-	120
D.S. N°003-2008-MINAM	Anual	100	-
	1 hora	200	-
	8 horas	-	120
D.S. N°003-2017-MINAM	Anual	100	-
	1 hora	200	-
	8 horas	-	100

FUENTE: Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM (MINAM, 2008) / Decreto Supremo N° 074-2001-PCM (Presidencia de Consejo de Ministros [PCM], 2001) / Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM (MINAM, 2017)

Además, a partir del 2016 se cuenta con los Índices de Calidad de Aire (INCA) dispuestos por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) (MINAM, 2016a). Estos valores fueron creados para facilitar el entendimiento del estado instantáneo de la calidad de aire local y toman en cuenta los ENCA vigentes y los Niveles de Estados de Alerta Nacionales. En la Tabla 7 se aprecia los INCA actuales para NO₂ y O₃, los cuales se encuentran adaptados a la nueva versión de los ENCA aire aprobados mediante D.S. N° 003-2017-MINAM.

Tabla 7: Índices de Calidad de Aire para NO₂ y O₃.

Gas	Intervalo del INCA	Calificación	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)
NO ₂	0 - 50	Buena	0 - 100
	51 - 100	Moderada	101 - 200
	101 - 150	Mala	201 - 300
	>150	Umbral de cuidado	>300
O ₃	0 - 50	Buena	0 - 50
	51 - 100	Moderada	51 - 100
	101 - 210	Mala	101 - 210
	>210	Umbral de cuidado	>210

FUENTE: Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM (MINAM, 2016a)

Por otro lado, a nivel internacional se cuenta con las Guías de Calidad de Aire proporcionadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En estas se señalan los niveles recomendados en los que se deben encontrar las inmisiones de los contaminantes criterio. En el Tabla 8 se presenta el resumen de los niveles recomendados por esta institución para los NO_x y el O₃ (OMS, 2005). Se puede apreciar que actualmente el Perú tiene establecido sus estándares de O₃ en 8 horas y de NO₂ en 1 hora de acuerdo a las guías.

Tabla 8: Guías de calidad del aire de la OMS.

Guía		Parámetro	
		NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
Guías de la OMS del 2005	Anual	40	
	1 hora	200	
	8 horas	-	100

FUENTE: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre (OMS, 2005)

Finalmente, en la Tabla 9 se aprecia la comparación entre la normativa nacional peruana con los estándares ambientales de calidad de aire para diferentes países para NO₂ y O₃.

Tabla 9: Comparación de estándares de calidad de aire para diferentes países.

País		Parámetro	
		NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Perú	Anual	53	-
	1 hora	100	-
	8 horas	-	51
USA	Anual	53	-
	1 hora	100	-
	8 horas	-	70
Canadá	Anual	17	-
	1 hora	60	-
	8 horas	-	63
EU	Anual	21	-
	1 hora	100	-
	8 horas	-	61
China	Anual	21	-
	1 hora	100	100
	8 horas	-	81
India	Anual	21	-
	1 hora	-	-
	8 horas	-	51
México	Anual	-	-
	1 hora	210	-
	8 horas	-	70
Chile	Anual	53	-
	1 hora	213	-
	8 horas	-	61
Australia	Anual	30	-
	1 hora	120	100
	8 horas	-	-
Nueva Zelanda	Anual	-	-
	1 hora	100	76
	8 horas	-	-

FUENTE: National Standards for Criteria Air Pollutants 1 in Australia (Australian Government, 2005) / Canadian Ambient Air Quality Standards (Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME], 2020) / China Releases New Ambient Air Quality (Clean Air Asia, 2012) / Air Quality Standards (European Environment Agency, 2019) / Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente (Gobierno de México, 2017) / Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM (MINAM, 2017) / Normas Primarias de Calidad ambiental (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2018) / National Environmental Standards for Air Quality (Parliamentary Counsel Office, 2004) / NAAQS Table (USEPA, 2015)

2.9 Influencia de las variables meteorológicas en la concentración de los NO_x.

Como se ha mencionado con anterioridad, las variables meteorológicas como la radiación solar y la temperatura juegan un rol importante en la dinámica de los NO_x. De aquí que su comportamiento se pueda dividir en una dinámica diurna y una dinámica nocturna (Galán y Fernández, 2006; Vilorio, 2008).

2.9.1 Dinámica diurna de los NO_x.

Como ya se detalló, la principal ruta de la formación del NO₂ es a partir de la reacción del NO y el O₃ de acuerdo a la Ecuación (11). Sin embargo, esta molécula es rápidamente degradada por la acción de la radiación solar a NO durante el día, liberando radicales de oxígeno (O). Estos últimos reaccionan violentamente con el O₂ del medio reponiendo el O₃ consumido de acuerdo a la Ecuación (14) y Ecuación (15) (Galán y Fernández, 2006; Ocaik & Turalioglu, 2008).

Una vez formado el O₃, este puede reaccionar nuevamente con NO manteniendo una concentración de equilibrio. De esta manera, se genera el ciclo de los compuestos de nitrógeno durante el día, tal como se aprecia en la Figura 22. Existe una ruta adicional generada por la reacción entre el NO₂ formado y el O₃, creando radicales de nitrato (NO₃). Este último compuesto es muy inestable en presencia de luz, disociándose nuevamente a NO₂ y radicales O que recomponen el O₃ consumido gracias al O₂. Aún más, este NO₃ puede llegar a reaccionar con el NO para formar NO₂ de acuerdo a la Figura 22 (Galán y Fernández, 2006).

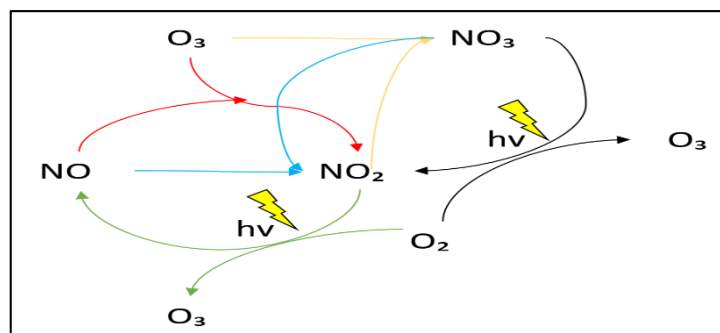
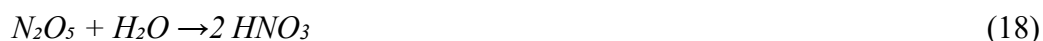


Figura 22: Adaptación del ciclo diurno de los NO_x influenciado por la radiación solar.

FUENTE: Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica (Galán y Fernández, 2006)

2.9.2 Dinámica nocturna de NO_x.

Durante la noche, la falta de luz y bajas temperaturas genera una acumulación temporal del NO₂ y evita la rápida descomposición del NO₃. Por ello, estos dos compuestos pueden reaccionar para formar pentóxido de dinitrógeno (N₂O₅) de acuerdo a la Ecuación (17). Este último gas es precursor de los nitratos que forman parte del material particulado, como se detalla en la Ecuación (18) (Galán y Fernández, 2006).



Existen más reacciones que forman parte del ciclo global de los compuestos nitrogenados en la atmosfera. El resumen de estas reacciones se puede apreciar en la Figura 23 (Galán y Fernández, 2006).

Por último, la temperatura también juega un papel importante en las reacciones de los ciclos descritos. Este parámetro favorece el aumento en la velocidad de la descomposición de los compuestos nitrogenados, por lo que a niveles bajos de temperatura se espera que los NO_x comiencen a acumularse (Jiang *et al.*, 2005).

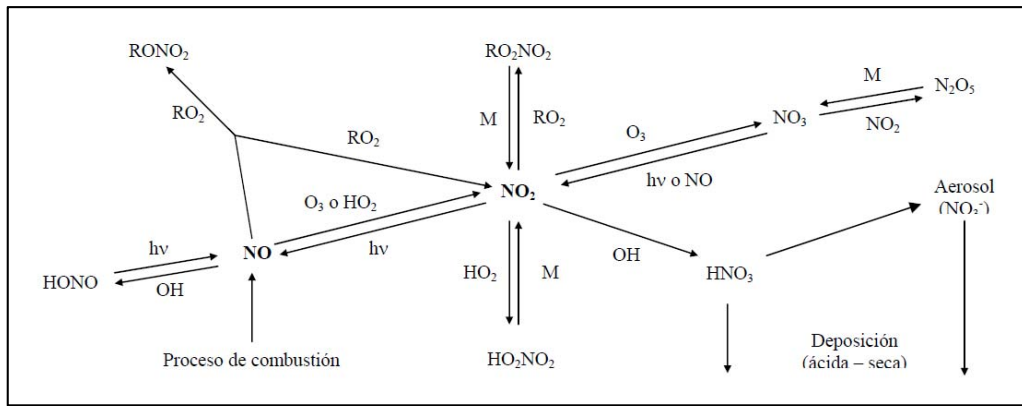


Figura 23: Ciclo global de los compuestos nitrogenados en la atmósfera.

FUENTE: Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica (Galán y Fernández, 2006)

2.9.3 Otros parámetros meteorológicos relacionados.

Existen más parámetros meteorológicos que afectan la concentración de los NO_x tales como la velocidad del viento. Sin embargo, se espera que el efecto de este sobre la concentración del NO y NO_2 sea el de disminuir sus niveles gracias a la dispersión. Es decir, este parámetro afectará los niveles de los contaminantes atmosféricos de manera general, por lo que no se relaciona íntimamente con el ciclo de los óxidos de nitrógeno, y por ello, no fue tomado en cuenta para este estudio (Henschel *et al.*, 2016).

2.10 Relación entre las concentraciones de NO_x y O_3 .

Como se ha expuesto hasta esta sección, los niveles de O_3 están sumamente relacionados con la dinámica de los NO_x . Aún más, cabe destacar que una reacción fundamental para la acumulación de O_3 durante el día está representada en la Figura 13, Figura 14 y Figura 24, donde se producen moléculas de NO_2 (precursor directo del O_3) sin necesidad de consumir previamente una molécula de O_3 . Sin embargo, el O_3 es consumido durante la noche en las diferentes reacciones expuestas, pero no es regenerado por la falta de luz; por lo que sus niveles tienden a disminuir durante dicho periodo (Galán y Fernández, 2006; Jiang *et al.*, 2005; Kovač-Andrić, Radanović, Topalović, Marković & Sakač, 2013; Ocaik & Turalioglu, 2008).

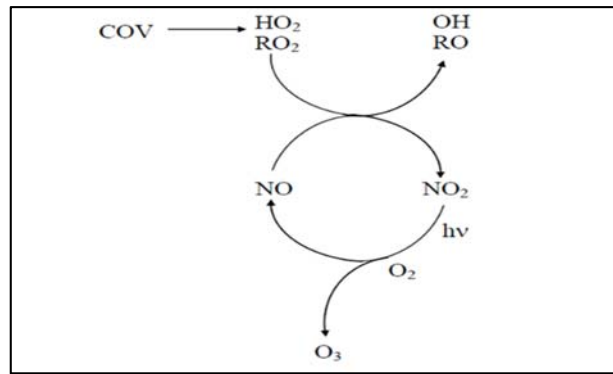


Figura 24: Formación del ozono a partir de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.

FUENTE: Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica (Galán y Fernández, 2006)

Adicionalmente, Leighton (1961) detalló una ecuación de equilibrio mediante la cual relacionaba al NO, NO₂ y O₃ y podía hallar la concentración de un gas conociendo la concentración de los otros dos. A esta ecuación la denominó “el estado fotoestacionario”.

2.11 Experiencia internacional sobre la variación temporal y espacial del NO_x.

Si bien no son usuales las investigaciones que incluyan al NO como parte principal de su monitoreo, hay estudios hechos en diferentes partes del mundo donde lo toman en consideración, al igual que a los NO_x en su conjunto.

Por su lado, Jiang *et al.* (2005) realizó un análisis de la concentración de NO_x en Auckland. En su estudio, indicó que el NO₂ tiene una gran variabilidad espacial y resaltó la importancia de la medición conjunta de los niveles de O₃ para este tipo de estudios.

Así mismo, Morena (2006) realizó un análisis de las concentraciones de O₃ y NO_x en Andalucía Occidental. Dentro de sus principales conclusiones mencionó que las concentraciones de NO en el área urbana de Sevilla son entre tres a cuatro veces superiores a las del área urbana de Huelva, dado que ésta estaría influenciada no sólo por las emisiones del tráfico sino también por las emisiones industriales. Así mismo, obtuvo los valores más altos de NO₂ durante los meses de invierno. Además, otra conclusión fue que

durante el otoño los niveles de NO fueron más elevados que los de NO₂ por la influencia de la radiación solar.

En el estudio realizado por Vilorio (2008) se puede apreciar como la concentración de NO₂ tiene una correlación negativa con los niveles de O₃. Aún más, durante el día los niveles de NO₂ tienen dos picos similares; mientras que, el ozono solo posee un pico diario, lo cual se puede explicar por su dependencia con la luz solar. Por lo mismo, ese pico se da aproximadamente al medio día como se aprecia en la Figura 25.

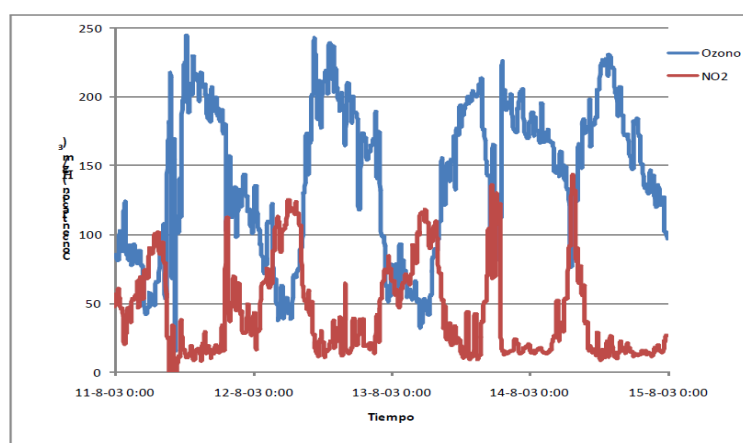


Figura 25: Evaluación temporal de las concentraciones de O₃ y NO₂ en un episodio del mes de Agosto de 2003

FUENTE: Relación entre parámetros meteorológicos y contaminantes atmosféricos medidos con un sistema DOAS en Burgos (Viloria, 2008)

Sumado a esto, Ocak & Turalioglu (2008) realizaron el procesamiento de los registros de CO, NO_x y O₃ en Erzurum, Turquía, durante 1995 y 1997. Ellos concluyeron que los contaminantes tuvieron los mayores niveles durante los meses más fríos. También expusieron los altos niveles de O₃ durante las temporadas de altas temperaturas.

Por otro lado, Richter (2009) realizó un análisis a registros satelitales sobre las concentraciones de NO₂ notando que estos se mantienen y disminuyen en Japón y Europa, respectivamente. En China, al contrario, se evidencia un aumento anual del NO₂. Por

último, se aprecia que los mayores niveles de NO₂ se registran en las zonas industriales del mundo.

Aparte de ello, Kovač-Andrić *et al.* (2013) estudiaron las variaciones del ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) en Osijek (ciudad al este de Croacia) durante el verano de 2002, 2007 y 2012. En su estudio evidenciaron que los niveles de NO₂ no excedieron los estándares europeos, pero lo contrario ocurrió con el O₃. Esto se explica principalmente a la variación estacional de la zona. Aún más, detallan que los niveles de NO₂ tuvieron una buena correlación con los niveles de CO.

Por su lado, Bell, Galatioto, Chakravartty & Namdeo (2013) realizaron una investigación sobre las variaciones de los niveles de NO_x y NO₂ durante la década de 2001 y 2010 en Newcastle, una ciudad de Reino Unido. Ellos concluyen que la duración mayor a 24 horas de aire contaminado se distribuye a través de una relación geométrica; pero sugieren más estudios al respecto.

Henschel *et al.* (2016) analizaron datos de niveles de NO_x en nueve ciudades de Europa desde 1990. Así, encontró tres aspectos de la variación de los NO_x: las concentraciones revelan niveles de tráfico en la mañana y en la tarde, las concentraciones fueron bajas durante los fines de semana, y a nivel multianual los sitios de alto tránsito vehicular no han reducido su nivel de contaminación por NO_x.

Por otra parte, Gasmi *et al.* (2017) analizaron la variación de los NO_x en Dhahran de mayo a julio del 2015. En su estudio concluyeron que la concentración de estas especies se ve fuertemente influenciado por las emisiones del tráfico y las condiciones meteorológicas. Aún más, el NO₂ excedió los estándares internacionales, lo que sugiera problemas de contaminación en esta ciudad.

Por último, Jang, Do, Park, Kim y Yoo (2017) realizaron un estudio sobre la variación temporal y espacial de los contaminantes del aire urbano en cuatro zonas de Buzan (Corea

del Sur). De esta manera, observaron que los niveles de NO y NO₂ presentan marcadas variaciones estacionales, aumentando en invierno. El ozono, por su lado, tiende a disminuir en primavera. Así mismo, en cuanto a la variación espacial, se acentuó durante el ciclo diurno.

2.12 Experiencia internacional sobre la influencia de las variables meteorológicas en la calidad del aire.

Es común que los estudios basados en el procesamiento de registros de datos incluyan un análisis con respecto a los parámetros meteorológicos. Sin embargo, no todos incluyen los mismos parámetros meteorológicos, lo cual depende únicamente del criterio y la experiencia del investigador.

Jiang *et al.* (2005) encontraron que los parámetros meteorológicos tienen un efecto significativo sobre la calidad de aire en Auckland. Así mismo, observaron que a bajas temperaturas los niveles de NO aumentan. Aún más, vieron que el NO se ve más influenciado que el NO₂ por la variación de las características meteorológicas.

Por su lado, Morena (2006) resalta la evidente diferencia entre las concentraciones medidas en los meses de verano comparados a los de invierno para el O₃ y los NO_x, evidenciando la dominante influencia de la radiación solar y la temperatura sobre los niveles de estos contaminantes. En verano se obtuvo los mayores niveles de O₃ y, en invierno, de NO_x.

Sumado a esto, en el estudio realizado por Vilorio (2008) se puede apreciar como hay una correlación positiva entre la temperatura y el O₃. Aún más, se evidencia una relación similar entre la radiación solar y este mismo gas. Sin embargo, la relación es totalmente contraria en el caso del NO₂.

Además, Ocak & Turalioglu (2008) evaluó el efecto de la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa sobre el ozono, el CO y los NO_x. En su estudio concluyeron que, a mayor velocidad de viento y temperatura, las concentraciones de CO y NO_x disminuyen. Así mismo, los altos niveles de O₃ se justifican por las altas temperaturas y alta humedad relativa. Todos los parámetros meteorológicos tienen por lo menos una correlación moderada con los contaminantes estudiados.

Por su lado, Bell *et al.* (2013) realizaron un análisis con respecto a la influencia de la dirección del viento sobre los niveles de NO₂. La predominancia de la dirección del viento responde a la variación observada en el estudio sobre los niveles de los contaminantes.

Por otra parte, Gasmi *et al.* (2017) analizaron la influencia de la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa sobre los niveles de NO_x. En su estudio observaron que la temperatura y la radiación UV juegan un rol importante en la disminución y aumento de las especies de óxidos de nitrógeno. Si bien la temperatura y la velocidad de viento tienen una correlación negativa sobre los contaminantes estudiados, la humedad relativa tuvo una correlación positiva.

Por último, Jang *et al.* (2017) demostró que los niveles de NO_x predominan en agosto. Esto debido a tanto las condiciones atmosféricas como el comportamiento de los pobladores de Buzan que evitan conducir durante esa estación.

2.13 Radicales hidroxilos (OH), radicales perhidroxilos (HO₂), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y radical nitrato (NO₃).

En esta sección se describen conceptos adicionales útiles para complementar el entendimiento de la revisión de literatura y para la discusión de los resultados generados en el presente estudio.

2.13.1 Radical hidroxilo (OH) y perhidroxilo (HO₂).

El radical hidroxilo (OH) es uno de los gases más reactivos de la atmósfera. Está conformado por un átomo de hidrogeno, un átomo de oxígeno y un electrón desapareado. En general, está involucrado en las reacciones de rompimiento de otras moléculas presentes en la atmósfera y es conocido por ser el principal control de la concentración de metano (CH₄). La concentración de este gas depende de la radiación incidente, lo cual se puede apreciar en la Figura 26 donde la concentración de OH aumenta de acuerdo a la hora (en el ejemplo, las horas están de acuerdo con la hora estándar del este, 06:00 am en la esquina superior izquierda, 12:00 pm en la esquina superior derecha, 18:00 pm en la esquina inferior izquierda y 00:00 am en la esquina inferior derecha) (El Tiempo, 2018).

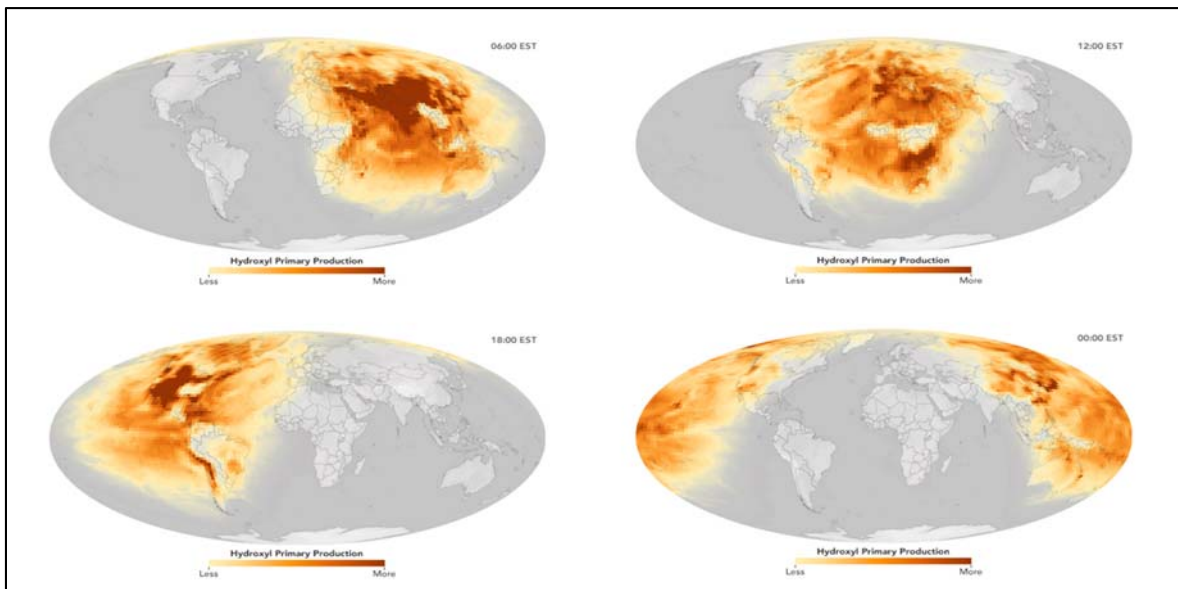


Figura 26: Producción primaria del radical hidroxilo (OH) de acuerdo con la hora del día.

FUENTE: El radical hidroxilo (OH) se recicla en la atmósfera (El Tiempo, 2018)

Por su lado, el radical perhidroxilo (HO₂) es formado por la transferencia de un átomo de hidrógeno a una molécula de oxígeno y está relacionado con la oxidación de muchos hidrocarburos. (American Meteorological Society, 2012). Junto con el OH forma parte de la familia de los radicales hidrogenados (HO_x) y sus principales precursores son el hidrogeno molecular (H₂), el metano (CH₄) y el agua (H₂O). En la Figura 27 se puede apreciar las rutas que conforman el ciclo atmosférico de estos compuestos.

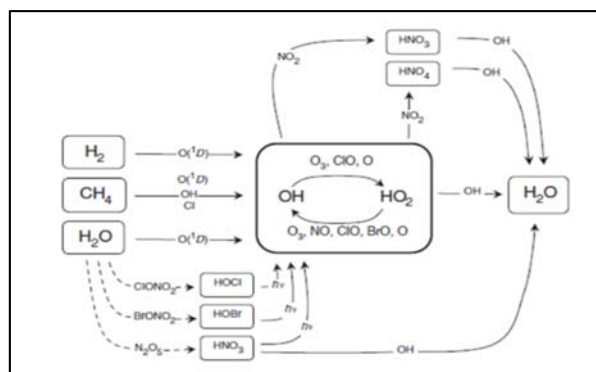


Figura 27: Principales fuentes y sumideros de HO_x.

FUENTE: Stratospheric Chemistry Topics (Hanisco, 2003)

2.13.2 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) son una familia de componentes que se caracterizan por contener carbono, excluyendo al monóxido de carbono (CO), al dióxido de carbono (CO₂), al ácido carbónico (H₂CO₃), a los carburos metálicos y a los carbonatos. De manera general, la Organización Mundial de la Salud (OMS) los clasifica de acuerdo a su volatilidad en: i) Compuestos Orgánicos Muy Volátiles (COMV), ii) Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y iii) Compuestos Orgánicos Semivolátiles (COSV). Por otro lado, se pueden categorizar de acuerdo a su peligrosidad en i) extremadamente peligrosos para la salud (como el benceno, el cloruro de vinilo y el 1,2 dicloroetano), ii) los compuestos clase A (compuestos orgánicos que pueden causar daños significativos al ambiente como el acetaldehído, tetracloruro de carbono, CFC, etc.) y iii) los compuestos clase B (compuestos orgánicos de impacto bajo al ambiente comparados a la clase A) (Environment Agency, 1996; Guenther *et al.*, 2000; Lafond, 2020; USEPA, 2017b).

2.13.3 Radical nitrato (NO₃).

El radical nitrato (NO₃) es un compuesto nitrogenado que, si bien está sumamente relacionado con el ciclo nocturno de los NO_x, no forma parte de estos por ser un radical, es decir, por poseer electrones desapareados (Matsumoto, Imai, Kosugi & Kajii, 2005).

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio.

El presente estudio se centra específicamente en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana. Por su lado, la zona norte cuenta con ocho (08) distritos en donde residen un total de 2 623 420 pobladores en una extensión de 81 049,52 ha. En cambio, la zona centro cuenta con 15 distritos en donde residen 1 983 734 pobladores en una extensión de 14 183,41 ha. Así, el área de estudio alcanza un total de 4 607 154 pobladores y de 95 232,93 ha (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2017), como se aprecia en la Tabla 10 y Tabla 11. En cuanto a su clima, de acuerdo con la clasificación climática Thornthwaite, Lima Metropolitana se encuentra dentro del clima E(d) B'1 H3 (Figura 28), el cual describe una zona desértica, semicálida con temperaturas medias de 16 °C hasta 23 °C y con escasas de lluvias durante el año debido a la influencia de la corriente peruana (SENAMHI, 2020). En general, Lima es considerada la segunda ciudad más seca del planeta debido a presentar una precipitación mínima de aproximadamente 9 mm al año; la humedad relativa se encuentra en promedio en 85% en el centro; y los vientos predominantes son los que vienen del sur, con velocidades de entre 4 a 5 m/s (Miranda y Chavez, 2012).

Tabla 10: Área y población de los distritos de la zona norte de Lima Metropolitana.

Zona	Distrito	Área (ha)	Población
Norte	Ancón	31 070,09	67 232
	Santa Rosa	1 743,71	29 271
	Carabayllo	31 223,51	350 989
	Independencia	1 611,77	219 163
	San Martín de Porres	3 634,18	704 999
	Los Olivos	1 822,44	343 878
	Comas	4 888,09	553 537
	Puente Piedra	5 055,73	354 351
TOTAL		81 049,52	2 623 420

FUENTE: Censos nacionales 2017 (INEI, 2017)

Tabla 11: Área y población de los distritos de la zona centro de Lima Metropolitana.

Zona	Distrito	Área (ha)	Población
Centro	San Isidro	970,02	65 333
	Magdalena del Mar	326,58	61 656
	San Borja	1 035,91	121 793
	Lince	274,95	58 460
	Santiago de Surco	3 471,32	378 978
	Pueblo Libre	464,52	89 199
	Jesús María	434,33	77 955
	Barranco	274,85	35 379
	Miraflores	914,88	103 090
	Surquillo	462,90	97 652
	San Miguel	958,84	162 589
	La Victoria	914,18	189 083
	Breña	321,28	90 414
	Lima	2 152,17	273 142
	Rímac	1 206,68	179 011
TOTAL		14 183,41	1 983 734

FUENTE: Censos nacionales 2017 (INEI, 2017)

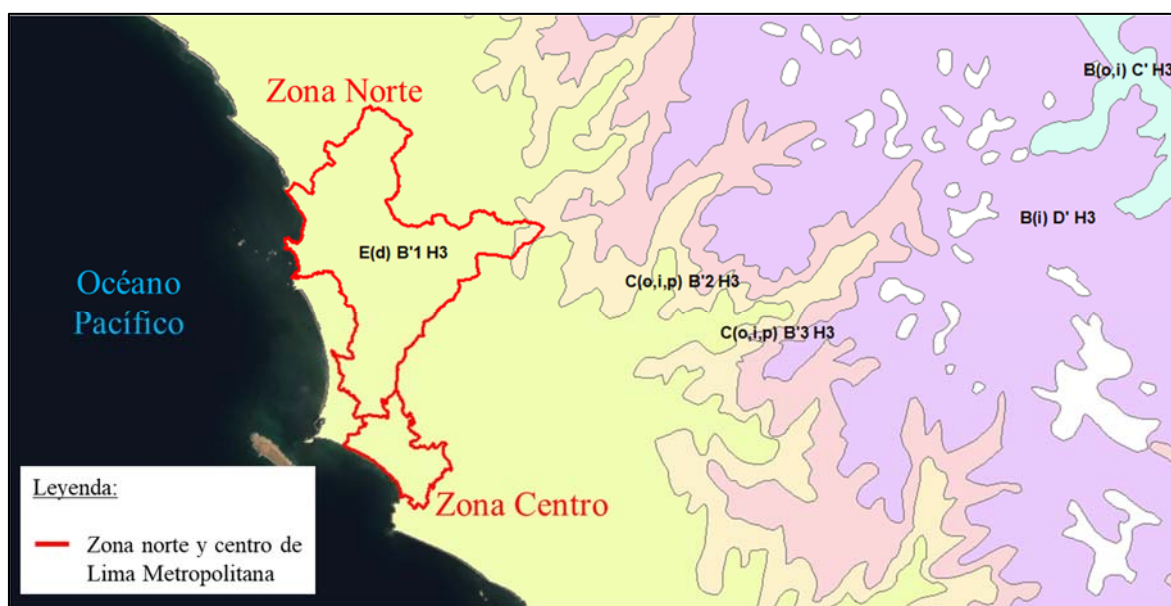


Figura 28: Mapa de clasificación climática según Thornthwaite y zonas centro y norte de Lima metropolitana.

FUENTE: Mapa climático del Perú (SENAMHI, 2020)

3.2 Materiales y equipos.

Se utilizó la información a nivel horario de calidad de aire y meteorología registrada en las estaciones de monitoreo del Instituto Metropolitano Protransporte de Lima (PROTRANSPORTE) y de la red de calidad del aire del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). En el caso del PROTRANSPORTE, este cuenta con dos (02) estaciones: SAT – ubicada en la zona centro de Lima – y MOVIL – ubicada en la zona centro y, a partir de mayo del 2016, en la zona norte. Estas llevan monitoreando NO, NO₂, temperatura de aire y radiación solar desde el 2015 como parte de su plan de vigilancia de calidad de aire relacionado con las emisiones generadas a partir del sistema de transporte público de buses denominado “Metropolitano”. Por su lado, el SENAMHI cuenta con tres (03) estaciones en la zona norte – Puente Piedra, Carabayllo y San Martín de Porres - y dos (02) en la zona central – Campo de Marte (en Jesús María) y San Borja - las cuales llevan monitoreando NO₂, O₃, temperatura del aire y radiación solar desde hace aproximadamente 10 años como parte del programa de monitoreo de calidad de aire para Lima Metropolitana.



Figura 29: Mapa de estaciones de calidad de aire utilizados en el presente estudio.

Tabla 12: Características generales de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana.

Zona de Lima	Nombre de Estación	Distrito	Operador	Coordenadas UTM (WGS84, zona 18S)	
				Este (m)	Norte (m)
Centro	San Borja (SBJ)	San Borja	SENAMHI	281483	8660631
	Campo de Marte (CDM)	Jesús María	SENAMHI	277597	8664818
	SAT	Lima	PROTRANSPORTE	278695	8667554
	MOVIL 1 (MO1)	Lima	PROTRANSPORTE	278678	8666776
Norte	San Martín de Porres (SMP)	San Martín de Porres	SENAMHI	273048	8671604
	Carabayllo (CRB)	Carabayllo	SENAMHI	278498	8683451
	Puente Piedra (PPD)	Puente Piedra	SENAMHI	274053	8687722
	MOVIL 2 (MO2)	Comas	PROTRANSPORTE	277131	8681883

FUENTE: Estaciones de Calidad de Aire (PROTRANSPORTE, 2011) / Estaciones de Calidad de Aire (SENAMHI, 2010)

Los datos fueron entregados y procesados en un primer momento con ayuda del *software* Microsoft Excel (Excel). Posteriormente, se utilizaron múltiples paquetes del *software* R Studio para facilitar el procesamiento de grandes cantidades de datos. Entre estos, se utilizó el paquete “chron”, el cual facilita el manejo de datos cronológicos; y el paquete “tidyverse”, el cual facilita los cálculos entre diferentes grupos de datos.

3.3 Procedimiento.

La metodología consistió en: un análisis temporal descriptivo de las concentraciones de NO, NO₂, NO_x y O₃; un análisis de correlación entre el NO, NO₂, NO_x, O₃, la temperatura y la radiación solar; y un análisis de regresión lineal múltiple para el O₃ y el NO_x como variables dependientes de los otros parámetros. Todos estos procedimientos son detallados en los siguientes párrafos.

3.3.1 Análisis temporal de las concentraciones de NO, NO₂, NO_x y O₃.

Tanto los datos proporcionados por el SENAMHI como los proporcionada por el PROTRANSPORTE fueron adquiridos en formato “.xlsx”, el cual es compatible con el *software* Excel. La información de NO, NO₂, O₃, temperatura y radiación solar fue organizada de manera cronológica, comenzando desde las 12:00 a.m. del 01 de enero del 2015 hasta las 11:00 p.m. del 31 de diciembre del 2018, y por estación de muestreo. De esta forma, el resultado de este pre procesamiento generó una tabla exportable al *software* R Studio.

Con fines prácticos, las estaciones fueron codificadas de acuerdo a lo siguiente:

- SMP: Estación San Martín de Porres del SENAMHI.
- CRB: Estación Carabayllo del SENAMHI.
- PPD: Estación Puente Piedra del SENAMHI.
- SBJ: Estación San Borja del SENAMHI.
- CDM: Estación Campo de Marte del SENAMHI.
- SAT: Estación SAT del PROTRANSPORTE.
- MO1: Estación MOVIL del PROTRANSPORTE cuando se ubicaba en el centro.
- MO2: Estación MOVIL del PROTRANSPORTE ubicada en la zona norte.

Si bien las estaciones del SENAMHI tienen un objetivo diferente a las del PROTRANSPORTE, todas estas tienen en común la medición de NO₂. Sin embargo, por razones propias de ambas instituciones, algunas estaciones miden más parámetros que otras. Así, en la Tabla 13 se aprecia los parámetros con los que cuenta cada estación evaluada.

Tabla 13: Parámetros evaluados por estación.

Parámetro	SBJ	CDM	SMP	CRB	PPD	SAT	MO1	MO2
NO ₂	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
NO	No	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí
O ₃	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Temperatura	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Radiación solar	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí

FUENTE: Estaciones de Calidad de Aire (PROTRANSPORTE, 2011) / Estaciones de Calidad de Aire (SENAMHI, 2010)

Posteriormente, para generar los datos de NO_x se procedió a sumar los registros horarios simultáneos de NO y NO₂ en las estaciones SAT, MO1 y MO2. De esta forma, se pudo obtener valores horarios calculados para este parámetro tanto en la zona norte como en la zona centro de Lima Metropolitana.

Una vez generada la base de datos para los cuatro gases, se procedió a realizar un promedio horario por estación por mes y por parámetro, de tal forma que para cada estación se generó un gráfico de las concentraciones horarias promedio por mes.

Posterior al análisis descriptivo del comportamiento horario del O₃ y los NO_x, se realizó un análisis similar para el comportamiento diario, mensual y estacional. Específicamente para el comportamiento estacional, se tomó en consideración a los meses de diciembre a febrero como verano, marzo a mayo como otoño, junio a agosto como invierno y septiembre a noviembre como primavera.

3.3.2 Análisis de correlación entre la concentración horaria del NO, NO₂, NO_x y O₃.

Una vez realizado el análisis temporal descriptivo de las concentraciones horarias promedio de NO, NO₂, NO_x y O₃, se procedió a generar tablas de correlación entre las concentraciones promedios horarias para cada par de gases evaluados.

Si bien no se considera como parte de este estudio la evaluación del comportamiento de los gases con respecto a una distribución estadística, se han considerado los resultados de otros estudios en los que no consideran a los datos de concentraciones de gases como de distribución normal (Bell *et al.*, 2013; Munir, Chen & Ropkins, 2011). Por ello, se utilizó al coeficiente de correlación de Spearman para evaluar la correlación entre los gases debido a que no requiere la comprobación de la normalidad de los datos como parte de sus supuestos.

3.3.3 Análisis de regresión múltiple entre los niveles horarios de los NO_x y el O₃.

Debido a que el análisis de regresión lineal múltiple es un método de análisis paramétrico ampliamente utilizado en los estudios de evaluación de calidad de aire y con el fin de poder comparar los resultados del presente estudio con otros realizados para otras ciudades, se optó por evaluar la influencia de los niveles de NO_x sobre los niveles de O₃ a través de dicho método estadístico.

De acuerdo con Amat (2016), la regresión lineal múltiple posee los siguientes supuestos:

- No colinealidad: los predictores (i.e. las variables explicativas o independientes) deben ser independientes entre ellas. De manera práctica, la no colinealidad se comprueba realizando pruebas de correlación entre pares de predictores las cuales deben resultar en coeficientes de correlación bajos.
- Parsimonia: el mejor modelo es aquel capaz de explicar con mayor precisión la variabilidad observada en la variable respuesta (i.e. la variable dependiente) empleando el menor número de predictores. De manera práctica, al comparar modelos con resultados similares, se optará por escoger a aquel que posea la menor cantidad de variables independientes.
- Linealidad: cada predictor debe estar relacionado linealmente con la variable respuesta. De manera práctica, se comprueba la linealidad mediante la evaluación del coeficiente de correlación entre cada predictor con la variable respuesta.
- Distribución normal de los residuos: los residuos se deben distribuir de forma normal con media cero. De manera práctica, se recurre a histogramas o a pruebas estadísticas de normalidad para comprobar dicho supuesto.

- Homocedasticidad: la varianza de los residuos debe ser constante en todo el rango de observaciones. De manera práctica, se realiza una evaluación gráfica de la dispersión de los residuos la cual no debe mantener un patrón específico.
- Independencia: los valores de las observaciones son independientes entre sí. De manera práctica, se comprueba la independencia mediante la evaluación gráfica de los datos sobre una línea de tiempo, la cual no debe mostrar un patrón específico.
- Valores atípicos: los valores atípicos deben ser identificados y evaluados con el fin de evitar falsas correlaciones u ocultar correlaciones existentes. De manera práctica, se debe realizar un tratamiento de valores atípicos.
- Tamaño de muestra: se requiere de una muestra lo suficientemente grande para que no cause resultados irreales. De manera práctica, se espera un mínimo de observaciones de entre 10 a 20 veces el número de predictores.

Cabe señalar que, debido a que los datos de calidad del aire suelen corresponder a datos no paramétricos (Bell *et al.*, 2013; Jaffar, Hamid, Yunus & Raffee, 2018; Munir *et al.*, 2011; Ott, 1990), el uso del método de regresión lineal múltiple en el presente estudio se realiza de manera referencial tomando en cuenta que no se cumplirán la totalidad de supuestos expuestos previamente. Sin embargo, dicha metodología ha sido utilizada en otros estudios similares por su uso más extendido (Adyani *et al.*, 2009; Alghamdi *et al.*, 2019; Castellano, Franco, Cartelle, Febrero & Roca, 2009; Clapp & Jenkin, 2001; Ocak & Turalioglu, 2008; Roberts, Song & Gao, 2012; Zhao, Zheng, Li, Wei & Guan, 2018). En la Figura 30 se presenta la estructura general del modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}) + e_i$$

Figura 30: Estructura general de los modelos de regresión lineal múltiple.

En la Figura 30, “Y” es la variable respuesta o dependiente, “X_n” es la enésima variable explicativa o dependiente, “β₀” es la ordenada en el origen o el valor de Y cuando todas las variables explicativas son igual a cero, “β_n” es el efecto promedio que tiene el incremento

en una unidad de X_n sobre Y manteniéndose constante el resto de variables y “e” es el residuo o error que corresponde a la diferencia entre el valor observado y el valor estimado o calculado por el modelo.

Tomando en cuenta lo mencionado previamente, se realizó un análisis de correlación a partir del coeficiente de correlación de Pearson para estos parámetros, el cual es requerido como parte del método estadístico. Además, este análisis se hizo diferenciado entre el invierno y el verano para cada zona.

Asimismo, debido a que en ninguna estación se registran los cuatro (04) gases evaluados en simultaneo, se utilizó los datos de la estación con la que mayor correlación se obtuvo previamente con el fin de cumplir con el supuesto de linealidad. Una vez realizado el análisis de regresión, se procedió a generar gráficos de comparación entre los niveles de O_3 históricos y los calculados.

La inferencia estadística para cada una de las evaluaciones fue realizada de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se identifica a la estación que registra NO y NO_x con la cual la estación que registra O_3 posee la mejor correlación. Así, se definen las variables independientes.
2. Una vez definidas las variables independientes, se procede a generar el modelo de regresión lineal múltiple estimado específico para la concentración horaria de O_3 de la estación evaluada, tal como se vio en la Figura 30. Asimismo, con la ayuda del *software* Excel se obtiene las constantes requeridas para la generación de dicha ecuación.
3. Una vez definido el modelo de regresión lineal específico para la evaluación, se plantea la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alterna (H_a) de la evaluación.

4. Se establece un nivel de significación o “ α ”. Para el caso del presente estudio, se estableció el valor de 0,05.
5. El estadístico de prueba a utilizarse es el F de Fisher, el cual es calculado de acuerdo a la Ecuación (19). Cabe señalar que tanto el F como el $F(1-\alpha, k, n-k-1)$ se obtienen con ayuda del *software* Excel.

$$F = CMR/CME \sim F(1-\alpha, k, n-k-1) \quad (19)$$

Dónde: F es el valor F de Fisher calculado, CMR son los cuadrados medios de la regresión, CME son los cuadrados medios del error y $F(1-\alpha, k, n-k-1)$ es el valor F de Fisher tabulado a un nivel de significación de $1-\alpha$ con k grados de libertad de la regresión y $n-k-1$ grados de libertad del error.

El valor de k es igual a la cantidad de variables independientes y el valor de n es igual a la cantidad total de observaciones

6. La regla de decisión es definida tal como se muestra en la Ecuación (20) y Ecuación (21).

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si } F > F(1-\alpha, k, n-k-1) \quad (20)$$

$$\text{Se acepta } H_0 \text{ si } F \leq F(1-\alpha, k, n-k-1) \quad (21)$$

7. Finalmente, de acuerdo con la regla de decisión definida, se acepta o se rechaza la H_0 y se concluye en base del H_a .

8. Como un paso adicional, con ayuda del *software* Excel se obtiene el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de la regresión lineal múltiple evaluada. Este se interpreta como el porcentaje de la variabilidad de la concentración horaria de O_3 en la estación evaluada que es explicado por el modelo.

3.3.4 Análisis de la influencia de la temperatura y la radiación solar sobre los niveles de NO_x y el O_3 .

El análisis con respecto a los parámetros meteorológicos tomó en cuenta a los análisis realizados previamente. Así, se realizó un análisis temporal descriptivo de la temperatura del aire y la radiación solar, un análisis de correlación y un análisis de regresión lineal múltiple tanto para explicar el comportamiento horario del O_3 como para el comportamiento horario del NO_x .

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de la variación horaria, diaria, mensual y estacional del NO, NO₂, NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Con el fin de realizar el análisis temporal de los NO_x y el O₃, se ha utilizado los registros horarios de NO, NO₂ y O₃ entre los años 2015 – 2018 proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y por el Instituto Metropolitano Protransporte de Lima (PROTRANSPORTE). Así, en la Tabla 14 se muestran los resultados correspondientes a la estadística general de estos datos de acuerdo a la zona de Lima Metropolitana en donde se encuentra ubicada la estación.

Para la mayoría de las estaciones se cuenta con datos a partir de enero o febrero del 2015 hasta diciembre del 2018. Sin embargo, la estación MO1 tiene datos hasta mayo del 2016 (mes en el cual se reubicó a la zona norte) y la estación MO2 tiene datos desde febrero del 2017 (mes en el cual se inició el monitoreo de esta estación en la zona norte). Por otro lado, el resto de estaciones que no cuentan con datos hasta diciembre del 2018 es debido a que la estación se encontró fuera de servicio.

Tabla 14: Estadística general de las concentraciones de NO_x y O₃ en las estaciones de monitoreo de SENAMHI y PROTRANSPORTE para el periodo 2015 – 2018.

Zona	Parámetro	Estación	Cantidad de datos	Fecha del primer registro	Fecha del último registro	Mín.	Q1	Mediana	Prom.	Q3	Máx.	Desviación estándar
Norte	NO ₂	SMP	26 301	Feb-15	Dic-18	0,10	12,40	18,90	21,45	27,10	167,50	13,01
		CRB	24 873	Mar-15	Dic-18	0,10	11,90	19,40	21,30	28,30	145,20	13,55
		PPD	27 881	Ene-15	Dic-18	0,10	17,40	27,00	28,83	37,60	161,70	15,37
		MO2	12 184	Feb-17	Ago-18	0,08	21,04	29,93	32,30	40,65	724,49	20,34
	NO	MO2	12 202	Feb-17	Ago-18	1,39	15,25	24,20	29,85	38,91	436,69	21,03
	NO _x	MO2	12 172	Feb-17	Ago-18	3,66	42,55	57,16	62,15	76,48	1161,19	30,13
	O ₃	SMP	21 782	Ene-15	Jun-18	0,10	8,20	16,60	19,06	27,20	125,30	13,67
		CRB	20 797	Ene-15	Jun-18	0,10	3,40	10,10	18,14	26,10	150,30	20,67
PPD		20 510	Abr-15	Jun-18	0,10	2,40	5,70	13,18	18,20	148,80	16,61	
Centro	NO ₂	SBJ	21 849	Jul-15	Dic-18	0,10	13,10	20,80	24,33	32,20	122,60	15,57
		CDM	16 579	Oct-15	Dic-18	0,10	12,00	19,60	23,85	30,30	162,10	18,09
		SAT	28 133	Ene-15	Ago-18	0,00	24,21	32,15	34,71	42,36	173,53	15,61
		MO1	7 554	Ene-15	May-16	0,57	24,65	37,43	36,72	48,14	173,23	18,83
	NO	SAT	28 018	Ene-15	Ago-18	0,00	8,97	15,49	22,03	27,12	522,45	21,98
		MO1	7 554	Ene-15	May-16	2,23	17,03	30,86	38,66	47,34	432,53	34,74
	NO _x	SAT	28 014	Ene-15	Ago-18	0,00	35,25	49,41	56,79	69,91	617,06	32,36
		MO1	7 554	Ene-15	May-16	8,06	45,79	68,22	75,37	94,54	547,66	49,02
O ₃	SBJ	19 931	Jul-15	Jun-18	0,10	6,00	12,00	14,60	21,00	108,70	10,82	
	CDM	18 571	Nov-15	May-18	0,10	4,40	12,20	15,77	24,00	94,40	13,44	

Por otro lado, para mejorar la comprensión del comportamiento de los datos y verificar, o descartar, la existencia de valores anómalos, en la Figura 31 se muestra la comparación entre los diagramas de cajas y bigotes organizado de acuerdo al parámetro de evaluación y por estaciones. Así, se pudo observar que la principal cantidad de valores anómalos corresponden a valores muy altos comparados con el resto. Esto último indica que la distribución de los datos no corresponde a una distribución probabilística “normal” (i.e. no posee valores extremos mínimos y máximos tal como suele ocurrir en las distribuciones normales, sino que únicamente posee valores máximos). Aún más, en la Figura 32 se aprecia la comparación entre los histogramas generados con las concentraciones horarias de NO₂ en las estaciones SAT (i.e. estación en la zona centro) y PPD (i.e. estación en la zona norte), estaciones con una cantidad de registros similares, donde se evidencia que la mayor cantidad de registros señalan concentraciones de hasta 50 µg/m³; mientras que, otra cantidad mínima se encuentran por encima de dicho valor. Este comportamiento ha sido observado en otros estudios donde indican que este tipo de datos se ajusta principalmente a las distribuciones Weibull, Pareto o geométrica, las cuales son comunes para datos de calidad de aire ambiental (Bell *et al.*, 2013; Jaffar, Hamid, Yunus & Raffee, 2018; Munir *et al.*, 2011; Ott, 1990).

Adicionalmente, se ha observado que, para el NO₂, la estación MO1 posee el valor más alto de las medianas (37,43 µg/m³) y la estación SMP posee el menor (18,90 µg/m³), lo cual se espera que esté relacionado con los niveles de tráfico vehicular que se presentan en dichas estaciones. Para el caso del O₃, se ha observado que, de las cinco (05) estaciones donde se evaluó este parámetro, la estación SMP presenta el mayor valor de las medianas (16,60 µg m³); mientras que, la estación PPD presenta el menor (5,7 µg/m³), lo cual se atribuye a una relación negativa con respecto a los niveles de NO₂ registrados para dichas estaciones teniendo en cuenta que la estación PPD también presenta la mayor mediana (27,00 µg/m³) con respecto a las concentraciones de NO₂ de entre estas cinco (05) estaciones. Además, tanto para el NO como para el NO_x, la estación que presentó la mayor mediana en ambos parámetros fue MO1 (30,86 y 68,22 µg/m³, respectivamente); mientras que, la estación que presentó la menor mediana para ambos fue SAT (15,49 y 49,41 µg/m³, respectivamente), lo cual podría estar relacionado con los niveles de NO₂ que se presentan en estas estaciones teniendo en cuenta que la estación MO1 también presenta la mayor mediana (37,43 µg/m³) de las concentraciones de NO₂.

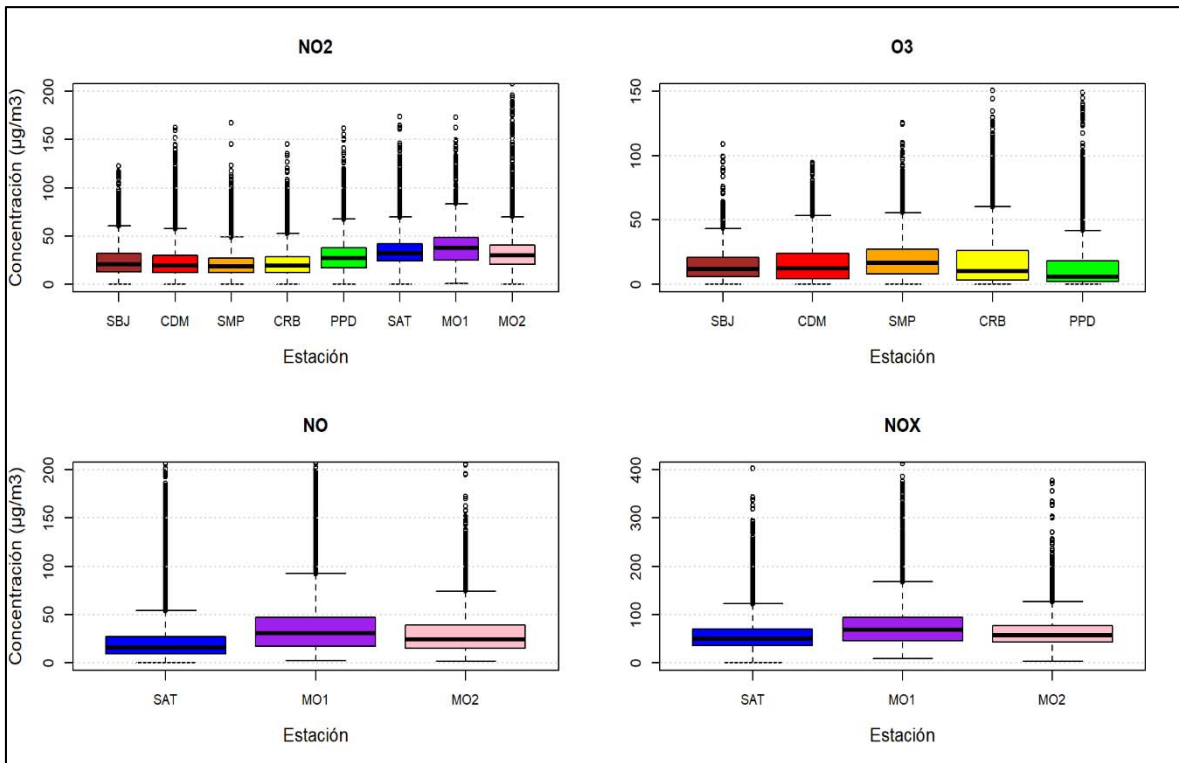


Figura 31: Diagramas de caja y bigotes de los datos de NO₂, O₃, NO y NO_x para el periodo 2015-2018.

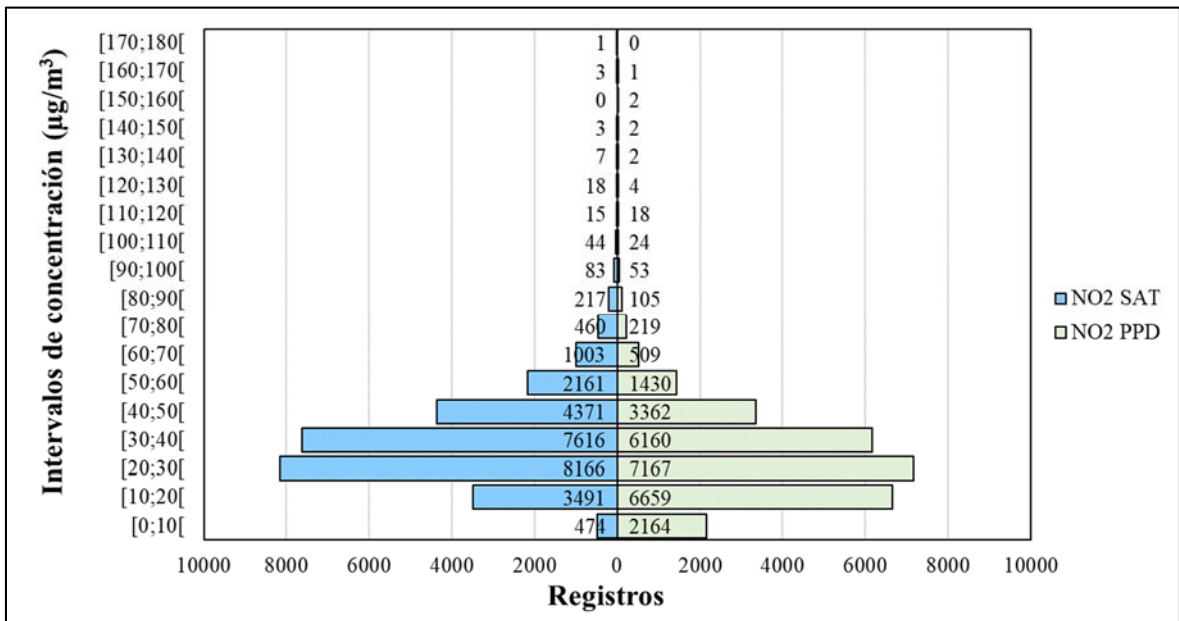


Figura 32: Histograma comparativo de las concentraciones de NO₂ en las estaciones SAT y PPD para el periodo 2015-2018.

4.1.1 Análisis de la variación horaria del NO, NO₂, NO_x y O₃.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis horario de las concentraciones de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por parámetro comparando los resultados obtenidos en cada estación donde se registra el contaminante evaluado.

a. Análisis horario del NO₂.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis horario de las concentraciones de NO₂ registradas en las estaciones SBJ, CDM, SAT, MO1, SMP, CRB, PPD y MO2. En la Figura 33 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por hora de NO₂ para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

Se ha observado que, en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer un comportamiento horario bimodal (i.e. dos valores máximos y dos valores mínimos durante el día). Además, la ocurrencia de estos cuatro (04) valores extremos se desarrolló en rangos de horas similares para todas las estaciones.

Para el caso de los valores máximos, el primero se presentó, en promedio, entre las 08:00 a.m. y 12:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 30,45 µg/m³ y 45,81 µg/m³ en la zona centro y entre los 25,81 µg/m³ y 36,8 µg/m³ en la zona norte; mientras que, el segundo se presentó, en promedio, entre las 05:00 p.m. y 09:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 28,78 µg/m³ y 42,89 µg/m³ en la zona centro y entre los 24,85 µg/m³ y 34,5 µg/m³ en la zona norte. Estos valores máximos se relacionan con los dos periodos de máxima congestión vehicular que se presentan en Lima Metropolitana entre las 06:00 a.m. y 10:00 a.m. (máxima congestión vehicular matutina) y entre las 05:00 p.m. y 09:00 p.m. (máxima congestión vehicular vespertina) (Municipalidad Metropolitana de Lima [MML], 2019).

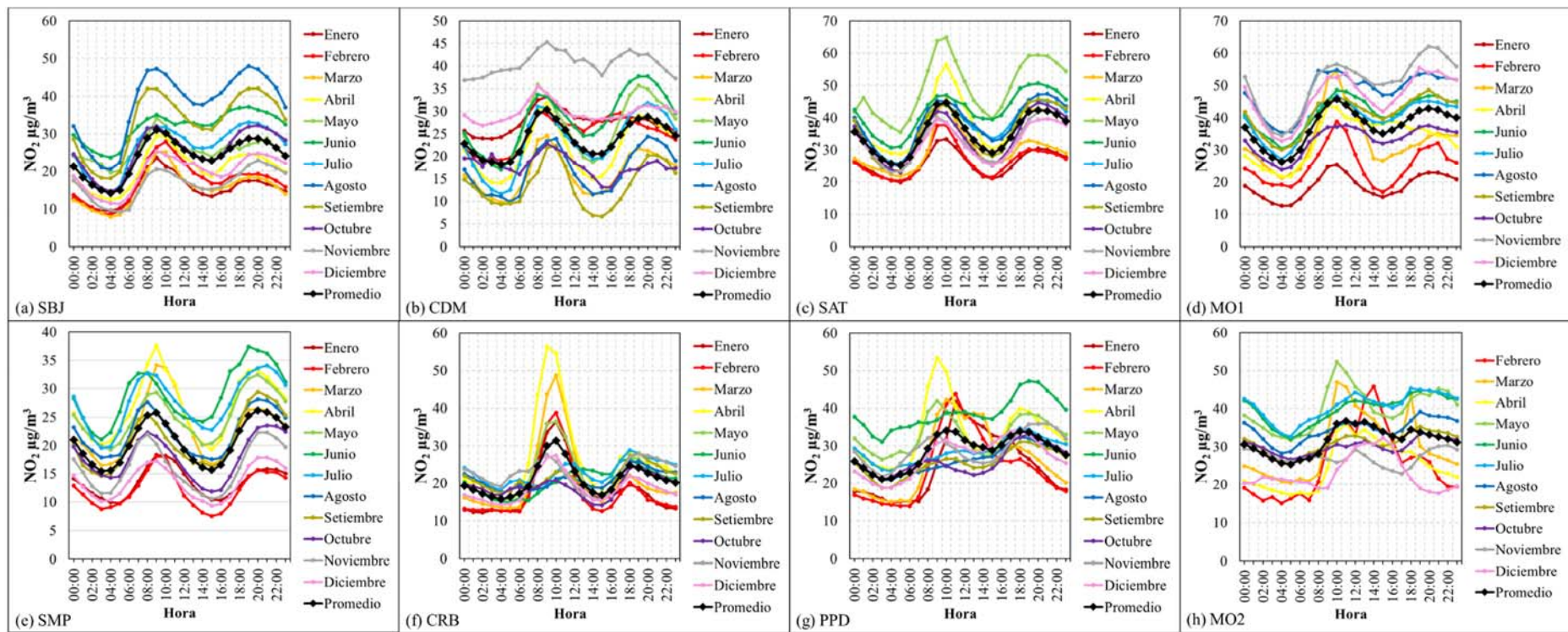


Figura 33: Variación horaria mensual del NO₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Por otra parte, el primer valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 03:00 a.m. y 05:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 14,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 26,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y entre los 15,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte; mientras que, el segundo valor mínimo se presentó, en promedio, entre la 01:00 p.m. y 04:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 20,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 35,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y entre los 15,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 31,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte. Ambos valores mínimos se relacionan con periodos del día en los que ocurre una disminución en la emisión de gases a partir de fuentes móviles (i.e. un menor flujo de tráfico vehicular), la disipación del NO_2 por acción del viento y el consumo de este gas como precursor para la generación natural de O_3 .

Cabe resaltar que, el comportamiento horario del NO_2 presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO_2 realizados en diferentes ciudades (Adyani *et al.*, 2009; Alghamdi *et al.*, 2019; Castellano *et al.*, 2009; Cichowicz & Stelegowski, 2019; Jang *et al.*, 2017; Kassem, 2014; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Milena *et al.*, 2014; Mohamad & Mohamed, 2017; Morena, 2006; Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012; Shilenje & Ongoma, 2014; Szep, Matyas, Keresztes & Ghimpusan, 2016; W. Wang *et al.*, 2016; X. Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2018). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles horarios de tráfico vehicular.

Asimismo, se presentaron comportamientos inusuales para ciertos meses y estaciones, como son los casos de los valores registrados en noviembre en la estación CDM, los valores registrados en febrero en la estación MO2, los valores máximos matutinos presentados entre los meses de marzo y abril en la estación CRB y los valores registrados entre los meses de enero y abril en la estación PPD. En general, se espera que la ocurrencia de todos estos eventos se deba al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular que se presenta de manera desigual en diferentes puntos de la ciudad. Además, la estación MO2 posee una gran cantidad de datos registrados los cuales fueron descartados debido a que no son representativos del comportamiento promedio para esta estación. Finalmente, se espera que las estaciones SBJ y SAT sean representativas para la zona centro de Lima

Metropolitana y la estación SMP sea representativa para la zona norte debido a presentar un comportamiento horario relativamente más homogéneo durante todo el año.

En cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por hora de NO₂, en la Figura 34 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que hay una diferencia significativa entre los valores de NO₂ registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas. Esto brinda una idea de que la variación espacial entre las estaciones de una misma zona (i.e. norte o centro) es significativa, aunque dicho análisis no entra en el alcance del presente estudio. Sin embargo, se observa que el comportamiento bimodal se presentó en todos los años para las ocho (08) estaciones evaluadas.

Finalmente, con respecto a los niveles de NO₂ registrados frente al ENCA horario para este contaminante y al valor guía propuesto por la OMS, ambos de 200 µg/m³, ningún valor promedio presentado previamente superó dichos límites. Aún más, a pesar de que los valores de NO₂ registrados en las estaciones de la zona centro presentaron una tendencia a ser más elevados que en la zona norte, todos los valores promedio presentados poseyeron un INCA menor a 50 (i.e. concentraciones por debajo de los 100 µg/m³), lo cual hace referencia a que la calidad de aire en cuanto a niveles de NO₂, tanto para la zona centro como para la norte, fue buena durante todo el día todo el año.

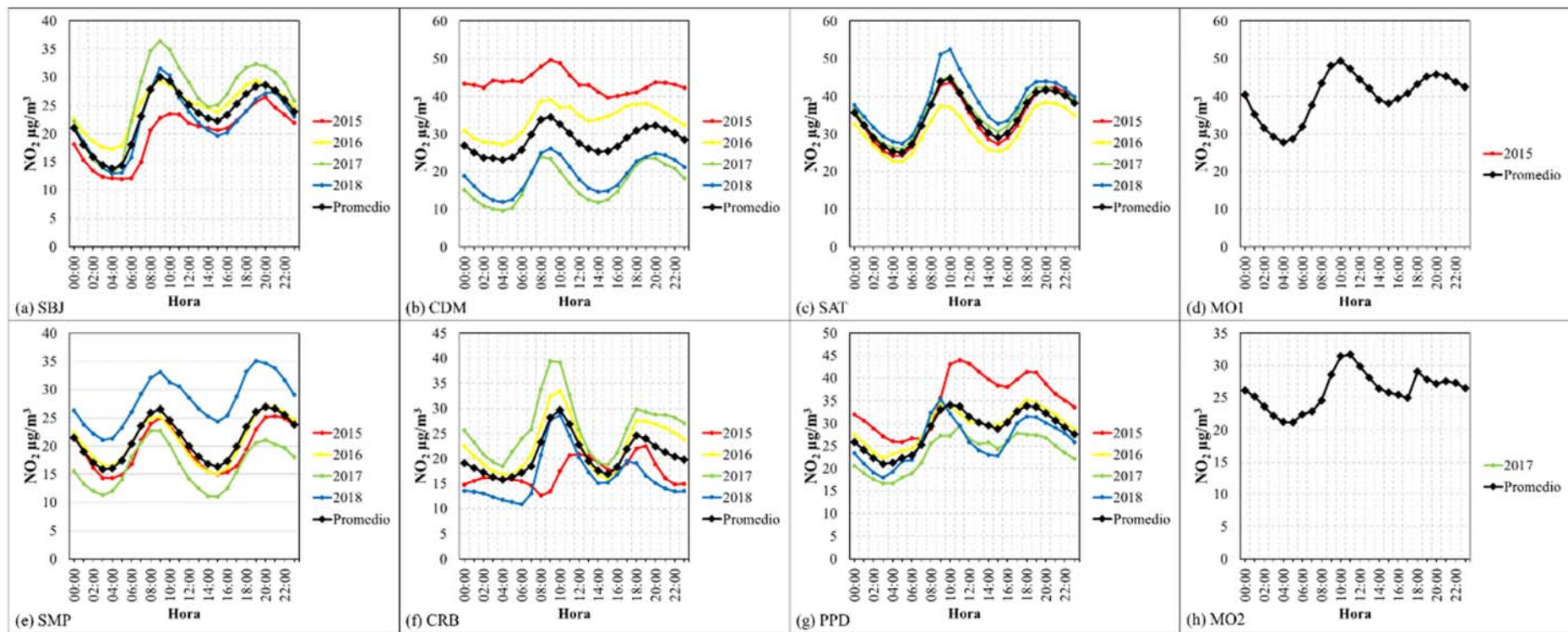


Figura 34: Variación horaria anual del NO₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

b. Análisis horario del O₃.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis horario de las concentraciones de O₃ registradas en las estaciones SBJ, CDM, SMP, CRB y PPD. En la Figura 35 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por hora de O₃ para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

Se ha observado que, si bien en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer un comportamiento horario bimodal, este fue más pronunciado en las estaciones SBJ, CDM y SMP donde el primer valor máximo fue significativamente mayor que el presentado en las estaciones CRB y PPD. Esta diferencia entre los niveles del primer valor máximo se ha podido observar en otros estudios (Awang, Ramli, Yahaya & Elbayoumi, 2015; Steinberger & Ganor, 1980) donde mencionan que el aumento significativo de los niveles de O₃ durante la noche es el resultado de una compleja interacción entre las emisiones de NO_x, el transporte horizontal del O₃ a partir de otras localidades cercanas, el descenso de ozono troposférico y la reinyección de O₃ atrapado en capas elevadas de la troposfera debido al descenso de la base de la capa de inversión térmica durante la noche. Además, a pesar de la diferencia en magnitudes, la ocurrencia de los cuatro valores extremos mencionados previamente se desarrolló en rangos de horas similares para todas las estaciones.

Para el caso de los valores máximos, el primero se presentó, en promedio, entre las 02:00 a.m. y 04:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 16,47 µg/m³ y 17,37 µg/m³ en la zona centro y entre los 4,98 µg/m³ y 17,05 µg/m³ en la zona norte; mientras que, el segundo se presentó, en promedio, entre las 11:00 a.m. y 02:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 25,72 µg/m³ y 30,42 µg/m³ en la zona centro y entre los 36,13 µg/m³ y 50,86 µg/m³ en la zona norte. Además, el segundo valor máximo, el más pronunciado, se relaciona con las reacciones fotoquímicas que se desarrollan principalmente durante las horas de máxima radiación solar (i.e. mediodía) en las cuales la radiación solar junto con los NO_x, COV y el CO generan O₃ a niveles troposféricos. En cuanto al primer valor máximo, el menos pronunciado, este depende de

las condiciones mencionadas previamente en esta sección sobre la reinyección de O₃ a partir de otras ubicaciones.

Por otra parte, el primer valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 04:00 a.m. y 08:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 8,01 µg/m³ y 8,59 µg/m³ en la zona centro y entre los 4,29 µg/m³ y 10,83 µg/m³ en la zona norte; mientras que, el segundo valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 07:00 p.m. y 02:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 6,59 µg/m³ y 7,38 µg/m³ en la zona centro y entre los 3,1 µg/m³ y 9,54 µg/m³ en la zona norte. Ambos valores mínimos se relacionan con la disminución en la generación de O₃ debido a la ausencia de una fuente significativa de radiación solar y a la dispersión del O₃ por acción del viento.

Cabe resaltar que, el comportamiento horario del O₃ presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre O₃ realizados en diferentes ciudades (Adyani *et al.*, 2009; Bell *et al.*, 2013; Gasmi *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2017; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Morena, 2006; Roberts *et al.*, 2012; Vilorio, 2008). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles horarios de radiación solar y por el transporte de O₃ a partir de otras capas de la atmósfera o ubicaciones cercanas. Aún más, mientras que en la zona centro los valores de NO_x fueron, en promedio, superiores a los de la zona norte, pasa la situación contraria con el O₃ lo cual refleja una relación negativa entre dichos contaminantes en cuanto a sus magnitudes horarias.

Asimismo, no se presentaron comportamientos inusuales, salvo por los valores máximos presentados entre noviembre y junio en las estaciones SBJ, CDM y SMP, los cuales fueron explicados previamente. Sin embargo, cabe mencionar que tanto la estación SBJ como CDM pertenecen a la zona centro de Lima Metropolitana; mientras que, la estación SMP pertenece a la zona norte, aunque en una ubicación próxima a la zona centro. Se espera que, debido a esto, la estación SMP comparta este comportamiento de un primer valor máximo pronunciado con las estaciones SBJ y CDM, los cuales pueden llegar a pasar los 25 µg/m³, pero, al mismo tiempo, comparte los elevados niveles de los segundos valores

máximos presentados en las estaciones CRB y PPD (i.e. estaciones más al norte) los cuales pueden llegar a superar los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por hora de O_3 , en la Figura 36 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que la diferencia entre los valores de O_3 registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no es tan significativa como en el caso del NO_2 . Sin embargo, se mantiene la tendencia en la cual las estaciones ubicadas en la zona norte presentan valores superiores a los presentados en las de la zona centro, teniendo a la estación SMP en un punto intermedio. Esto brinda una idea de que la variación espacial entre las estaciones de una misma zona (i.e. norte o centro) no es tan significativa comparada con la variación entre zonas, aunque dicho análisis no entra en el alcance del presente estudio. Además, también se presentó el comportamiento bimodal bien definido para las estaciones SBJ y CDM, poco definido para las estaciones CRB y PPD y en un punto intermedio en la estación SMP.

Finalmente, con respecto a los niveles de O_3 registrados frente al ENCA horario para este contaminante y al valor guía propuesto por la OMS, ambos de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ningún valor promedio presentado previamente superó dichos límites. Aún más, todos los valores promedio presentados para la zona centro y la gran mayoría de los presentados en la zona norte poseyeron un INCA menor a 50 (i.e. concentraciones por debajo de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo cual hace referencia a que la calidad de aire en cuanto a niveles de O_3 , tanto para la zona centro como para la norte, fue buena durante la mayor parte del día y del año. Sin embargo, la zona norte puede llegar a poseer un INCA superior a 50 en los momentos que se presentan los valores máximos del mediodía, caracterizando dichos momentos como de calidad de aire intermedia en cuanto a niveles de O_3 .

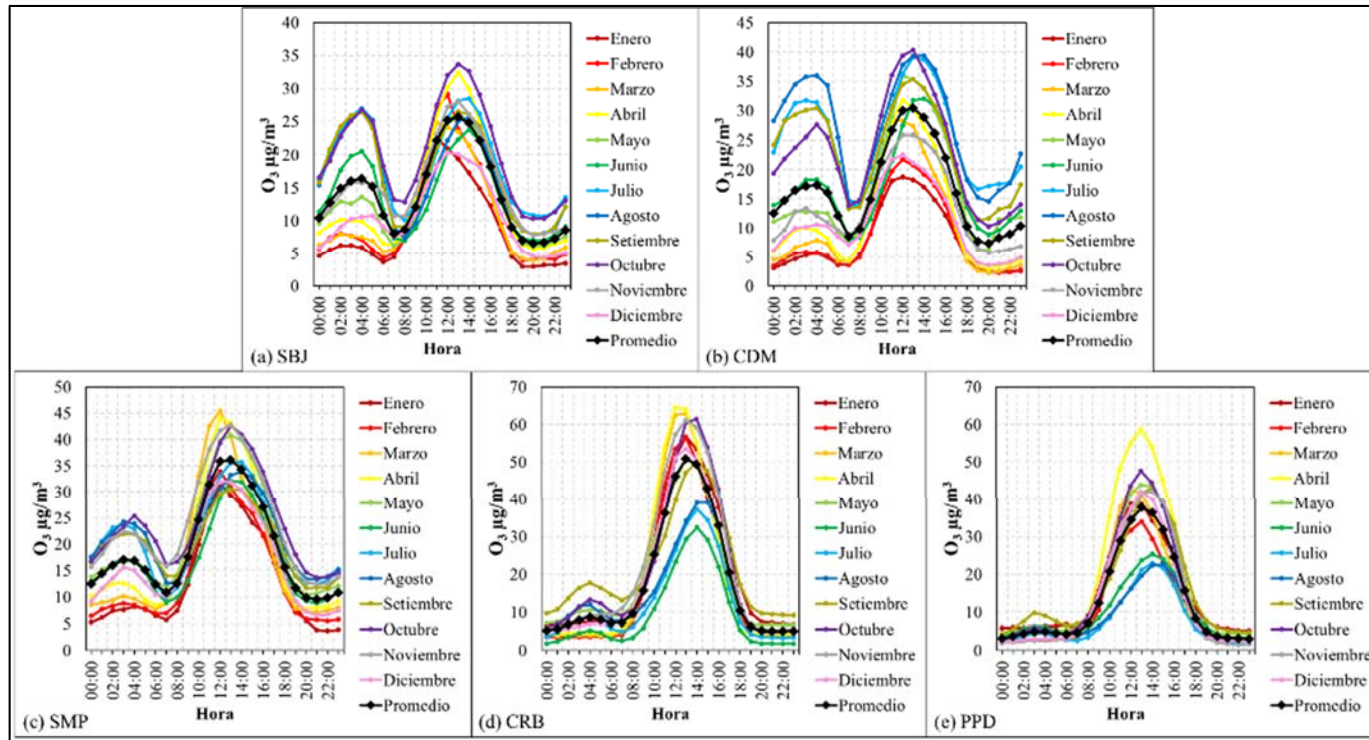


Figura 35: Variación horaria mensual del O₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

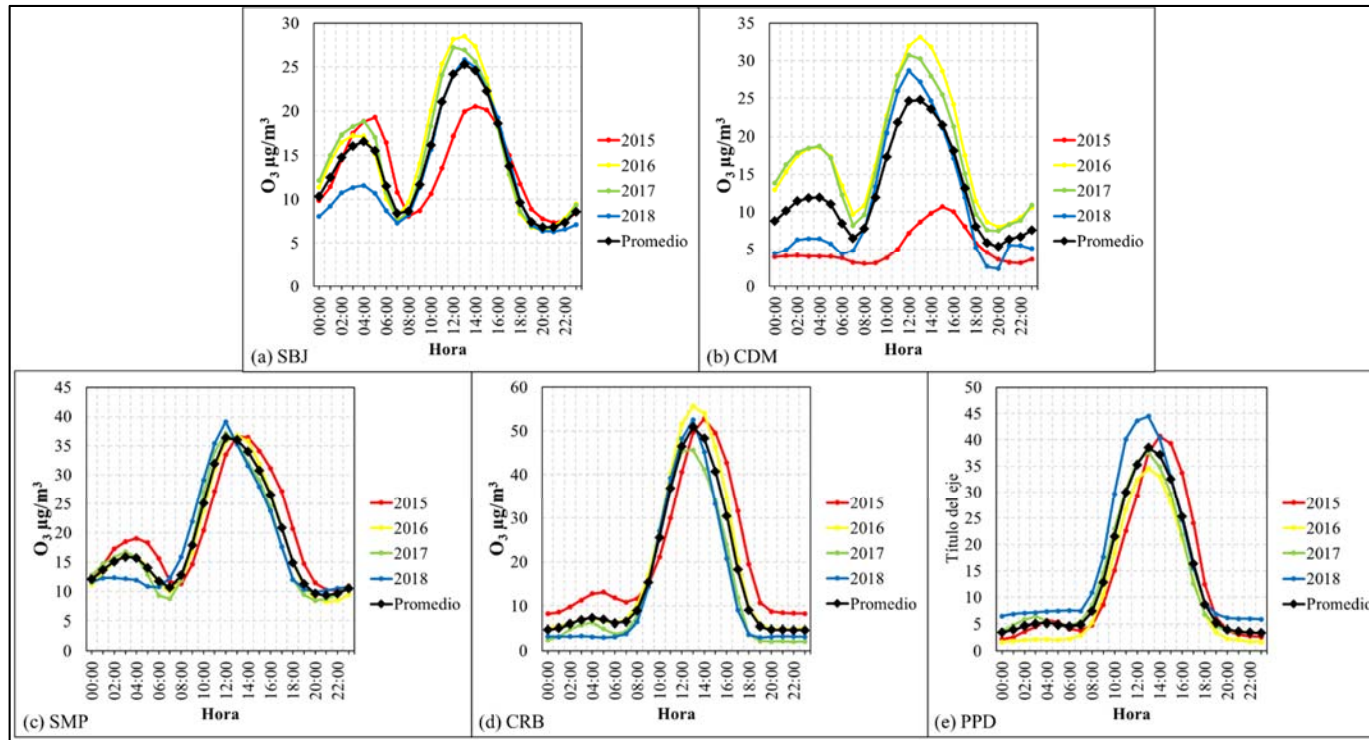


Figura 36: Variación horaria anual del O₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

c. Análisis horario del NO.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis horario de las concentraciones de NO registradas en las estaciones SAT, MO1 y MO2. En la Figura 37 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por hora de NO para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

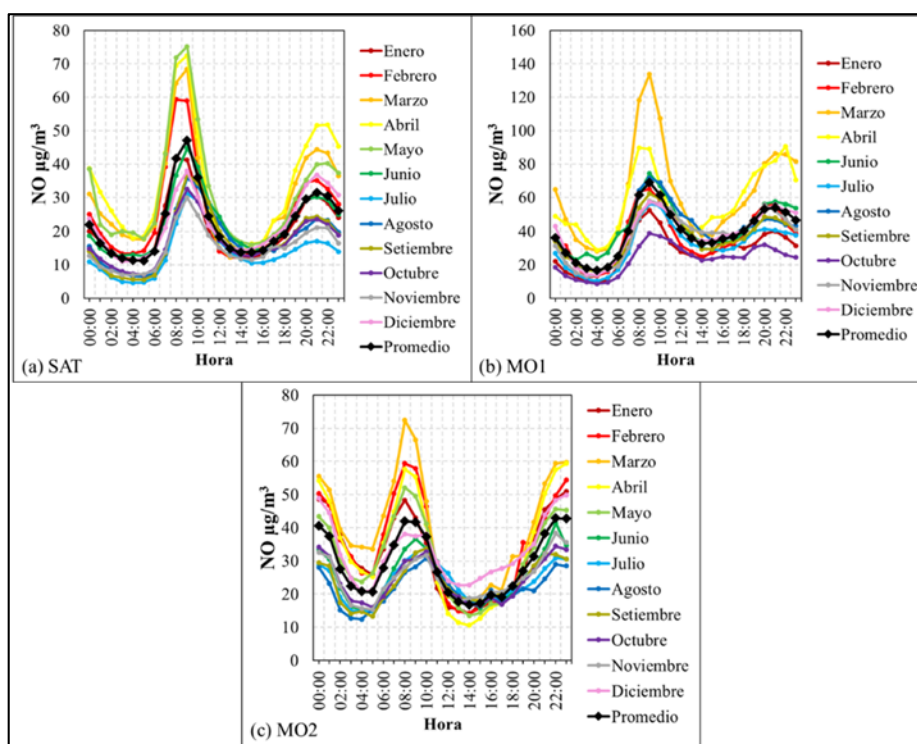


Figura 37: Variación horaria mensual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Se ha observado que, en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer un comportamiento horario bimodal. Además, la ocurrencia de estos cuatro valores extremos se desarrolló en rangos de horas similares para todas las estaciones.

Para el caso de los valores máximos, el primero se presentó, en promedio, entre las 08:00 a.m. y 10:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los $47,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $69,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y alrededor de los $41,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte; mientras

que, el segundo se presentó, en promedio, entre las 08:00 p.m. y 11:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los $31,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $54,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y alrededor de los $42,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte. Estos valores máximos, al igual que los del NO_2 , se relacionan con los dos periodos de máxima congestión vehicular que se presentan en Lima Metropolitana entre las 06:00 a.m. y 10:00 a.m. (máxima congestión vehicular matutina) y entre las 05:00 p.m. y 09:00 p.m. (máxima congestión vehicular vespertina) (MML, 2019). Sin embargo, el primer valor máximo del NO ocurrió previo al primer valor máximo del NO_2 , lo cual se invirtió para los segundos valores máximos donde el del NO_2 ocurrió previo al del NO. Este fenómeno se debió al comportamiento de contaminante primario que tiene el NO y al de contaminante secundario que tiene el NO_2 , por lo que, mientras en la mañana el NO_2 es el último gas que termina de formarse debido al consumo del NO, durante la noche el NO es el último gas que termina de formarse debido a la falta de O_3 (i.e. debido a la falta de reacción entre el NO y el O_3) (Gasmi *et al.*, 2017).

Por otra parte, el primer valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 02:00 a.m. y 05:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los $11,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y alrededor de los $20,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte; mientras que, el segundo valor mínimo se presentó, en promedio, entre la 01:00 p.m. y 05:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los $13,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $32,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y alrededor de los $16,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte. Ambos valores mínimos se relacionan con periodos del día en los que ocurre una disminución en la emisión de gases a partir de fuentes móviles (i.e. un menor flujo de tráfico vehicular) y la disipación del NO por acción del viento.

Cabe resaltar que, el comportamiento horario del NO presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO realizados en diferentes ciudades (Alghamdi *et al.*, 2019; Gasmi *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2017; Milena *et al.*, 2014; Morena, 2006; Roberts *et al.*, 2012). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles horarios de tráfico vehicular y las reacciones atmosféricas de generación/destrucción de NO, NO_2 y O_3 .

Asimismo, no se presentaron comportamientos inusuales, salvo por los valores máximos presentados entre marzo y abril en la estación MO1. Sin embargo, se espera que la ocurrencia de estos eventos se deba al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular que se presenta de manera desigual en diferentes puntos de la ciudad.

En cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por hora de NO, en la Figura 38 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que la diferencia entre los valores de NO registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no es tan significativa como en el caso del NO₂. Sin embargo, se aprecia que los segundos picos máximos son similares en magnitud a los primeros para la zona norte; mientras que son menores para la zona centro. Se espera que este comportamiento se relacione a las características locales del tráfico vehicular para la zona norte, dado que esta diferencia entre los comportamientos multianuales también se ha podido observar para el NO₂, aunque en menor medida.

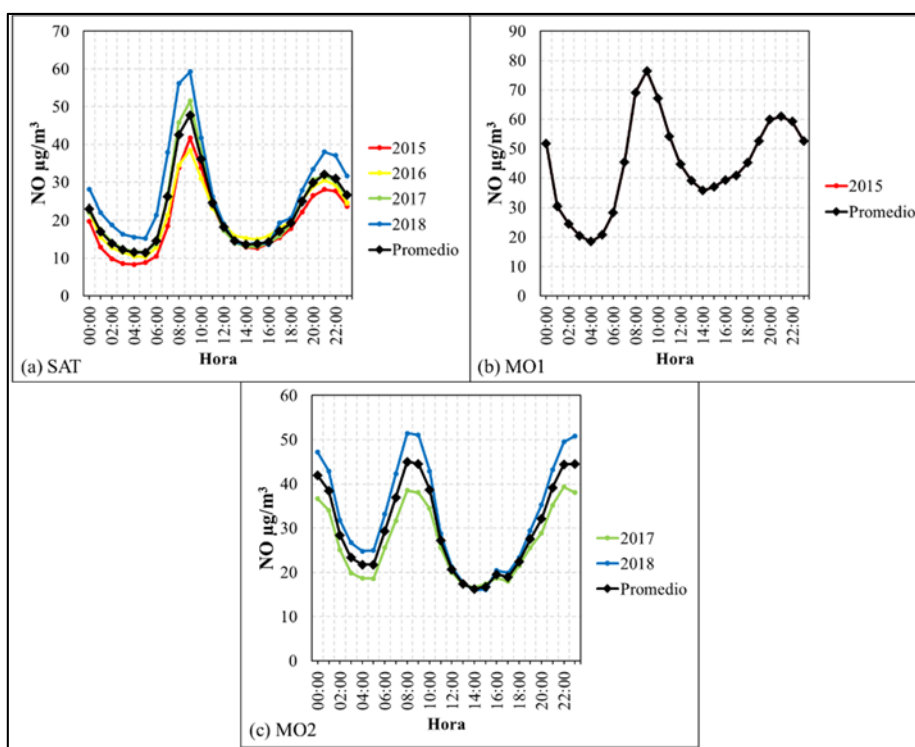


Figura 38: Variación horaria anual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Finalmente, con respecto a los niveles de NO registrados frente al ENCA horario para NO₂ y al valor guía para NO₂ propuesto por la OMS, ambos de 200 µg/m³ (valores usados referencialmente debido a la falta de estándares para NO), ningún valor promedio presentado previamente superó dichos límites. Aún más, todos los valores promedio presentados para la zona norte y la mayoría de valores promedios presentados para la zona centro poseyeron un INCA referencial menor a 50 (i.e. concentraciones por debajo de los 100 µg/m³, valor usado de manera referencial por falta de un ENCA para NO), lo cual hace referencia a que la calidad de aire en cuanto a niveles de NO, tanto para la zona centro como para la norte, fue buena durante la mayor parte del día y del año. Sin embargo, la zona centro puede llegar a poseer un INCA superior a 50 en los momentos que se presentan los primeros valores máximos, caracterizando dichos momentos como de calidad de aire intermedia en cuanto a niveles de NO.

d. Análisis horario del NO_x.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis horario de las concentraciones de NO_x registradas en las estaciones SAT, MO1 y MO2. En la Figura 39 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por hora de NO_x para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

Se ha observado que, consecuentemente con el comportamiento horario del NO₂ y NO, en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer un comportamiento horario bimodal. Además, la ocurrencia de estos cuatro valores extremos se desarrolló en rangos de horas similares para todas las estaciones.

Para el caso de los valores máximos, el primero se presentó, en promedio, entre las 09:00 a.m. y 12:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 91,23 µg/m³ y 113,51 µg/m³ en la zona centro y alrededor de los 73,58 µg/m³ en la zona norte; mientras que, el segundo se presentó, en promedio, entre las 08:00 p.m. y 11:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 73,69 µg/m³ y 96,68 µg/m³ en la zona centro y alrededor de los 74,54 µg/m³ en la zona norte. Estos valores máximos, al igual que

los del NO₂ y el NO, se relacionan con los dos periodos de máxima congestión vehicular que se presentan en Lima Metropolitana entre las 06:00 a.m. y 10:00 a.m. (máxima congestión vehicular matutina) y entre las 05:00 p.m. y 09:00 p.m. (máxima congestión vehicular vespertina) (MML, 2019). Sin embargo, la influencia del efecto conjunto entre la generación/destrucción del NO₂ y del NO ocasiona que los rangos en que aparezcan los picos sean más extensos que para los otros dos contaminantes.

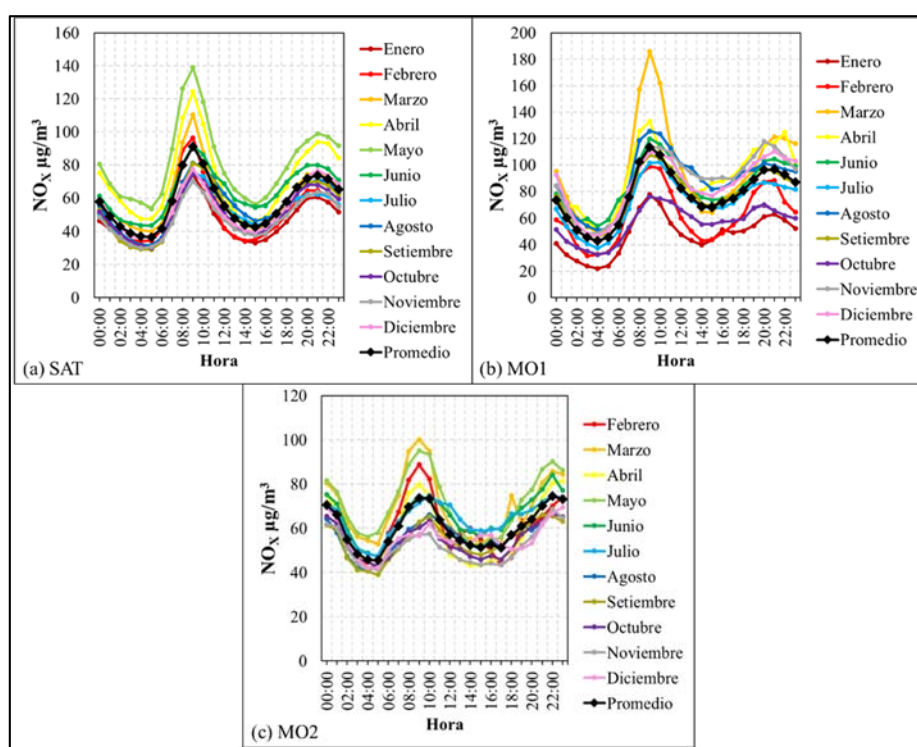


Figura 39: Variación horaria mensual del NO_x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Por otra parte, el primer valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 03:00 a.m. y 05:00 a.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 36,69 µg/m³ y 42,81 µg/m³ en la zona centro y alrededor de los 45,58 µg/m³ en la zona norte; mientras que, el segundo valor mínimo se presentó, en promedio, entre las 12:00 p.m. y 05:00 p.m. con concentraciones promedio que variaron entre los 42,85 µg/m³ y 68,35 µg/m³ en la zona centro y alrededor de los 51,27 µg/m³ en la zona norte. Ambos valores mínimos se relacionan con periodos del día en los que ocurre una disminución en la emisión de gases a partir de fuentes móviles (i.e. un menor flujo de tráfico vehicular), la disipación del NO₂ y

el NO por acción del viento y el consumo del NO₂ como precursor para la generación natural de O₃.

Cabe resaltar que, el comportamiento horario del NO_x presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO_x realizados en diferentes ciudades (Castellano *et al.*, 2009; Cichowicz & Stelegowski, 2019; Clapp & Jenkin, 2001; Gasmi *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2017; Milena *et al.*, 2014; Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012; Szep *et al.*, 2016). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles horarios de tráfico vehicular y las reacciones atmosféricas de generación/destrucción de NO, NO₂ y O₃.

Asimismo, no se presentaron comportamientos inusuales en ninguna de las estaciones evaluadas, salvo por la ausencia de registros en la estación MO1 para los meses de mayo y los valores máximos en marzo para la estación MO1 (lo cual ya fue explicado previamente). Además, si bien la información de NO_x fue generada a partir de la suma de los registros puntuales de NO y NO₂ para una misma estación, algunos valores promedio de NO_x son menores que la suma del promedio de NO₂ y NO para ciertos meses y años. Esto último es debido a que no se tomó en cuenta los periodos en que únicamente se registró NO o, en su defecto, NO₂, por lo que podría estar ocurriendo una subestimación en los valores de NO_x al estar dejando periodos de gran cantidad de emisión de NO_x.

En cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por hora de NO_x, en la Figura 40 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, y similar que en el caso del NO, se ha podido observar que la diferencia entre los valores de NO_x registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no fue tan significativa como en el caso del NO₂. Sin embargo, se aprecia que los segundos picos máximos fueron similares en magnitud a los primeros para la zona norte; mientras que fueron menores para la zona centro. Se espera que este comportamiento se relacione a las características locales del tráfico vehicular para la zona norte, dado que esta diferencia entre los comportamientos multianuales también se ha podido observar para el NO₂, aunque en menor medida.

Finalmente, con respecto a los niveles de NO_x registrados frente al ENCA horario para NO₂ y al valor guía para NO₂ propuesto por la OMS, ambos de 200 µg/m³ (valores usados referencialmente debido a la falta de estándares para NO_x), ningún valor promedio presentado previamente superó dichos límites. Aún más, la mayoría de los valores promedio presentados para las zonas norte y centro poseyeron un INCA referencial menor a 50 (i.e. concentraciones por debajo de los 100 µg/m³, valor usado de manera referencial por falta de un ENCA para NO), lo cual hace referencia a que la calidad de aire en cuanto a niveles de NO, tanto para la zona centro como para la norte, fue buena durante la mayor parte del día y del año. Sin embargo, ambas zonas pueden llegar a presentar valores máximos que superen al INCA de 50, caracterizando dichos momentos como de calidad de aire intermedia en cuanto a niveles de NO_x.

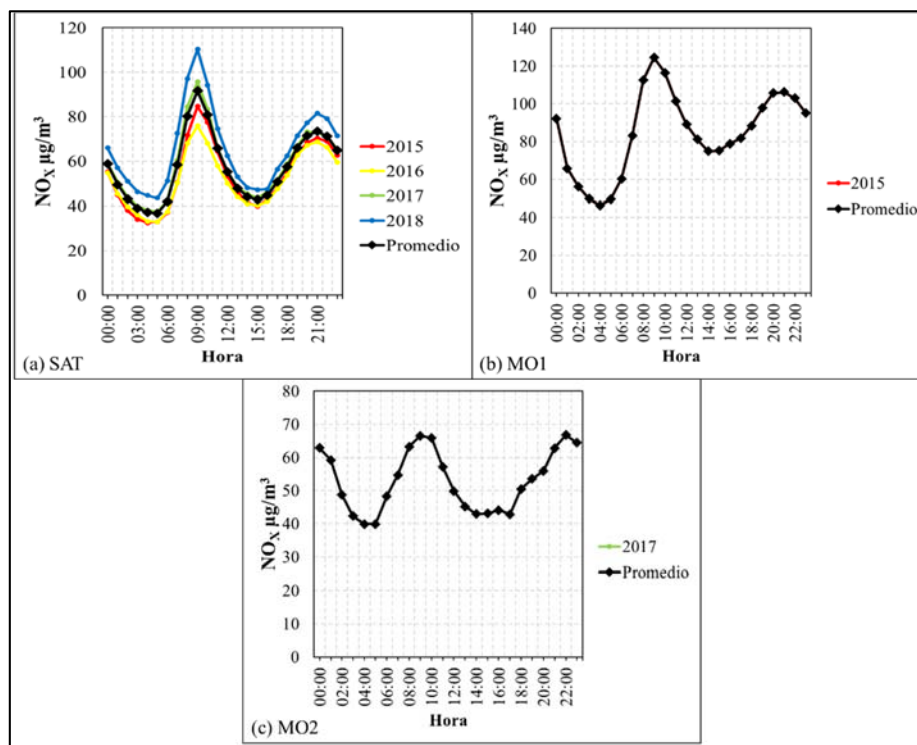


Figura 40: Variación horaria anual del NO_x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

4.1.2 Análisis de la variación diaria del NO, NO₂, NO_x y O₃.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis diario de las concentraciones de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por parámetro comparando los resultados obtenidos en cada estación donde se registra el contaminante evaluado.

a. Análisis diario del NO₂.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis diario de las concentraciones de NO₂ registradas en las estaciones SBJ, CDM, SAT, MO1, SMP, CRB, PPD y MO2. En la Figura 41 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por día de NO₂ para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

Se ha observado que, en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer niveles de NO₂ casi constantes entre los días martes y sábados, a excepción de la estación MO2 donde los niveles de NO₂ son constantes durante toda la semana. Dichas concentraciones se encontraron en promedio en el rango de 24,62 µg/m³ y 38,32 µg/m³ en la zona centro y 21,46 µg/m³ y 30,91 µg/m³ en la zona norte, y, posteriormente, disminuyeron en aproximadamente 3 µg/m³ a 5 µg/m³ durante los domingos. Se espera que este comportamiento esté relacionado con los niveles de tráfico vehicular diarios, los cuales disminuyen significativamente durante los fines de semana de acuerdo con lo señalado en la Figura 42 (El Comercio, 2019).

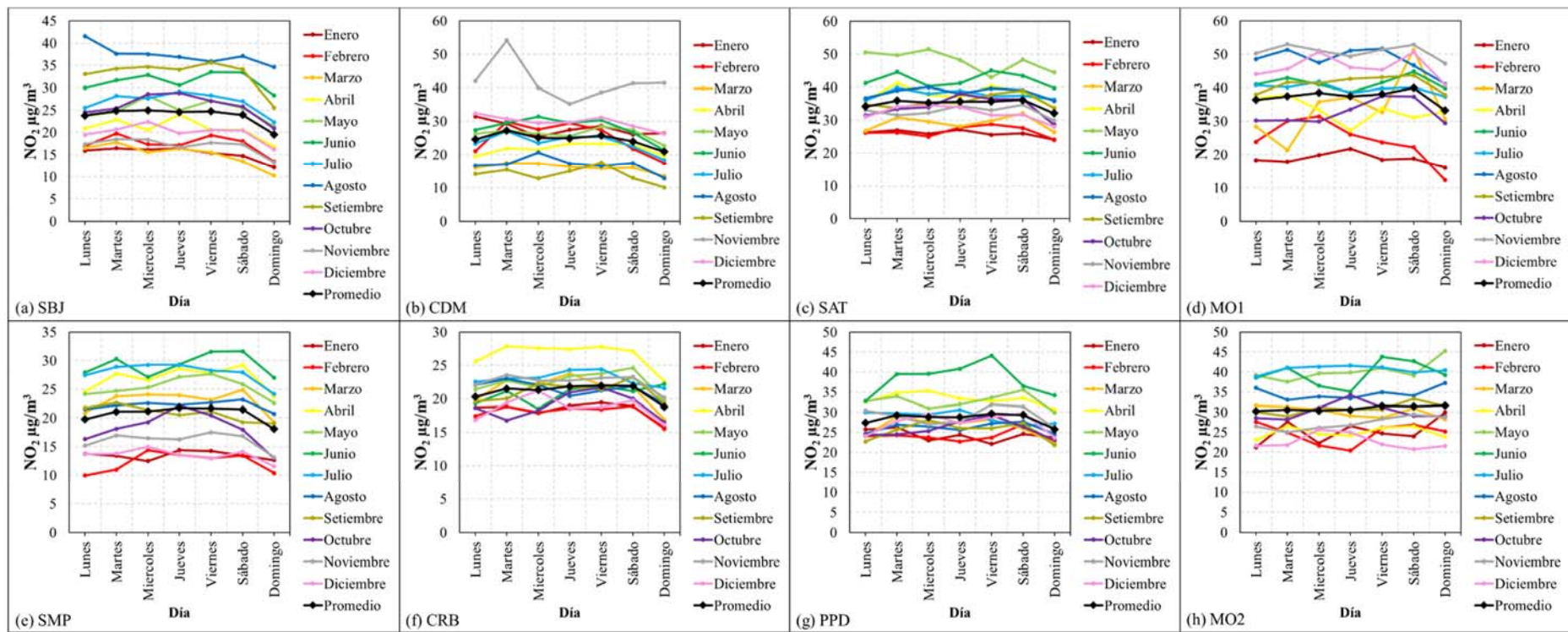


Figura 41: Variación diaria mensual del NO₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

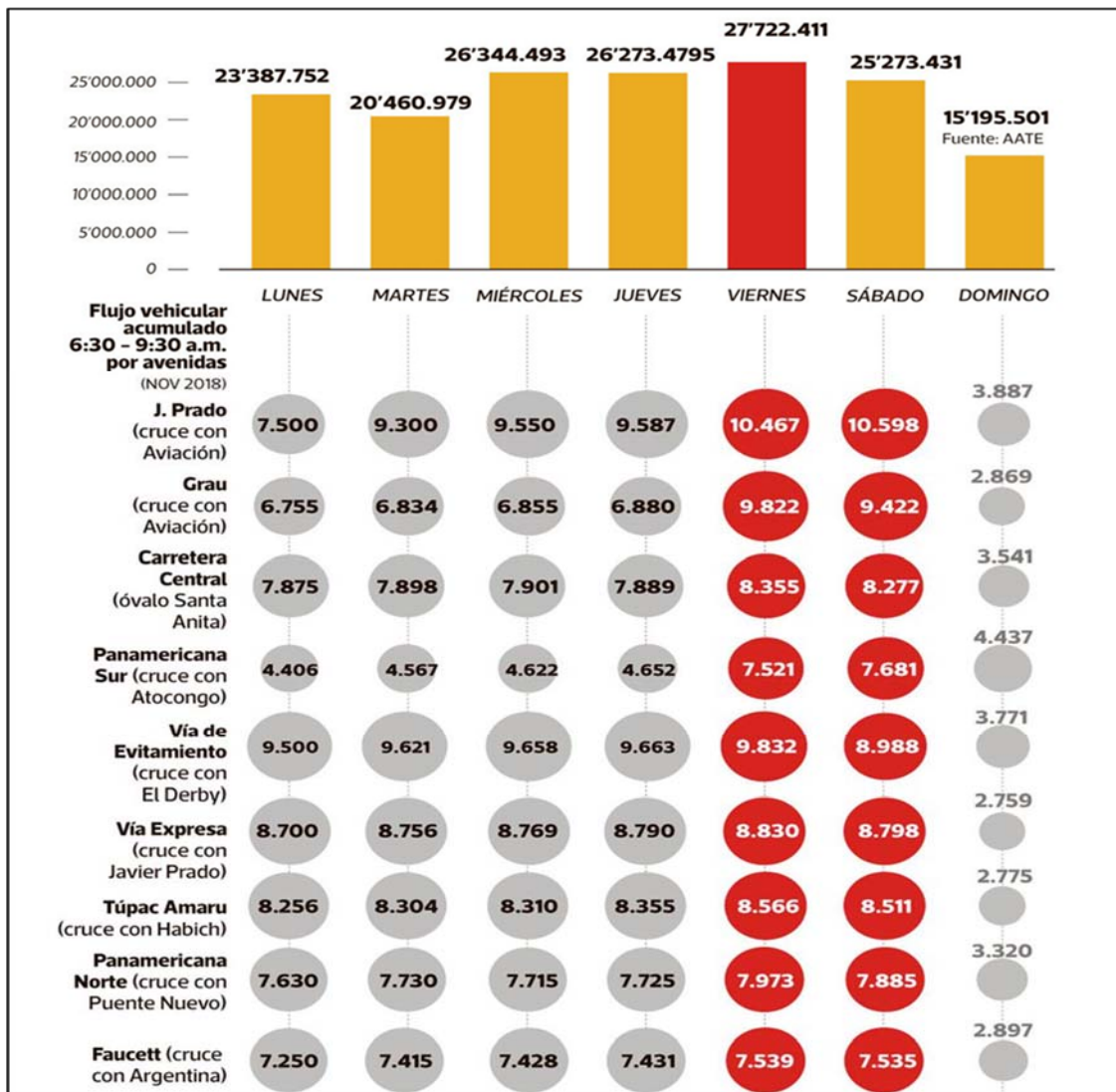


Figura 42: Desplazamientos por día en Lima y Callao para mayo del 2017.

FUENTE: El día de la semana con más tráfico vehicular en Lima (El Comercio, 2019)

Cabe resaltar que, el comportamiento diario del NO₂ presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO₂ realizados en diferentes ciudades (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles diarios de tráfico vehicular.

Asimismo, con respecto a los niveles diarios constantes de NO₂ en la estación MO₂, se espera que la ocurrencia de este evento se deba al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular que se presenta de manera desigual en diferentes puntos de la ciudad. Además, se

puede observar que los valores elevados de NO₂ registrados en noviembre en la estación CDM, en abril en la estación CRB y en junio en la estación PPD se relacionan con el comportamiento horario analizado previamente, donde a estos valores se les consideró parte de un evento puntual de una significativa generación de NO₂ y no como parte de los niveles promedio de las estaciones.

Finalmente, en cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por día de NO₂, en la Figura 43 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que hubo una diferencia significativa entre los valores de NO₂ registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas. Esto, junto con lo visto para el comportamiento horario, brinda una idea de que la variación espacial entre las estaciones de una misma zona (i.e. norte o centro) es significativa, aunque dicho análisis no entra en el alcance del presente estudio. Sin embargo, se observa que en todas las estaciones se mantiene la tendencia a disminuir sus niveles de NO₂ los días domingos y lunes.

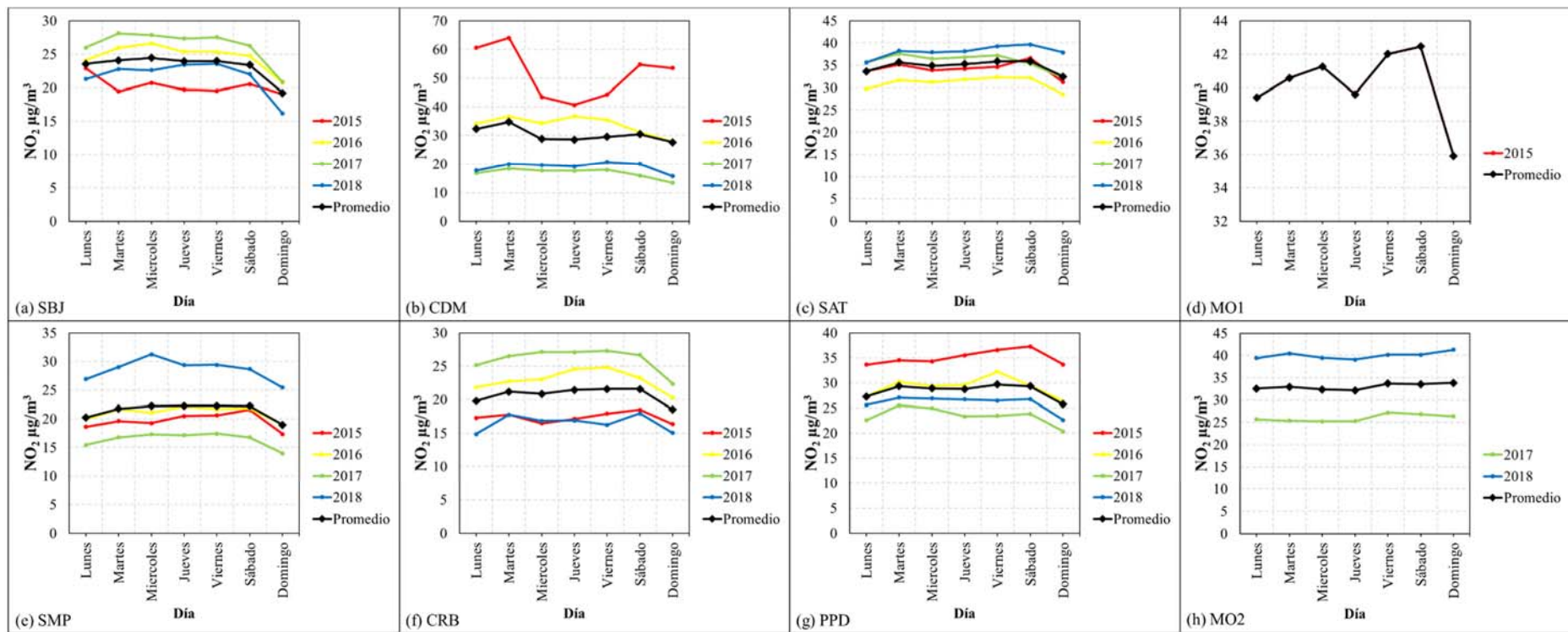


Figura 43: Variación diaria anual del NO₂ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

b. Análisis diario del O₃.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis diario de las concentraciones de O₃ registradas en las estaciones SBJ, CDM, SMP, CRB y PPD. En la Figura 44 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por día de O₃ para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

Se ha observado que, en todas las estaciones, los días domingo presentaron niveles significativamente mayores de O₃ (aumentos de entre 1 µg/m³ a 4 µg/m³) comparado con el resto de días cuyas concentraciones fueron casi constantes durante toda la semana estando en la magnitud de entre los 13,66 µg/m³ y 15,77 µg/m³ en la zona centro y 12,94 µg/m³ y 18,55 µg/m³ en la zona norte. Esta tendencia se debe al denominado “efecto fin de semana del O₃”, en el cual los menores niveles de NO_x, debido a la disminución de tráfico vehicular durante el fin de semana (Figura 42), disminuyen la formación de HNO₃ a partir de la reacción entre los NO_x y los radicales OH. De esta manera, la disponibilidad de radicales OH permite una mayor formación de O₃. En este sentido, a pesar de que los NO_x forman parte de los precursores para la generación del O₃, su exceso ocasiona la disminución de los niveles de este gas (Roberts *et al.*, 2012).

Cabe resaltar que, el comportamiento diario del O₃ presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre O₃ realizados en diferentes ciudades (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles diarios de NO_x.

Finalmente, en cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por día de O₃, en la Figura 45 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que la diferencia entre los valores de O₃ registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no fue tan significativa como en el caso del NO₂, salvo para el caso de la estación CDM donde se presentó una mayor variabilidad. Además, se mantuvo el efecto fin de semana del O₃ para todas las estaciones.

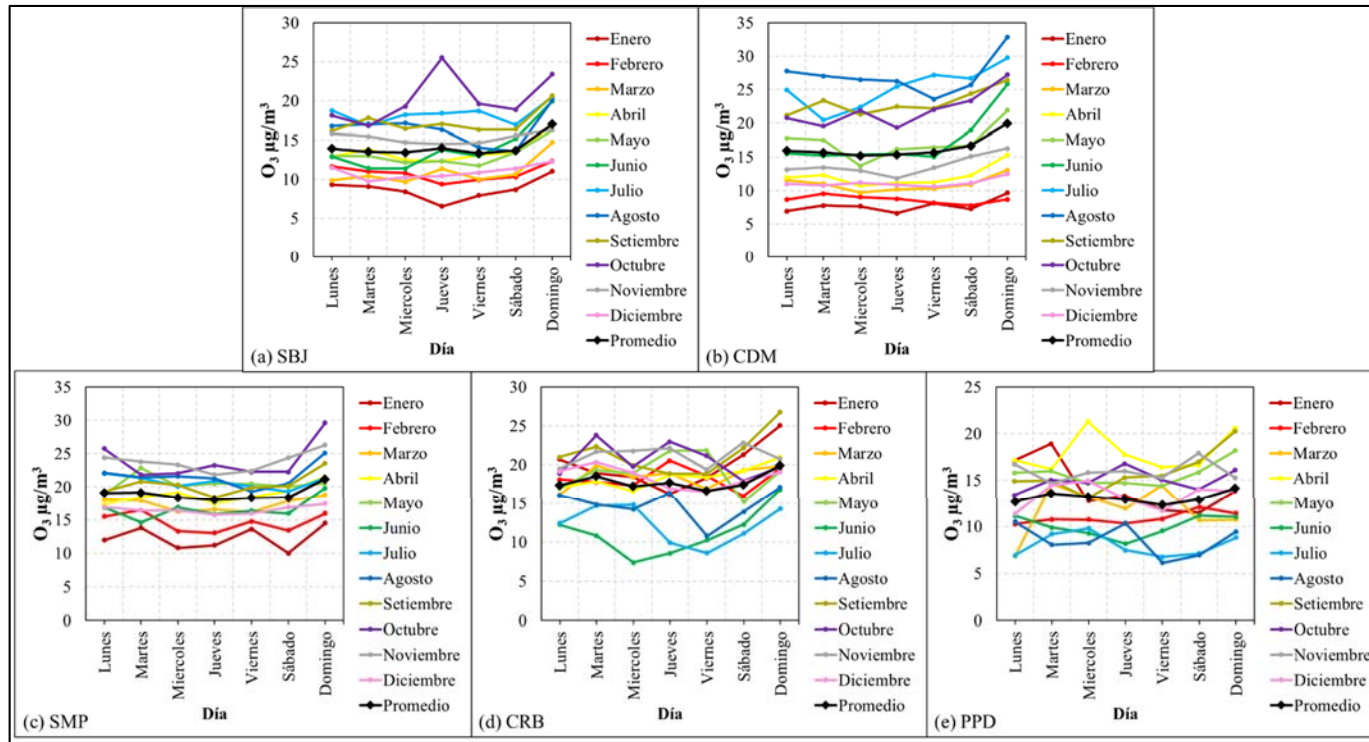


Figura 44: Variación diaria mensual del O₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

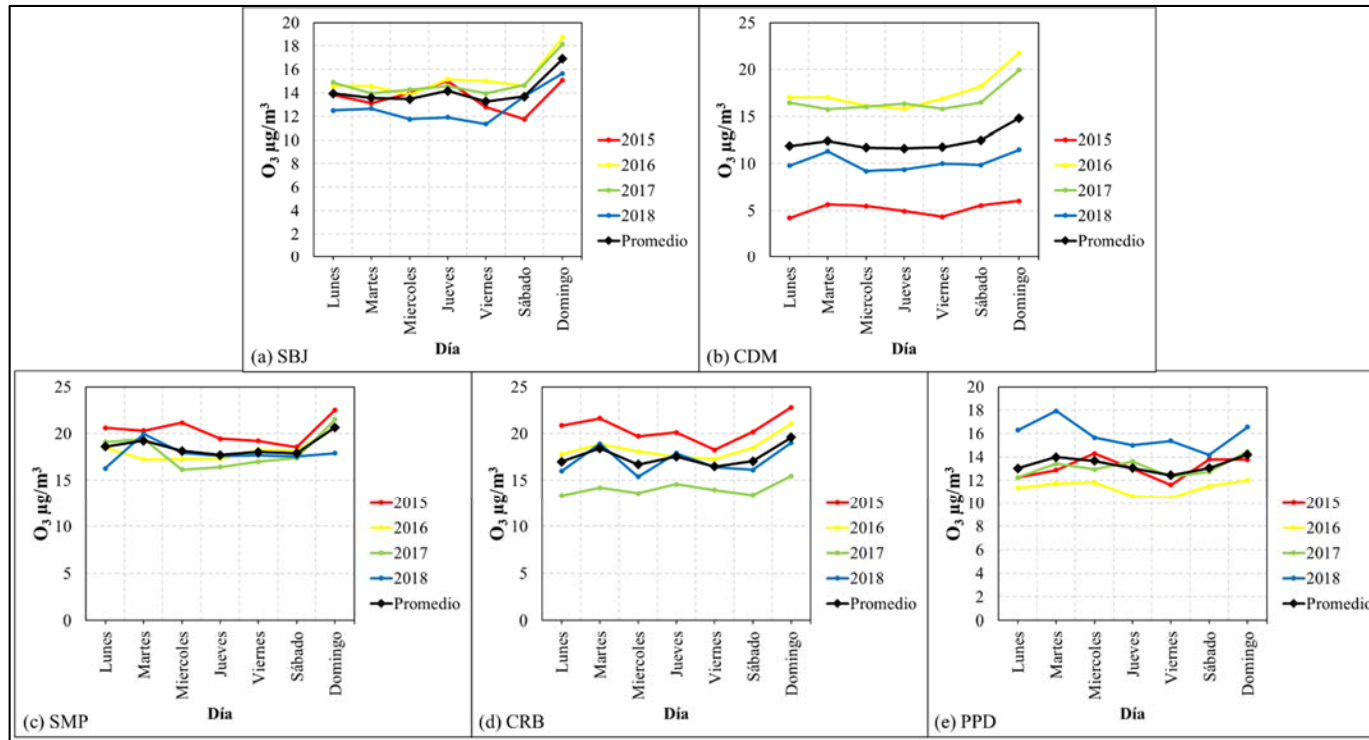


Figura 45: Variación diaria anual del O₃ para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

c. Análisis diario del NO.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis diario de las concentraciones de NO registradas en las estaciones SAT, MO1 y MO2. En la Figura 46 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por día de NO para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

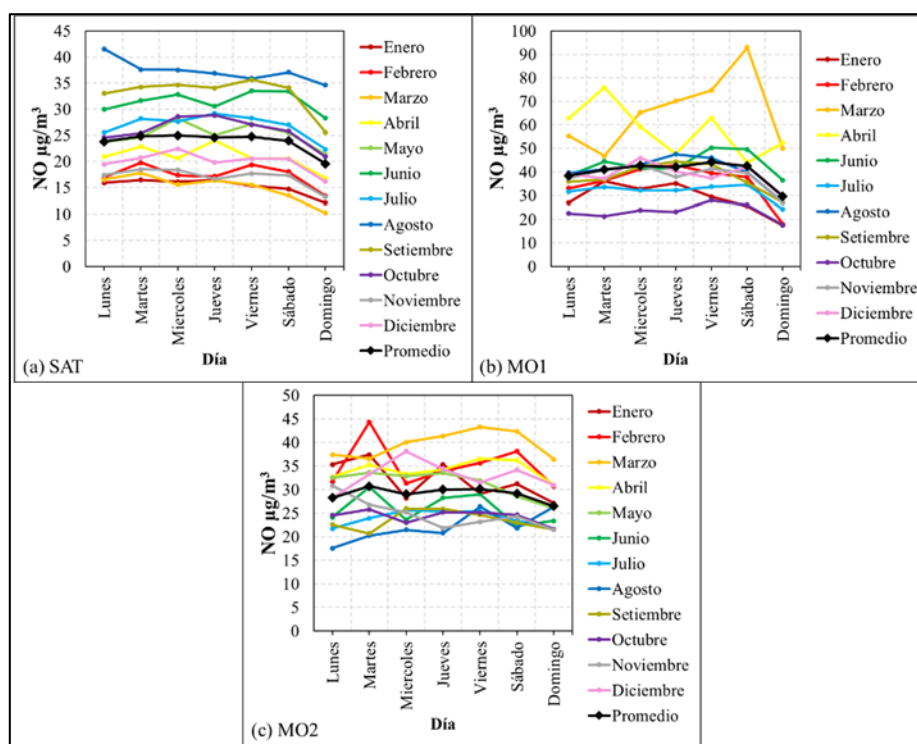


Figura 46: Variación diaria mensual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Se ha observado que, similar a lo presentado para el NO₂, en todas las estaciones se presentó una tendencia a poseer niveles de NO casi constantes entre los días martes y sábados con concentraciones que variaron entre los 24,62 µg/m³ y 42,52 µg/m³ en la zona centro y alrededor de los 29,83 µg/m³ en la zona norte, y que disminuyeron los días domingos y lunes entre 3 µg/m³ y 12 µg/m³. Se espera que este comportamiento esté relacionado con los niveles de tráfico vehicular diarios, los cuales disminuyen significativamente durante los fines de semana de acuerdo con lo señalado en la Figura 42 (El Comercio, 2019).

Cabe resaltar que, el comportamiento diario del NO presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO realizados en diferentes ciudades (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles diarios de tráfico vehicular.

Asimismo, no se presentaron comportamientos inusuales, salvo por los valores elevados de NO entre los meses de marzo y abril en la estación MO1. Este evento se analizó en el comportamiento horario del NO y se señaló en el comportamiento diario del NO₂, donde se señaló que se espera que la ocurrencia de estos eventos se deba al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular que se presenta de manera desigual en diferentes puntos de la ciudad.

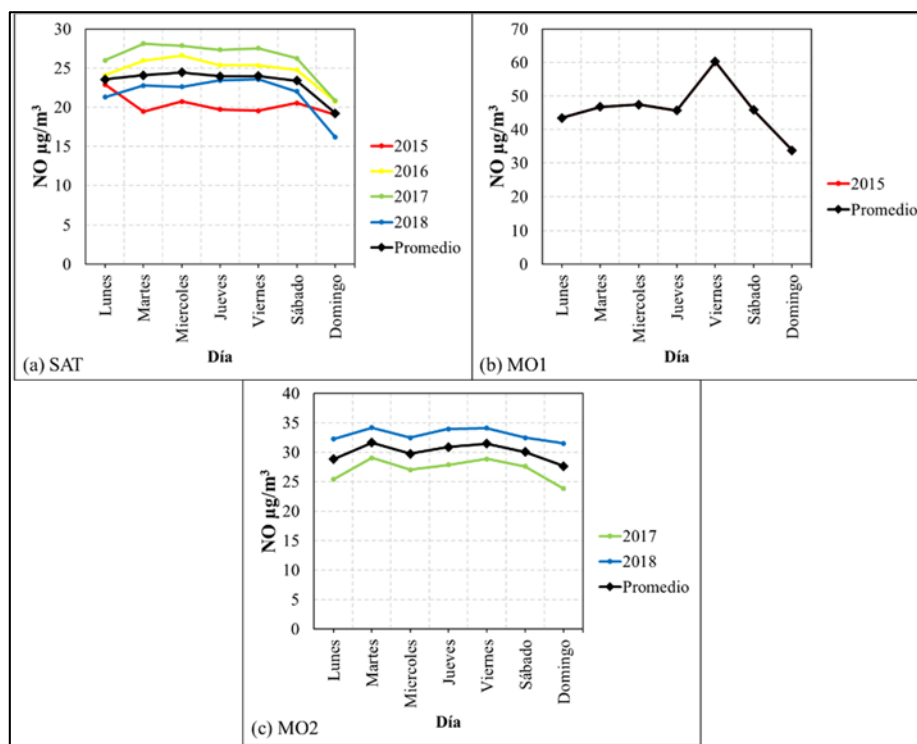


Figura 47: Variación diaria anual del NO para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Finalmente, en cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por día de NO, en la Figura 47 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido

entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, se ha podido observar que la diferencia entre los valores de NO registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no fue tan significativa como en el caso del NO₂. Además, se observa la tendencia de disminuir los niveles de NO durante los fines de semana.

d. Análisis diario del NO_x.

En la presente sección se muestran los resultados del análisis diario de las concentraciones de NO_x registradas en las estaciones SAT, MO1 y MO2. En la Figura 48 se muestran las variaciones mensuales de las concentraciones promedio por día de NO_x para los meses de enero a diciembre en el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada.

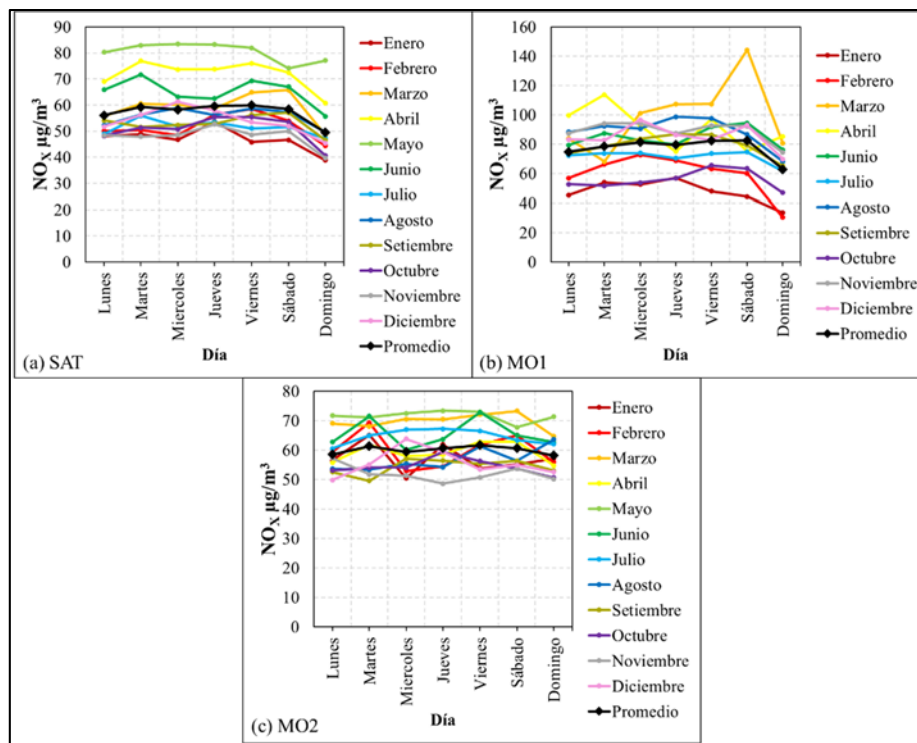


Figura 48: Variación diaria mensual del NO_x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Se ha observado que, consecuentemente con el comportamiento diario del NO₂ y NO, en todas las estaciones se presentó una tendencia a disminuir los niveles de NO_x durante los

fin de semana en entre $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, la concentración fue casi constante de lunes a sábado estando en la magnitud de entre los $59,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $80,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro y alrededor de los $60,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona norte. Se espera que este comportamiento esté relacionado con los niveles de tráfico vehicular diarios, los cuales disminuyen significativamente durante los fines de semana de acuerdo con lo señalado en la Figura 42 (El Comercio, 2019).

Cabe resaltar que, el comportamiento horario del NO_x presentado para la zona centro y norte de Lima Metropolitana guarda relación con varios estudios sobre NO_x realizados en diferentes ciudades (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012). Por ello, se considera que este comportamiento está influenciado principalmente por los niveles diarios de tráfico vehicular.

Asimismo, no se presentaron comportamientos inusuales en ninguna de las estaciones evaluadas, salvo por la ausencia de registros en la estación MO1 para los meses de mayo. Además, al igual que para lo mencionado en el comportamiento horario del NO_x , si bien la información de NO_x fue generada a partir de la suma de los registros puntuales de NO y NO_2 para una misma estación, algunos valores promedio de NO_x fueron menores que la suma del promedio de NO_2 y NO para ciertos meses y años. Esto último fue debido a que no se tomó en cuenta los periodos en que únicamente se registró NO o, en su defecto, NO_2 , por lo que podría estar ocurriendo una subestimación en los valores de NO_x al estar dejando periodos de gran cantidad de emisión de NO_x .

Finalmente, en cuanto al comportamiento multianual de las concentraciones promedio por día de NO_x , en la Figura 49 se presenta dicho comportamiento para el periodo comprendido entre los años 2015 – 2018 para cada estación evaluada. En general, y similar que en el caso del NO , se ha podido observar que la diferencia entre los valores de NO_x registrados en un mismo año para las diferentes estaciones evaluadas no fue tan significativa como en el caso del NO_2 . Además, se observa la tendencia de disminuir los niveles de NO_x durante los fines de semana.

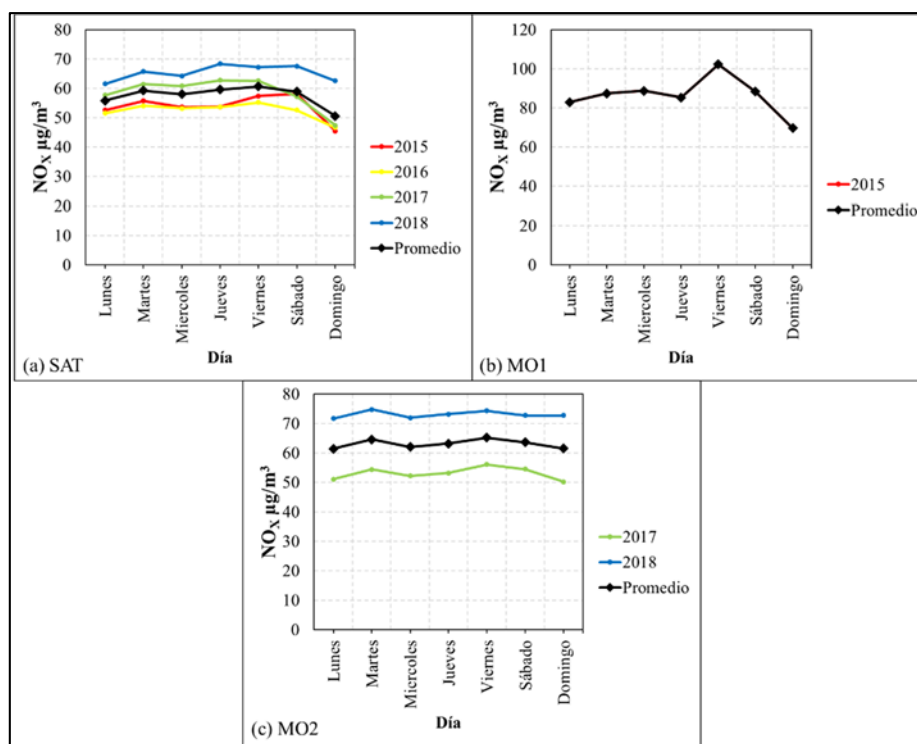


Figura 49: Variación diaria anual del NO_x para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

4.1.3 Análisis de la variación mensual del NO, NO₂, NO_x y O₃.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis mensual de las concentraciones de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por zonas tomando en cuenta los resultados obtenidos para los comportamientos horario y diario de los parámetros en evaluación.

a. Análisis mensual en la zona centro.

En la Figura 51 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento mensual de las estaciones ubicadas en la zona centro de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que, para el NO₂, todas las estaciones presentaron tendencias distintas en cuanto a su comportamiento mensual, incluso para estaciones con ubicaciones cercanas entre sí. Esto indica que existe una variabilidad espacial intensa en la zona centro, lo cual también se ha podido observar en el comportamiento horario del NO₂. Se espera que la variabilidad del NO₂ se deba al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular que se presenta de manera desigual en diferentes puntos de la ciudad. Además, se ha observado esta falta de una

tendencia clara en el comportamiento mensual del NO₂ en otros estudios para otras ciudades (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012).

Por otro lado, en la Figura 51 se aprecia que los niveles de O₃ para la zona centro poseen una tendencia de aumentar durante los meses de junio a octubre. Este comportamiento indica que la variación mensual del O₃ no está vinculado principalmente por la radiación solar, sino que existe una variable adicional que condiciona estos niveles. En este sentido, se espera que el aumento del O₃ durante los meses de junio a octubre esté relacionado con la intensidad de la inversión térmica atmosférica presente en Lima durante los mismos meses, lo cual evita la dispersión del O₃ una vez formado, generando niveles diarios elevados (Figura 50).

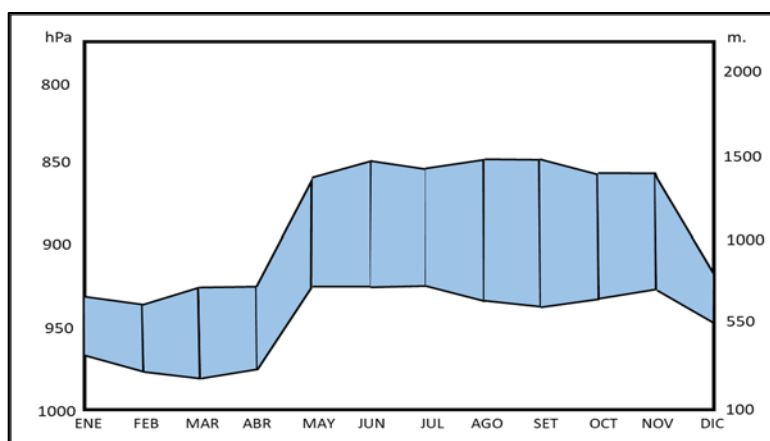


Figura 50: Base y tope de la inversión térmica en la atmósfera de Lima - Callao.

FUENTE: Monitoreo y pronóstico de la calidad del aire (SENAMHI, 2016)

Asimismo, en la Figura 51 se aprecia que los niveles de NO_x en la zona centro responden a los niveles individuales de NO₂ y NO. Para este último, se puede notar un aumento de sus niveles entre febrero y mayo, seguido de meses con niveles más bajos. Se espera que esto esté relacionado con los niveles de O₃, los cuales se relacionan inversamente con el primero debido a que este es uno de sus precursores. Así, los niveles de NO_x presentan el comportamiento local sin tendencia clara del NO₂ y los aumentos en sus concentraciones en los meses entre febrero y mayo consecuente a los niveles de NO.

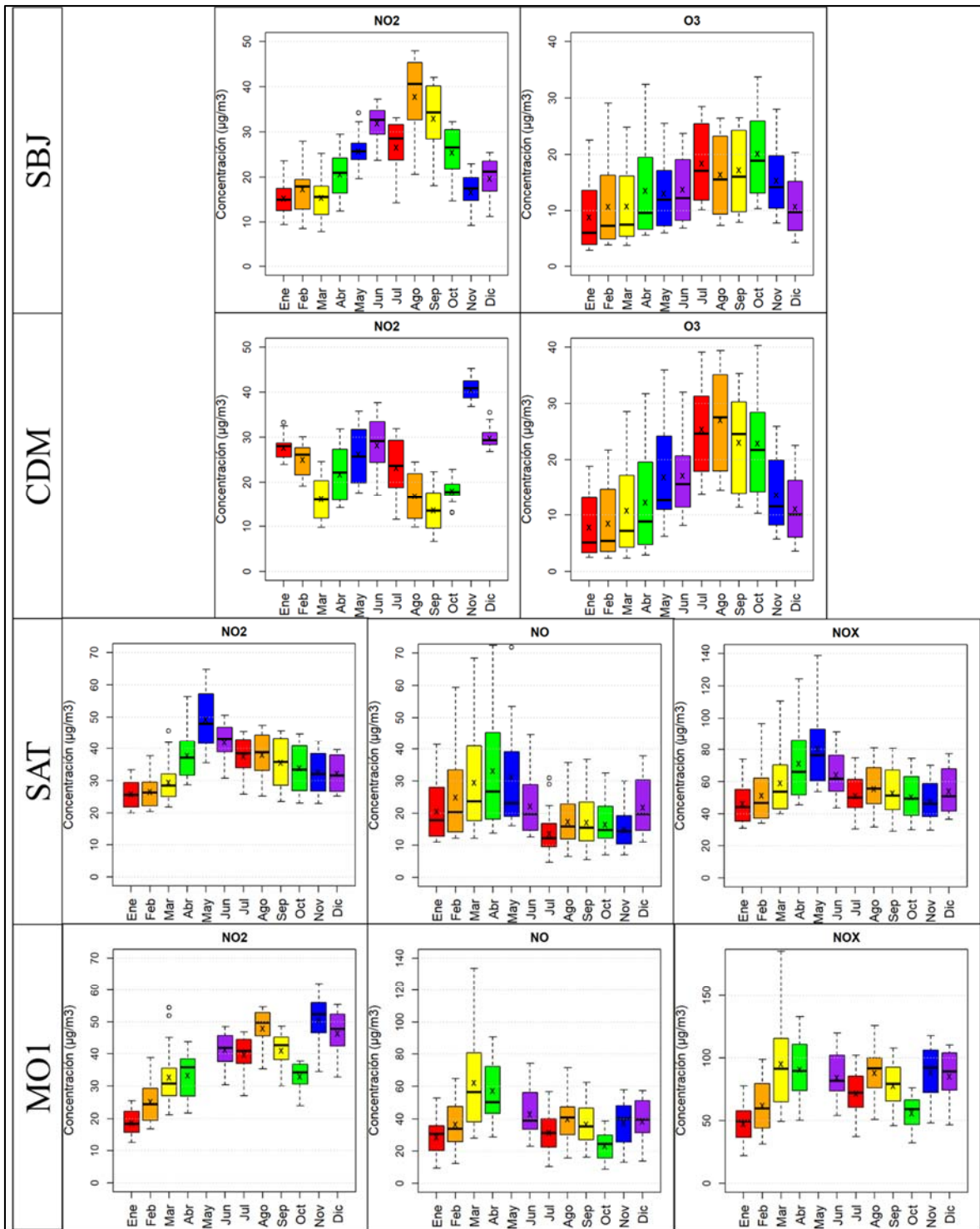


Figura 51: Variación mensual del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.

b. Análisis mensual en la zona norte.

En la Figura 52 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento mensual de las estaciones ubicadas en la zona norte de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que, para el NO₂, existe una tendencia de poseer los valores mínimos entre los meses de noviembre y febrero. Este comportamiento podría ser explicado en parte por los mayores niveles de radiación solar los cuales destruyen a las moléculas de NO₂ (Munir *et al.*, 2011; Roberts *et al.*, 2012). Sin embargo, similar a lo descrito para la zona centro, se espera que los niveles de NO₂ se vinculen al comportamiento aleatorio del tráfico vehicular en Lima Metropolitana.

Por otro lado, en la Figura 52 se aprecia que los niveles de O₃ en la zona norte tienden a aumentar durante los meses de octubre y abril, principalmente en las estaciones CRB y PPD (estaciones ubicadas más al norte). Sin embargo, la estación SMP comparte el aumento de sus niveles entre los meses de junio y octubre similar a lo visto para la zona centro. Para este caso, el comportamiento representado en las estaciones PPD y CRB se puede ver más influenciado por los niveles de radiación solar; mientras que, la estación SMP aún guarda mayor relación con la intensidad de la inversión térmica en Lima Metropolitana (Figura 50).

Asimismo, en la Figura 52 se aprecia que los niveles de NO_x en la zona norte también reflejan los niveles individuales de NO₂ y NO. Para este último, se puede notar un aumento de sus niveles entre febrero y mayo, seguido de meses con niveles más bajos (similar a lo observado en la zona centro). Se espera que esto esté relacionado con el comportamiento del tráfico vehicular en Lima Metropolitana. En este sentido, los niveles de NO_x estarían influenciados principalmente por el tráfico vehicular de Lima Metropolitana, y otros factores de alta variabilidad, como la velocidad del viento.

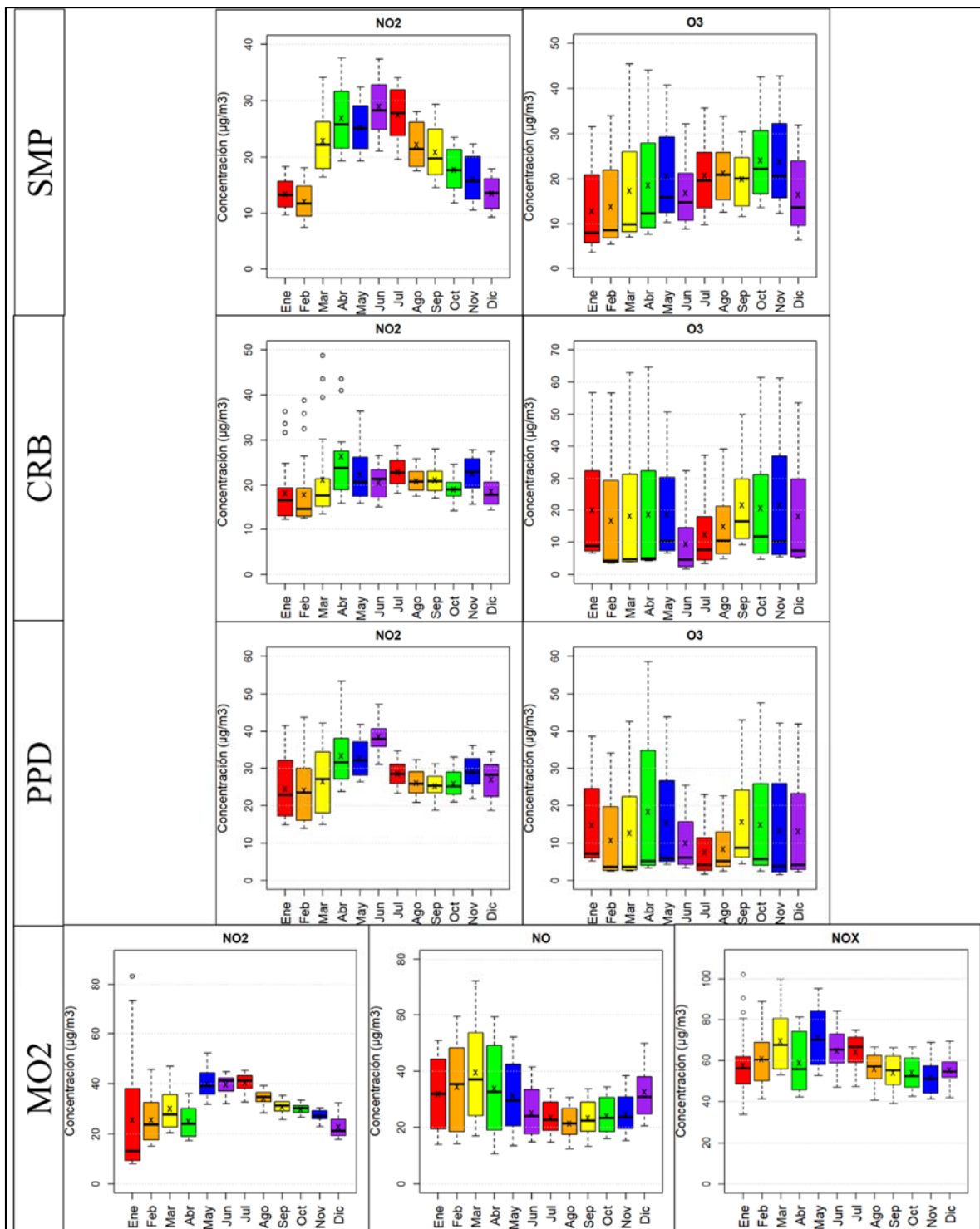


Figura 52: Variación mensual del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.

4.1.4 Análisis de la variación estacional del NO, NO₂, NO_x y O₃.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis estacional de las concentraciones de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por zonas tomando en cuenta los resultados obtenidos para los comportamientos mensuales de los parámetros en evaluación.

En la Figura 53 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento estacional de las estaciones ubicadas en la zona centro de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que, para todos los parámetros, su comportamiento estacional fue similar a lo presentado para el comportamiento mensual. Sin embargo, para el NO₂ se aprecia una tendencia a poseer niveles más elevados durante el invierno. Para el O₃, aún se aprecia la influencia de la intensidad de la inversión térmica, por lo que durante el invierno se aprecian los mayores valores. Finalmente, los niveles de NO y NO_x disminuyen durante el invierno y la primavera debido a los niveles elevados de O₃.

En la Figura 54 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento estacional de las estaciones ubicadas en la zona norte de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que, tanto el NO₂, NO y NO_x tienden a disminuir durante la primavera y verano, lo cual se relaciona con los niveles de O₃. Además, este último presenta un comportamiento similar entre las estaciones PPD y CRB con valores mínimos en invierno; mientras que, la estación SMP comparte su comportamiento con las de la zona centro.

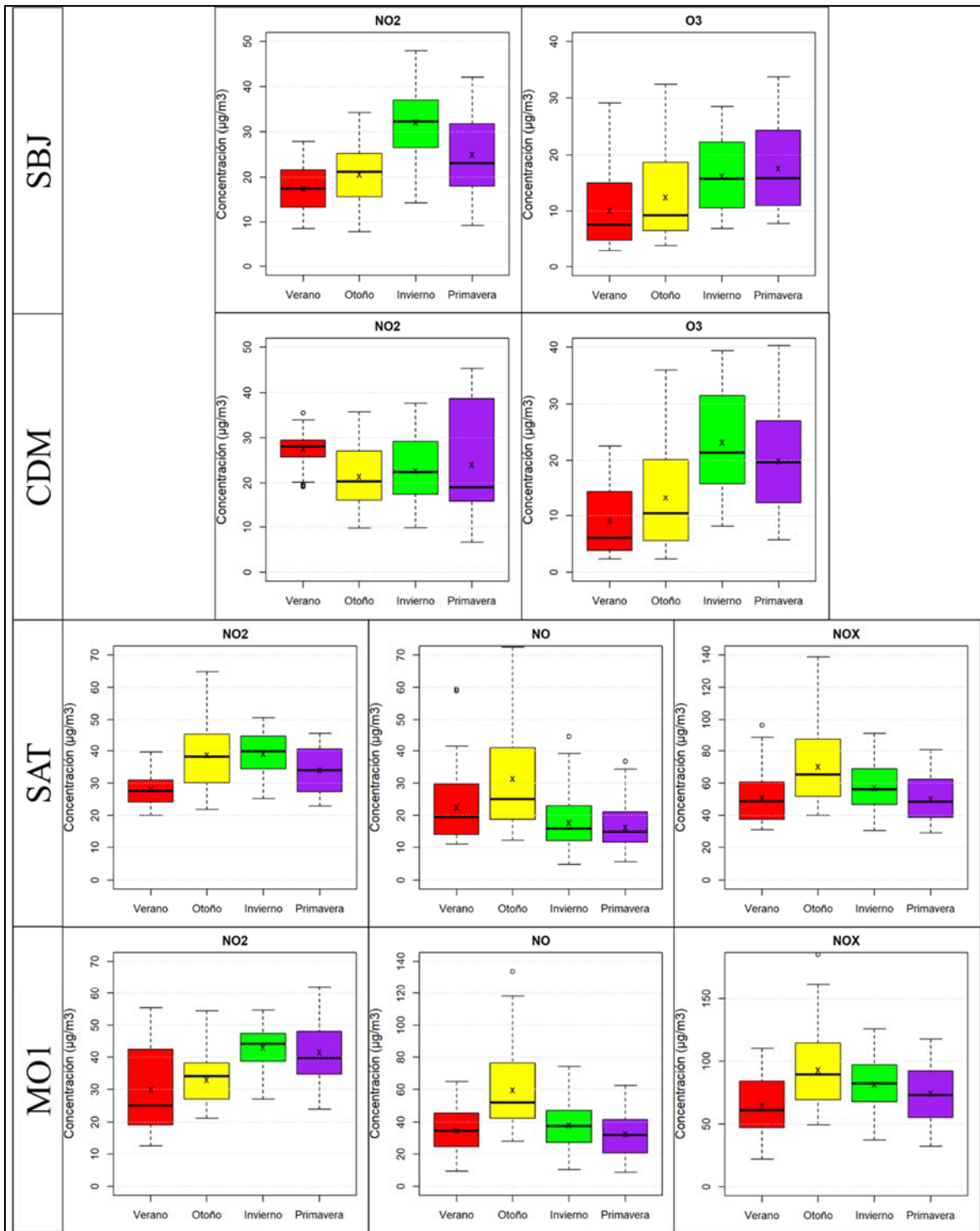


Figura 53: Variación estacional del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.

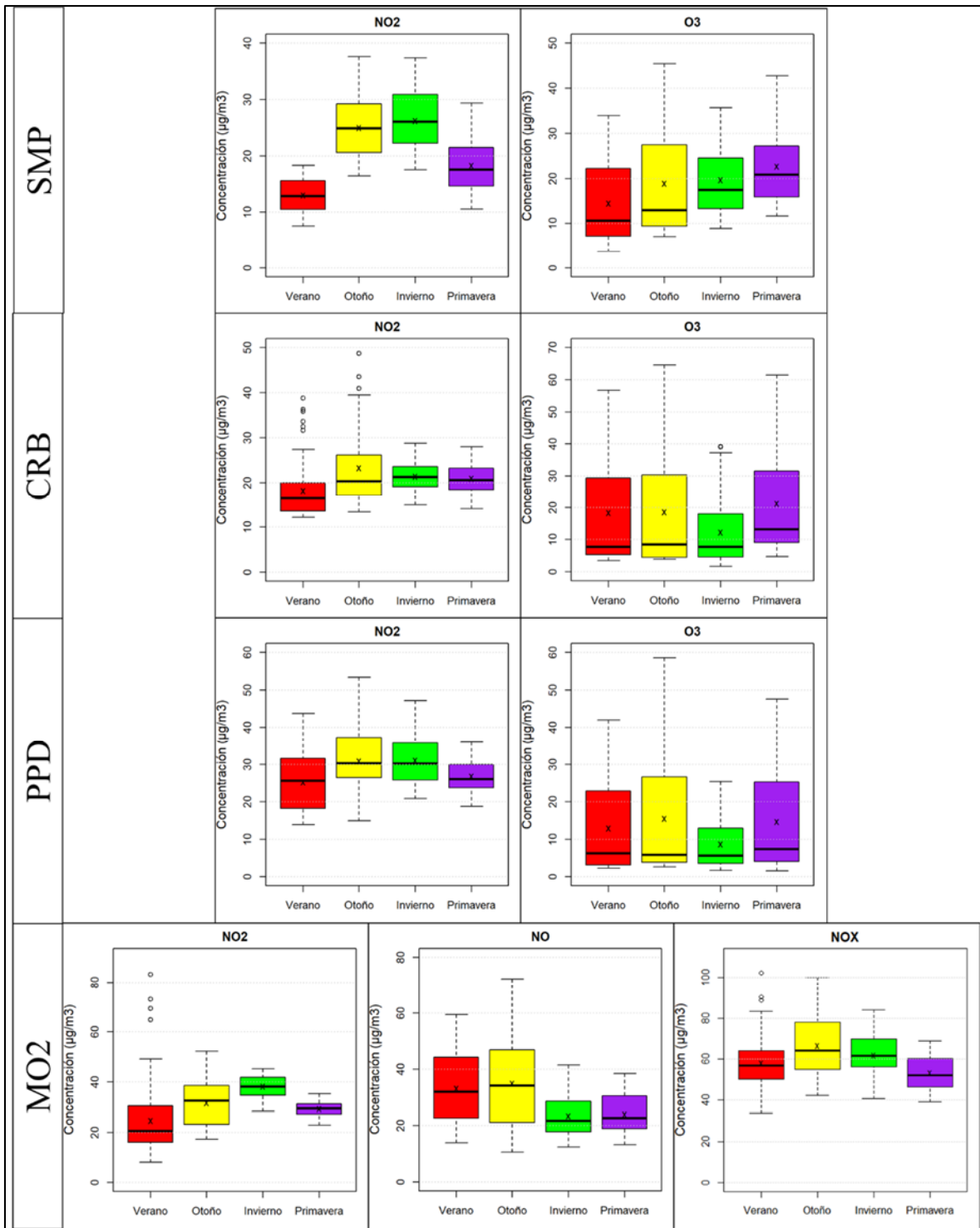


Figura 54: Variación estacional del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético.

4.1.5 Análisis de la variación multianual del NO, NO₂, NO_x y O₃.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis multianual de las concentraciones de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por zonas tomando en cuenta los resultados obtenidos para los comportamientos horarios y mensuales de los parámetros en evaluación.

En la Figura 55 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento multianual de las estaciones ubicadas en la zona centro de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que en las estaciones SBJ y SAT todos los parámetros han aumentado desde el año 2015 al año 2018. Sin embargo, a pesar de su cercanía, la estación CDM indica que los niveles de NO₂ y O₃ que se registran han disminuido para dichos años. En este sentido, no se tiene una idea precisa de la tendencia de estos contaminantes para esta zona, salvo que, similar a lo que ocurre en la zona norte, se espera que el NO y NO_x estén aumentando.

En la Figura 56 se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento multianual de las estaciones ubicadas en la zona norte de Lima Metropolitana. Se puede apreciar que, al igual que para la zona centro, estos parámetros no poseen una tendencia clara, aunque se espera que el NO y NO_x estén aumentando. Asimismo, para las estaciones PPD y SMP el O₃ ha aumentado entre los años 2015 – 2018, pero en la estación CRB mas bien ha disminuido. En este sentido, se espera que la alta variabilidad espacial que poseen estos parámetros estén reflejados en esta falta de tendencia por zonas.

Además, todas las estaciones cumplen con el ENCA de NO₂ anual de 100 µg/m³; sin embargo, la estación MO1 y MO2 presentaron niveles que superan la guía de 40 µg/m³. Se espera que esto se deba a los niveles de tráfico vehicular próximos a estas estaciones.

En los últimos años, el estado peruano ha tomado mejores medidas de control para el tráfico vehicular con el fin de mejorar la calidad del aire (Fundación Transitemos, 2018). Sin embargo, de acuerdo con los resultados presentados en este estudio, todavía no se

aprecia una significativa tendencia a que estos contaminantes estén disminuyendo entre las zonas centro y norte de Lima Metropolitana.

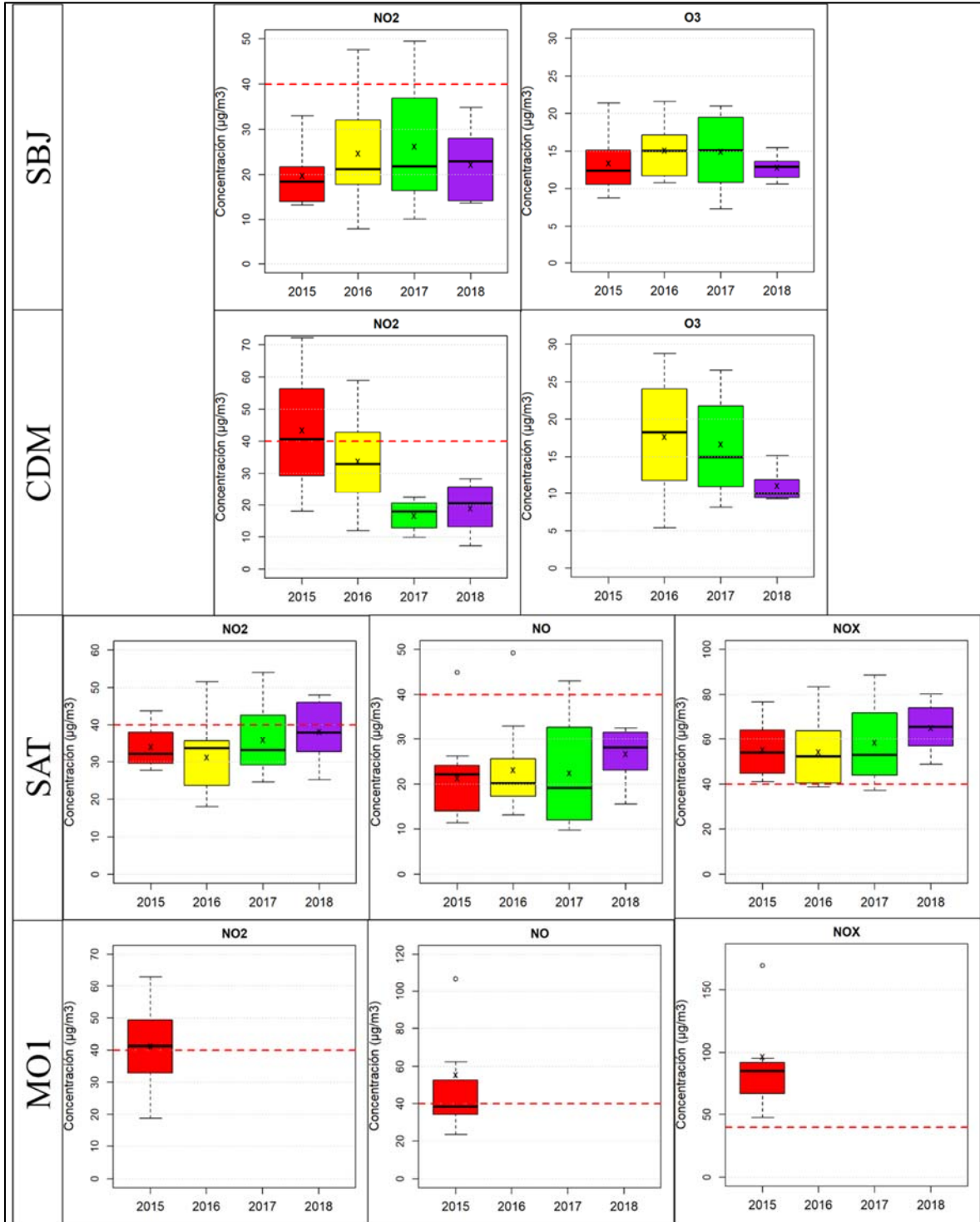


Figura 55: Variación multianual del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético y la línea roja corresponde a la guía anual de NO₂.

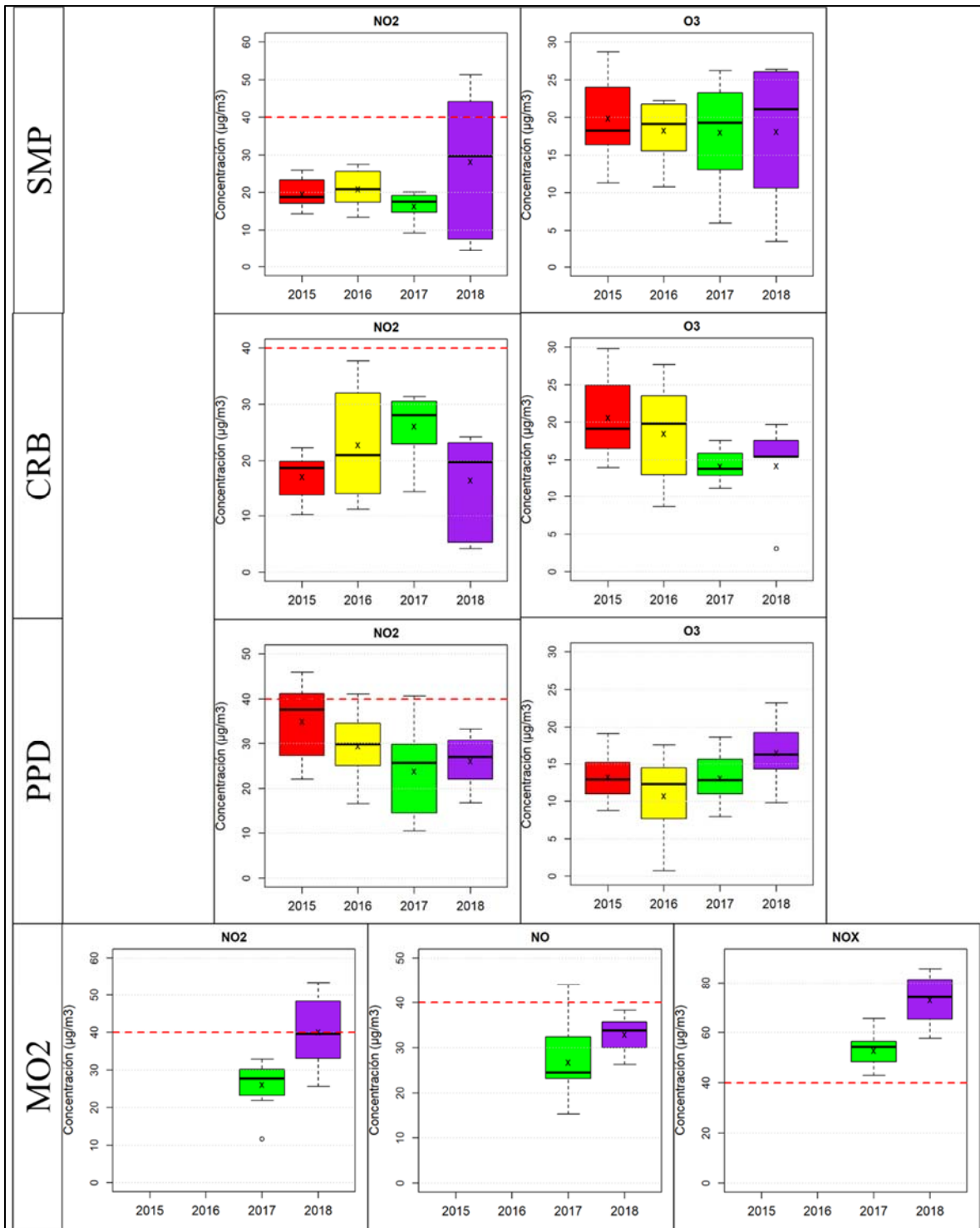


Figura 56: Variación multianual del NO₂, NO, NO_x y O₃ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018. Diagrama de cajas y bigotes donde “x” indica el promedio aritmético y la línea roja corresponde a la guía anual de NO₂.

4.2 Análisis de la correlación entre la concentración horaria de NO, NO₂, NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

En la presente sección se muestran y discuten los resultados del análisis de correlación entre las concentraciones horarias de NO₂, NO, NO_x y O₃. Este análisis se realizó por estación de acuerdo a los parámetros evaluados en dicha estación. Adicionalmente, se realizó el análisis de las correlaciones entre un mismo parámetro para diferentes estaciones.

4.2.1 Análisis correlacional por estación.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de los coeficientes de correlación de Spearman entre el NO₂ y el O₃ para las estaciones pertenecientes al SENAMHI junto con sus p-value. En general, las correlaciones más significativas se presentaron durante los meses de julio y octubre para las estaciones SBJ, CDM y SMP siendo todas estas negativas y con un p-value menor a 0,05 (i.e. menor al nivel de significancia de 0,05); mientras que, en las estaciones PPD y CRB se presentaron correlaciones significativas (i.e. mayor que 0.6 o menor que -0.6) y positivas entre enero y marzo con un p-value menor a 0,05. Además, si bien no son significativas, las correlaciones en las estaciones del centro son más positivas para los primeros meses del año y se vuelven más negativas, e incluso significativas, para los meses antes mencionados. En este sentido, se espera que los meses en que el comportamiento horario del O₃ exprese un significativo primer valor máximo positivo estén más correlacionados (negativamente) con los niveles de NO₂ que para el resto del año en la zona centro. Este comportamiento inverso se ha podido observar en otros estudios (Ismail, Abdullah, Yuen & Adyani, 2016; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Milena *et al.*, 2014), donde se menciona que las relaciones positivas entre estos dos contaminantes podrían indicar que el O₃ podría verse relacionado más fuertemente con otros precursores (como los COV) durante ciertos periodos. Finalmente, se espera que las correlaciones positivas presentadas en la zona norte se relacionen con los periodos de menor concentración para ambos contaminantes más que con los valores máximos, dado que su primer valor máximo es incluso menos pronunciado durante enero, febrero y marzo.

Tabla 15: Correlación de la concentración horaria del NO₂ y O₃ por estación durante el periodo 2015-2018.

Mes	NO ₂ vs O ₃				
	Zona centro		SMP	Zona norte	
	SBJ	CDM		CRB	PPD
Ene	0,12	0,36	-0,19	0,69	0,77
p-value	0,59	0,08	0,38	0,00	0,00
Feb	0,28	0,27	-0,38	0,57	0,85
p-value	0,18	0,20	0,07	0,00	0,00
Mar	0,15	-0,38	0,00	0,63	0,79
p-value	0,50	0,07	0,98	0,00	0,00
Abr	0,07	-0,47	-0,31	0,40	0,30
p-value	0,74	0,02	0,14	0,05	0,15
May	-0,28	-0,59	-0,61	0,02	-0,02
p-value	0,18	0,00	0,00	0,94	0,93
Jun	-0,56	-0,56	-0,69	0,29	-0,01
p-value	0,00	0,00	0,00	0,18	0,97
Jul	-0,71	-0,76	-0,74	-0,30	-0,08
p-value	0,00	0,00	0,00	0,15	0,70
Ago	-0,80	-0,71	-0,89	-0,40	0,05
p-value	0,00	0,00	0,00	0,05	0,80
Sep	-0,78	-0,66	-0,77	-0,48	-0,08
p-value	0,00	0,00	0,00	0,02	0,71
Oct	-0,69	-0,06	-0,87	-0,64	-0,43
p-value	0,00	0,77	0,00	0,00	0,04
Nov	-0,50	0,15	-0,77	-0,54	-0,24
p-value	0,01	0,47	0,00	0,01	0,25
Dic	-0,13	-0,33	-0,69	0,26	0,51
p-value	0,54	0,11	0,00	0,22	0,01

En la Tabla 16 se muestran los resultados de los coeficientes de correlación de Spearman entre el NO₂, NO y NO_x para las estaciones pertenecientes al PROTRANSPORTE junto con sus p-value. En general, las correlaciones más significativas se presentaron durante casi todo el año para la mayoría de estaciones. Sin embargo, de entre todas las estaciones, MO2 posee una correlación negativa significativa entre los meses de diciembre y enero; mientras que el resto del año posee correlaciones no significativas que varían entre negativas y positivas. Similar a lo que se explicó en el comportamiento horario de la estación MO2, aunque con un p-value superior a 0,05 (i.e. mayor al nivel de significancia). Se espera que estas correlaciones se deban a valores anómalos más que a un comportamiento promedio para la estación. Por otro lado, se aprecia que las mayores correlaciones se logran entre las concentraciones horarias de NO y NO_x más que con el resto de combinaciones. Si bien la relación entre el NO₂ y el NO_x ha demostrado ser más

significativa que entre el NO y NO_x para otros estudios (Gasmi *et al.*, 2017; Milena *et al.*, 2014; Szep *et al.*, 2016), para estos también se aprecia una alta correlación entre estos tres parámetros y la menor relación entre el NO₂ y el NO.

Tabla 16: Correlación de la concentración horaria del NO₂, NO y NO_x por estación durante el periodo 2015-2018.

Mes	NO ₂ vs NO			NO vs NO _x			NO ₂ vs NO _x		
	Zona centro		Zona norte	Zona centro		Zona norte	Zona centro		Zona norte
	SAT	MO1	MO2	SAT	MO1	MO2	SAT	MO1	MO2
Ene	0,87	0,85	-0,61	0,98	0,98	-0,15	0,93	0,92	0,69
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
Feb	0,72	0,87	-0,47	0,96	0,99	0,78	0,86	0,92	0,13
p-value	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
Mar	0,44	0,86	-0,47	0,94	0,99	0,83	0,69	0,91	0,07
p-value	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75
Abr	0,59	0,38	-0,52	0,95	0,96	0,90	0,80	0,54	-0,14
p-value	0,00	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,53
May	0,68	S/D	0,12	0,91	S/D	0,90	0,88	S/D	0,50
p-value	0,00	S/D	0,59	0,00	S/D	0,00	0,00	S/D	0,01
Jun	0,83	0,82	0,36	0,99	0,97	0,93	0,88	0,90	0,63
p-value	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,87	0,94	0,33	0,98	1,00	0,92	0,91	0,95	0,60
p-value	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,89	0,95	0,58	0,98	1,00	0,96	0,94	0,96	0,76
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sep	0,87	0,89	0,58	0,97	1,00	0,97	0,94	0,90	0,73
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oct	0,91	0,93	0,56	0,98	0,99	0,97	0,96	0,97	0,69
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nov	0,90	0,88	0,55	0,97	0,98	0,96	0,97	0,94	0,72
p-value	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dic	0,93	0,93	-0,71	0,98	1,00	0,76	0,97	0,95	-0,23
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27

4.2.2 Análisis correlacional por parámetro.

Con el fin de conocer la relación existente entre las concentraciones horarias promedio de un mismo parámetro entre las estaciones de una misma zona, se realizó un análisis de correlación para el NO₂, NO, NO_x y O₃ de acuerdo a las estaciones que registran estos parámetros.

En la Tabla 17 y Tabla 18 se aprecia la correlación entre las concentraciones horarias promedio de NO₂ obtenidas para las estaciones de la zona centro y norte, respectivamente, de Lima Metropolitana. Se puede observar que en la zona centro y para todos los meses se suele tener una correlación positiva significativa (> 0.6) con un p-value inferior a 0,05. Por su lado, en la zona norte se presentan correlaciones más bajas, pero aun así significativas y durante todo el año, salvo por la estación MO2 que demostró no tener una relación tan buena con el resto de estaciones durante todo el año debido a sus datos anómalos. Cabe señalar que, como se apreció en la evaluación horaria del NO₂, estas correlaciones positivas no indican que los niveles de NO₂ son similares entre las estaciones, sino que la variación que poseen durante el día (i.e. el aumento o disminución) tiene una tendencia similar.

Tabla 17: Correlación de la concentración horaria del NO₂ en la zona centro de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.

Mes	NO ₂ Zona centro					
	SBJ vs CDM	SBJ vs SAT	CDM vs SAT	SBJ vs MO1	CDM vs MO1	SAT vs MO1
Ene	0,88	0,85	0,56	0,90	0,63	0,98
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feb	0,74	0,84	0,55	0,74	0,31	0,94
p-value	0,00	0,00	0,01	0,00	0,15	0,00
Mar	0,84	0,93	0,78	0,85	0,78	0,92
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abr	0,82	0,90	0,79	0,82	0,42	0,67
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
May	0,84	0,90	0,83	S/D	S/D	S/D
p-value	0,00	0,00	0,00	S/D	S/D	S/D
Jun	0,93	0,91	0,91	0,75	0,73	0,88
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,93	0,89	0,92	0,92	0,89	0,95
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,85	0,80	0,97	0,88	0,93	0,91
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sep	0,70	0,86	0,88	0,87	0,76	0,94
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oct	0,30	0,91	0,45	0,86	0,33	0,85
p-value	0,15	0,00	0,03	0,00	0,11	0,00
Nov	0,48	0,94	0,38	0,98	0,48	0,92
p-value	0,02	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00
Dic	0,74	0,81	0,74	0,92	0,72	0,90
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 18: Correlación de la concentración horaria del NO₂ en la zona norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.

Mes	NO ₂ Zona norte					
	SMP vs CRB	SMP vs PPD	CRB vs PPD	SMP vs MO2	CRB vs MO2	PPD vs MO2
Ene	0,62	0,28	0,72	0,05	0,51	0,91
p-value	0,00	0,19	0,00	0,81	0,01	0,00
Feb	0,64	0,18	0,73	0,01	0,49	0,92
p-value	0,00	0,41	0,00	0,97	0,01	0,00
Mar	0,85	0,49	0,78	0,43	0,69	0,92
p-value	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00
Abr	0,84	0,87	0,97	0,12	0,50	0,48
p-value	0,00	0,00	0,00	0,59	0,01	0,02
May	0,77	0,87	0,94	0,61	0,81	0,70
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun	0,38	0,74	0,82	0,59	0,82	0,93
p-value	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,54	0,56	0,89	0,53	0,89	0,88
p-value	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Ago	0,53	0,32	0,82	0,58	0,89	0,80
p-value	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Sep	0,74	0,74	0,81	0,60	0,83	0,86
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oct	0,81	0,61	0,78	0,51	0,59	0,53
p-value	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Nov	0,88	0,80	0,84	0,58	0,34	0,28
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,19
Dic	0,60	0,14	0,72	-0,85	-0,20	0,17
p-value	0,00	0,51	0,00	0,00	0,35	0,44

Para el caso del O₃, en la Tabla 19 se aprecia que existe una buena correlación durante todo el año entre las concentraciones horarias promedio de las estaciones de la zona centro (i.e. SBJ y CDM) y para todas las estaciones de la zona norte (i.e. SMO, CRB y PPD) con p-value inferiores a 0,05. Similar a lo descrito para el NO₂, estas altas correlaciones positivas no significan necesariamente concentraciones similares en todas las estaciones, sino que en todas se aprecia una tendencia similar a aumentar o disminuir sus niveles de O₃ durante el transcurso del día.

Tabla 19: Correlación de la concentración horaria del O₃, NO y NO_x en la zona centro y norte de Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2018.

Mes	O ₃				NO	NO _x
	Zona centro SBJ vs CDM	SMP vs CRB	Zona norte SMP vs PPD	CRB vs PPD	Zona centro SAT vs MO1	Zona centro SAT vs MO1
Ene	0,96	0,91	0,96	0,92	0,83	0,88
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feb	0,96	0,76	0,82	0,97	0,90	0,96
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mar	0,97	0,80	0,85	0,89	0,85	0,92
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abr	0,99	0,86	0,82	0,94	0,84	0,82
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
May	0,94	0,94	0,87	0,93	S/D	S/D
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	S/D	S/D
Jun	0,94	0,90	0,87	0,96	0,95	0,97
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,96	0,82	0,81	0,98	0,97	0,97
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,95	0,85	0,84	0,98	0,98	0,95
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sep	0,96	0,91	0,86	0,97	0,97	0,97
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oct	0,97	0,95	0,86	0,94	0,92	0,88
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nov	0,96	0,92	0,88	0,98	0,92	0,91
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dic	0,98	0,90	0,87	0,99	0,96	0,94
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Finalmente, se realizó el análisis del NO y NO_x para las estaciones pertenecientes a la misma zona. Debido a que la estación MO2 es la única estación presente en la zona norte que registra NO, este análisis únicamente se realizó para las estaciones de la zona centro (i.e. SAT y MO1). En la Tabla 19 se puede apreciar que en todos los meses del año se presentan altas correlaciones entre los registros de NO y NO_x con p-value inferiores a 0,05.

4.3 Determinación de la influencia de los NO_x en los niveles de O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Con el fin de medir la influencia de la concentración horaria promedio del NO₂, NO y NO_x sobre el O₃, se procedió a generar una regresión lineal múltiple entre estos parámetros. Sin embargo, al no contar con los cuatro (04) parámetros para una misma estación, se utilizaron las concentraciones horario promedio de cada estación y los parámetros faltantes fueron escogidos a partir de un análisis de correlación. Aún más, teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros durante el año, se realizó este análisis para el mes de febrero, referencial para el verano, y el mes de agosto, referencial para el invierno, teniendo en cuenta que durante estos meses se obtuvo valores de correlación elevados y p-value inferiores a 0,05.

De acuerdo con Amat (2016), la regresión lineal múltiple posee los supuestos de no colinealidad de predictores, parsimonia, linealidad, distribución normal de residuos, homocedasticidad, independencia, identificación de valores atípicos y tamaño de muestra suficiente. Sin embargo, al ser los datos de calidad ambiental datos no paramétricos tal como se observó en la Sección 4.1, se utilizó el método estadístico de regresión lineal múltiple de manera referencial tomando en consideración el cumplimiento de la mayor cantidad de supuestos posible. Esta decisión fue tomada para que los resultados puedan ser contrapuestos frente a otros estudios similares realizados en otras ciudades, dado que la regresión lineal múltiple es uno de los métodos más utilizados en este tipo de estudios (Adyani *et al.*, 2009; Alghamdi *et al.*, 2019; Castellano *et al.*, 2009; Clapp & Jenkin, 2001; Ocak & Turalioglu, 2008; Roberts *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2018).

En este sentido, se realizó un análisis de correlación tomando en cuenta el coeficiente de correlación de Pearson (i.e. una correlación paramétrica). Así, de la Tabla 20 y Tabla 23 se aprecian los resultados de estos coeficientes para los niveles de O₃ de las estaciones SBJ y CDM (i.e. estaciones de la zona centro) tomando en cuenta a los parámetros explicativos de estos niveles y diferenciado entre el verano y el invierno; mientras que, de la Tabla 24 a la Tabla 29 se realiza esta evaluación para las estaciones SMP, CRB y PPD (i.e. estaciones de la zona norte).

Para el caso de los niveles de O₃ en la estación SBJ en verano, en la Tabla 20 se puede apreciar que este parámetro guarda una correlación positiva regular con los niveles horarios de NO₂ para esta misma estación. Como se mencionó previamente, dicha correlación positiva puede estar relacionada con el comportamiento de ambos contaminantes durante el periodo nocturno y con el uso de precursores diferentes al NO₂ para la generación de O₃. Asimismo, los p-value de los coeficientes de correlación del resto de variables independientes estuvo muy por encima de los 0,05, por lo que se espera que durante el verano exista otros parámetros que influyeran en los niveles horarios de O₃ más que los NO_x. Por otro lado, se aprecia una buena correlación positiva entre el resto de parámetros debido a que todos estos (i.e. NO₂, NO y NO_x) son generados a partir de las mismas fuentes móviles. Cabe mencionar que, este comportamiento también fue observado en la estación CDM en verano, tal como se aprecia en la Tabla 21.

Tabla 20: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ, SAT y MO1 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SBJ	NO₂ SBJ	NO SAT	NO_x SAT	NO MO1	NO_x MO1
O ₃ SBJ	1,00	0,49	-0,28	-0,17	-0,08	-0,01
p-value	0,00	0,01	0,19	0,43	0,72	0,95
NO ₂ SBJ		1,00	0,58	0,69	0,79	0,82
p-value		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO SAT			1,00	0,98	0,89	0,85
p-value			0,00	0,00	0,00	0,00
NO _x SAT				1,00	0,94	0,93
p-value				0,00	0,00	0,00
NO MO1					1,00	0,99
p-value					0,00	0,00
NO _x MO1						1,00
p-value						0,00

Tabla 21: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM, SAT y MO1 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CDM	NO₂ CDM	NO SAT	NO_x SAT	NO MO1	NO_x MO1
O ₃ CDM	1,00	0,38	-0,34	-0,25	-0,15	-0,10
p-value	0,00	0,06	0,10	0,25	0,50	0,63
NO ₂ CDM		1,00	0,42	0,49	0,65	0,61
p-value		0,00	0,04	0,01	0,00	0,00
NO SAT			1,00	0,98	0,89	0,85
p-value			0,00	0,00	0,00	0,00
NO _x SAT				1,00	0,94	0,93
p-value				0,00	0,00	0,00
NO MO1					1,00	0,99
p-value					0,00	0,00
NO _x MO1						1,00
p-value						0,00

Para el caso de los niveles de O₃ en la estación SBJ en invierno, en la Tabla 22 se puede apreciar que este parámetro guarda una correlación negativa significativa con todas las variables independientes y en todos los casos con un p-value inferior a 0,05. Como se mencionó previamente, dicha correlación negativa para los meses de invierno puede estar relacionada con el comportamiento bimodal más pronunciado del O₃ que se desarrolla durante dichos meses. Asimismo, se observa que los coeficientes de correlación más significativos con parámetros diferentes al NO₂ (i.e. con NO y NO_x de las otras estaciones) se obtienen con la estación SAT. Cabe mencionar que, este comportamiento también fue observado en la estación CDM en invierno, tal como se aprecia en la Tabla 23, donde se puede observar que la estación CDM también guarda los mejores coeficientes de correlación con la estación SAT.

Tabla 22: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ, SAT y MO1 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃	NO₂	NO	NO_x	NO	NO_x
	SBJ	SBJ	SAT	SAT	MO1	MO1
O ₃ SBJ	1.00	-0,73	-0,57	-0,69	-0,55	-0,60
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
NO ₂ SBJ		1.00	0,77	0,83	0,82	0,87
p-value		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO SAT			1.00	0,97	0,97	0,96
p-value			0,00	0,00	0,00	0,00
NO _x SAT				1.00	0,95	0,96
p-value				0,00	0,00	0,00
NO MO1					1.00	0,99
p-value					0,00	0,00
NO _x MO1						1.00
p-value						0,00

Tabla 23: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM, SAT y MO1 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃	NO₂	NO	NO_x	NO	NO_x
	CDM	CDM	SAT	SAT	MO1	MO1
O ₃ CDM	1.00	-0,78	-0,41	-0,54	-0,40	-0,44
p-value	0,00	0,00	0,05	0,01	0,05	0,03
NO ₂ CDM		1.00	0,83	0,92	0,79	0,82
p-value		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO SAT			1.00	0,97	0,97	0,96
p-value			0,00	0,00	0,00	0,00
NO _x SAT				1.00	0,95	0,96
p-value				0,00	0,00	0,00
NO MO1					1.00	0,99
p-value					0,00	0,00
NO _x MO1						1.00
p-value						0,00

Para el caso de los niveles de O₃ en la estación SMP en verano, en la Tabla 24 se puede apreciar que este parámetro guarda una correlación negativa significativa con los niveles horarios de NO en la estación MO2. Sin embargo, el p-value para el resto de variables es superior a 0,05. Asimismo, esto se repite para los niveles de O₃ en la estación CRB y PPD donde, además, se aprecia que los niveles de NO₂ no poseen coeficientes de correlación con p-value inferior a 0,05 para todos los casos. Se atribuyen estos resultados a la variabilidad y anomalías de la estación MO2 en sus datos de NO₂ los cuales se ven reflejados en sus niveles de NO_x.

Tabla 24: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SMP	NO₂ SMP	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ SMP	1,00	-0,28	-0,63	-0,13
p-value	0,00	0,18	0,00	0,56
NO ₂ SMP		1,00	0,74	0,81
p-value		0,00	0,00	0,00
NO MO2			1,00	0,80
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Tabla 25: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CRB	NO₂ CRB	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ CRB	1,00	0,27	-0,63	-0,10
p-value	0,00	0,20	0,00	0,64
NO ₂ CRB		1,00	0,28	0,58
p-value		0,00	0,19	0,00
NO MO2			1,00	0,80
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Tabla 26: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ PPD	NO₂ PPD	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ PPD	1,00	0,86	-0,59	-0,06
p-value	0,00	0,00	0,00	0,78
NO ₂ PPD		1,00	-0,31	0,24
p-value		0,00	0,14	0,26
NO MO2			1,00	0,80
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Para el caso de los niveles de O₃ en la estación SMP en invierno, en la Tabla 27 se puede apreciar que este parámetro guarda una correlación negativa significativa con los niveles de NO₂ de la misma estación y con los niveles horarios de NO y NO_x en la estación MO2. Como se puede apreciar, este comportamiento es similar a las estaciones de la zona centro, lo cual guarda relación con la proximidad de esta estación con dicha zona. Sin embargo, para la estación CRB y PPD la falta de p-value inferiores a 0,05 continúan durante el invierno. Al igual que para el verano, se atribuyen estos resultados a la variabilidad y anomalías de la estación MO2 en sus datos de NO₂ los cuales se ven reflejados en sus niveles de NO_x.

Tabla 27: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SMP	NO₂ SMP	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ SMP	1,00	-0,87	-0,42	-0,37
p-value	0,00	0,00	0,04	0,07
NO ₂ SMP		1,00	0,63	0,67
p-value		0,00	0,00	0,00
NO MO2			1,00	0,95
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Tabla 28: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CRB	NO₂ CRB	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ CRB	1,00	-0,30	-0,25	-0,19
p-value	0,00	0,16	0,23	0,37
NO ₂ CRB		1,00	0,37	0,58
p-value		0,00	0,08	0,00
NO MO2			1,00	0,95
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Tabla 29: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ PPD	NO₂ PPD	NO MO2	NO_x MO2
O ₃ PPD	1,00	0,17	-0,23	-0,16
p-value	0,00	0,42	0,28	0,47
NO ₂ PPD		1,00	0,25	0,49
p-value		0,00	0,24	0,02
NO MO2			1,00	0,95
p-value			0,00	0,00
NO _x MO2				1,00
p-value				0,00

Una vez evaluados los coeficientes de correlación, se procedió a realizar la inferencia estadística relacionada con la regresión lineal múltiple. Para ello, se plantearon múltiples hipótesis nulas con sus respectivas hipótesis alternadas de acuerdo a la estación a evaluarse. A continuación, se presenta a manera de ejemplo la inferencia estadística realizada paso a paso para los niveles de O₃ en la estación SBJ en invierno; mientras que, el resto de inferencias estadísticas se presentan en el Anexo 1.

1. Como se observó en la Tabla 22, los niveles de O₃ de la estación SBJ en invierno tuvieron la mejor correlación con los niveles de NO y NO_x de la estación SAT en invierno comparados con los obtenidos para la estación MO1, por lo que, las variables independientes para la evaluación de la influencia de los NO_x sobre la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno fueron los niveles horarios de NO₂ en la

estación SBJ en invierno y los niveles horarios de NO y NO_x en la estación SAT en invierno.

2. Una vez definidas las variables independientes, se procedió a generar el modelo de regresión lineal múltiple estimado específico para la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno, tal como se detalla en la Ecuación (22).

$$O_{3(SBJ)i} = \beta_0 + \beta_1 * NO_{2(SBJ)i} + \beta_2 * NO_{(SAT)i} + \beta_3 * NO_{X(SAT)i} \quad (22)$$

Dónde: $O_{3(SBJ)i}$ es la i-ésima concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno, $NO_{2(SBJ)i}$ es la i-ésima concentración horaria de NO₂ en la estación SBJ en invierno, $NO_{(SAT)i}$ es la i-ésima concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno, $NO_{X(SAT)i}$ es la i-ésima concentración horaria de NO_x en la estación SAT en invierno, β_0 es la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno cuando la concentración horaria de NO₂ en la estación SBJ en invierno y las concentraciones de NO y NO_x en la estación SAT en invierno son todas igual a 0, β_1 es la variación de la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno al haber una variación unitaria de la concentración horaria de NO₂ en la estación SBJ en invierno manteniéndose constante al resto de variables, β_2 es la variación de la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno al haber una variación unitaria de la concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno manteniéndose constante al resto de variables y β_3 es la variación de la concentración horaria de O₃ en la estación SBJ en invierno al haber una variación unitaria de la concentración horaria de NO_x en la estación SAT en invierno manteniéndose constante al resto de variables concentración.

Con la ayuda del *software* Excel, se procedió a obtener las constantes requeridas para la generación de la Ecuación (22). En este sentido, dicha ecuación fue definida tal como se aprecia en la Ecuación (23).

$$O_{3(SBJ)i} = 50,41 - 0,28 * NO_{2(SBJ)i} + 1,09 * NO_{(SAT)i} - 0,76 * NO_{X(SAT)i} \quad (23)$$

3. Una vez definido el modelo de regresión lineal específico para la evaluación, se generó la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alterna (H_a) de la evaluación, de acuerdo a la Ecuación (24) y Ecuación (25), respectivamente.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (24)$$

$$H_a: \text{Al menos un } \beta_i \text{ es diferente a } 0 \quad (25)$$

4. Se estableció un nivel de confianza del 95% y, por lo tanto, un nivel de significación o “ α ” igual a 0,05.
5. El estadístico de prueba utilizado fue el F de Fisher, el cual es calculado de acuerdo a la Ecuación (26).

$$F = CMR/CME \sim F(1-\alpha, k, n-k-1) \quad (26)$$

Dónde: F es el valor F de Fisher calculado, CMR son los cuadrados medios de la regresión, CME son los cuadrados medios del error y $F(1-\alpha, k, n-k-1)$ es el valor F de Fisher tabulado a un nivel de significación de $1-\alpha$ con k grados de libertad de la regresión y $n-k-1$ grados de libertad del error.

Debido a que las variables independientes para esta evaluación son tres (03), el valor de k en este caso es igual a 3 (i.e. igual a la cantidad de variables independientes), y como se utilizó una cantidad de 24 observaciones, el valor de n es 24 (i.e. la cantidad total de observaciones). Por lo tanto, el $F(1-\alpha, k, n-k-1)$ es equivalente a $F(0,95,3,20)$ lo cual es igual a 3,1. Asimismo, el F fue calculado con la ayuda del *software* Excel, el cuál fue igual a 13,12.

6. La regla de decisión fue definida tal como se muestra en la Ecuación (27) y Ecuación (28).

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si } F = 13,12 > F(1 - \alpha, k, n - k - 1) = F(0,95, 3, 20) = 3,1 \quad (27)$$

$$\text{Se acepta } H_0 \text{ si } F = 13,12 \leq F(1 - \alpha, k, n - k - 1) = F(0,95, 3, 20) = 3,1 \quad (28)$$

7. Finalmente, de acuerdo con la regla de decisión definida, se procede a aceptar la H_0 . Por lo tanto, con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horario de O_3 en la estación SBJ en invierno.

8. Como un paso adicional, con ayuda del *software* Excel se obtuvo el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de la regresión lineal múltiple evaluada, la cual fue igual a 0,61. Esto se interpreta como que el 61% de la variabilidad de la concentración horaria de O_3 en la estación SBJ en invierno es explicada por el modelo.

Así, en la Ecuación (29) y Ecuación (30) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O_3 en el verano en las estaciones SBJ y CDM, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,71 y 0,42, respectivamente. Además, se puede apreciar que para ambas estaciones las variables independientes no poseen un mismo signo, lo cual indicaría un efecto diferente de cada NO_x sobre la concentración horaria de O_3 . Sin embargo, se espera que esto se debe al incumplimiento del supuesto de no colinealidad, dado que, como se puede apreciar en la Tabla 20 y Tabla 21, el NO , NO_2 y NO_x poseen un alto coeficiente de correlación. Adicionalmente, se aprecia que los niveles de NO_2 en verano poseen una relación positiva con los niveles de O_3 en verano (i.e. $\beta_1 > 0$), lo cual, como se explicó en las secciones anteriores, se debe a los periodos de bajos niveles de ambos contaminantes que se desarrollan durante la noche y la madrugada que tienen un comportamiento similar.

$$O_{3(SBJ)}i = 7,12 + 1,88*NO_{2(SBJ)}i + 0,29*NO_{(SAT)}i - 0,7*NO_{X(SAT)}i \quad (29)$$

$$O_{3(CDM)}i = -18,28 + 0,99*NO_{2(CDM)}i - 0,84*NO_{(SAT)}i + 0,45*NO_{X(SAT)}i \quad (30)$$

En este sentido, se procedió a mantener solo a las variables independientes que no están relacionadas y volver a plantear el modelo. Para ello, se generaron gráficos de correlación lineal para todas las variables independientes, tal como se aprecia en la Figura 57 y Figura 58. Sin embargo, al estar todas las variables independientes relacionadas, se realizaron modelos de regresión lineal simple para cada una de estas con la concentración horaria de O₃ en la estación evaluada en verano. De entre dichas evaluaciones, las cuales se muestran en el Anexo 2, la única que presentó un sustento estadístico significativo fue la que evaluó los niveles de NO₂ y O₃ en la estación SBJ gracias a su buena correlación como se aprecia en la Figura 57, aunque su coeficiente de determinación es inferior al de la Ecuación (29). Por lo tanto, se espera que los mejores modelos que representan y predicen las concentraciones horarias de O₃ durante el verano en la estación SBJ y CDM son los mostrados en la Ecuación (29) y Ecuación (30), aunque no representan de manera adecuada la influencia individual de cada variable independiente sobre la variable dependiente.

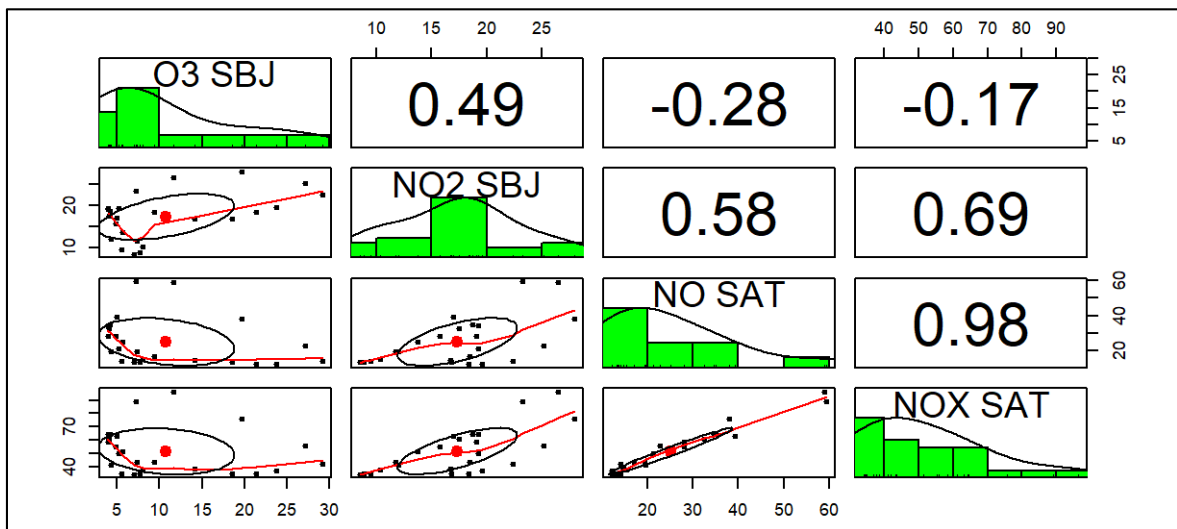


Figura 57: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

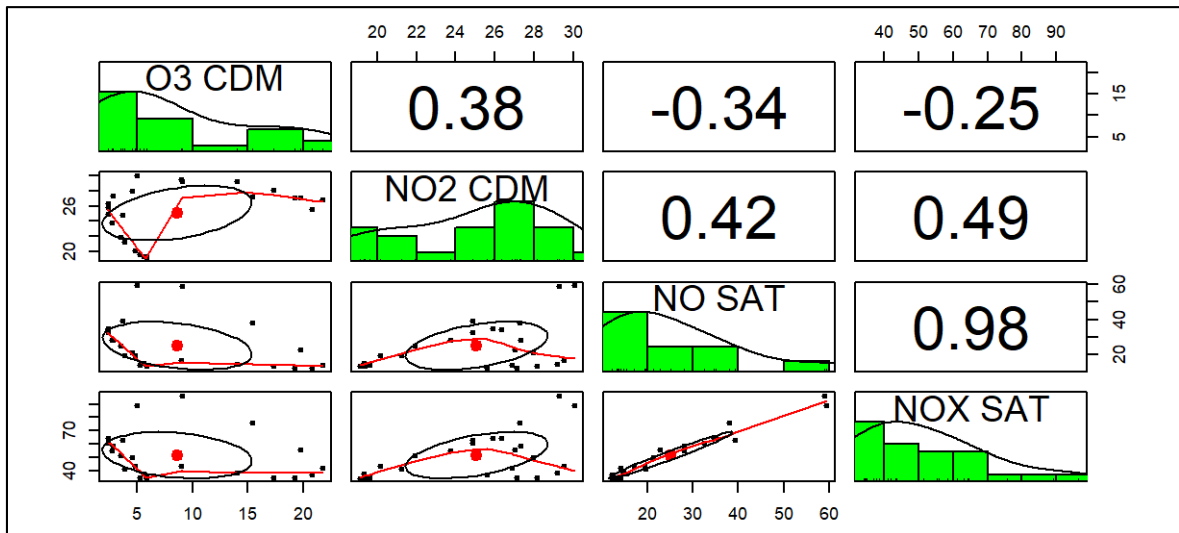


Figura 58: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 59 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SBJ y CDM para el verano generan resultados que comparten cierta similitud con los registros históricos, principalmente en la estación SBJ. Sin embargo, se espera que existan otras variables no tomadas en cuenta que influyen significativamente el comportamiento de estos niveles.

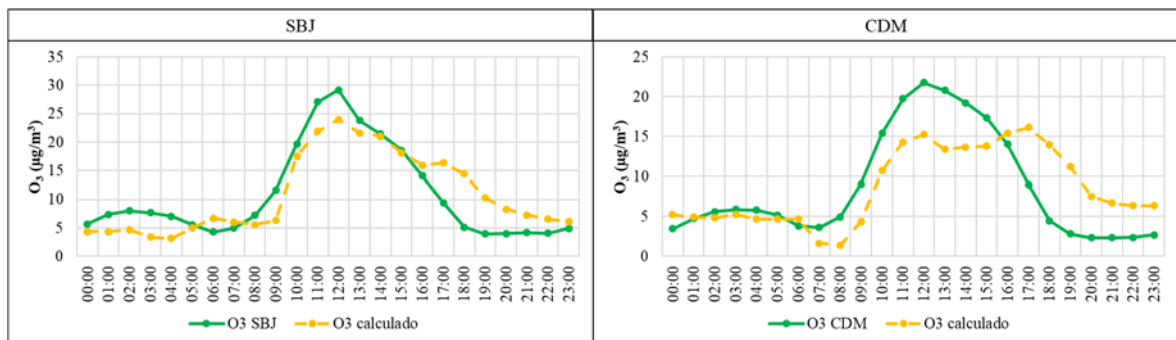


Figura 59: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (31) y Ecuación (32) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el invierno en las estaciones SBJ y CDM, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,61 y 0,78, respectivamente. Además, se puede apreciar que para ambas

estaciones las variables independientes no poseen un mismo signo, lo cual indicaría un efecto diferente de cada NO_x sobre la concentración horaria de O₃. Sin embargo, se espera que esto se debe al incumplimiento del supuesto de no colinealidad, dado que, como se puede apreciar en la Tabla 21 y Tabla 22, el NO, NO₂ y NO_x poseen un alto coeficiente de correlación. Adicionalmente, se aprecia que los niveles de NO₂ en invierno poseen una relación negativa con los niveles de O₃ en invierno (i.e. $\beta_1 < 0$), lo cual, como se explicó en las secciones anteriores, se debe a que durante estos meses el comportamiento bimodal más pronunciado del O₃ genera un comportamiento contrario al bimodal del NO₂.

$$O_{3(SBJ)}i = 50,41 - 0,28 * NO_{2(SBJ)}i + 1,09 * NO_{(SAT)}i - 0,76 * NO_{X(SAT)}i \quad (31)$$

$$O_{3(CDM)}i = 48,05 - 3,02 * NO_{2(CDM)}i + 0,35 * NO_{(SAT)}i + 0,43 * NO_{X(SAT)}i \quad (32)$$

En este sentido, se procedió a mantener solo a las variables independientes que no están relacionadas y volver a plantear el modelo. Para ello, se generaron gráficos de correlación lineal para todas las variables independientes, tal como se aprecia en la Figura 60 y Figura 61. Sin embargo, al estar todas las variables independientes relacionadas, se realizaron modelos de regresión lineal simple para cada una de estas con la concentración horaria de O₃ en la estación evaluada en invierno. De entre dichas evaluaciones, las cuales se muestran en el Anexo 2, todas presentaron un sustento estadístico significativo gracias a su buena correlación como se aprecia en la Figura 60 y Figura 61, aunque sus coeficientes de determinación son inferiores a los de la Ecuación (31) y Ecuación (32). Por lo tanto, se espera que los mejores modelos que representan y predicen las concentraciones horarias de O₃ durante el invierno en la estación SBJ y CDM son los mostrados en la Ecuación (31) y Ecuación (32), aunque no representan de manera adecuada la influencia individual de cada variable independiente sobre la variable dependiente.

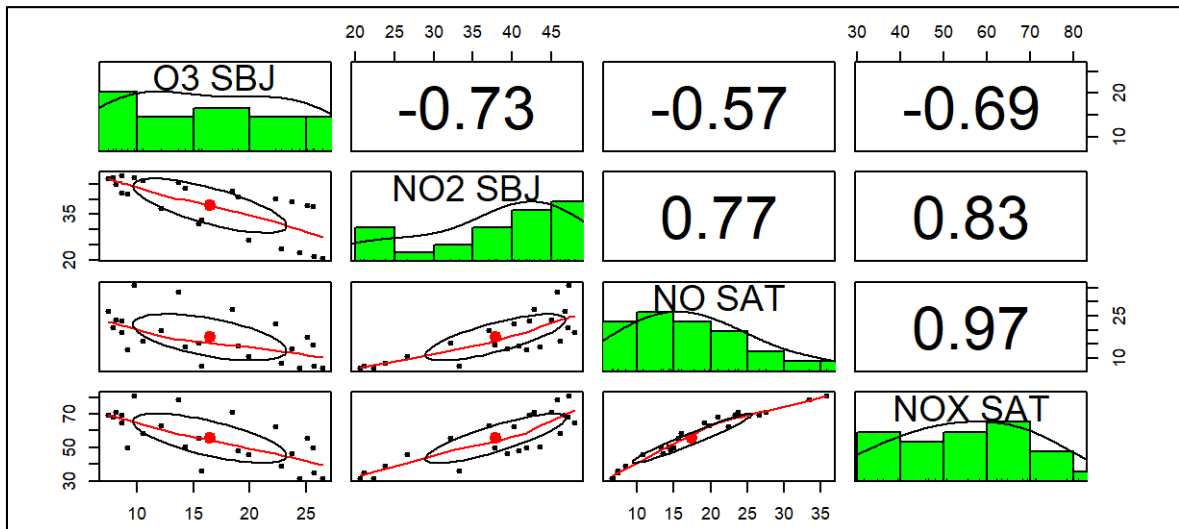


Figura 60: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

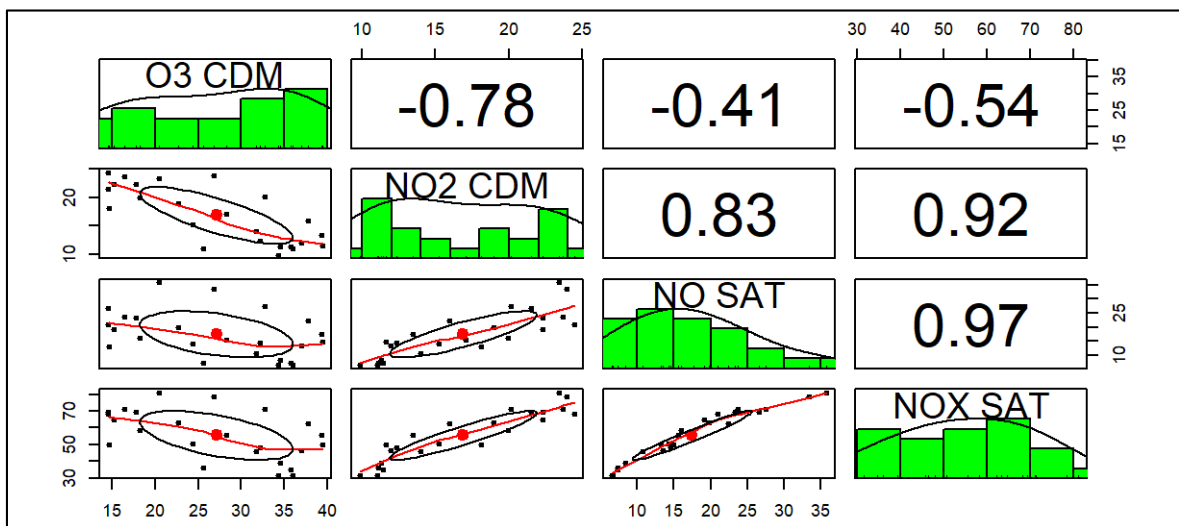


Figura 61: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CDM y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 62 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SBJ y CDM para el invierno generan resultados que comparten cierta similitud con los registros históricos, principalmente en la estación CDM. Sin embargo, se espera que existan otras variables no tomadas en cuenta que influyeran significativamente el comportamiento de estos niveles.

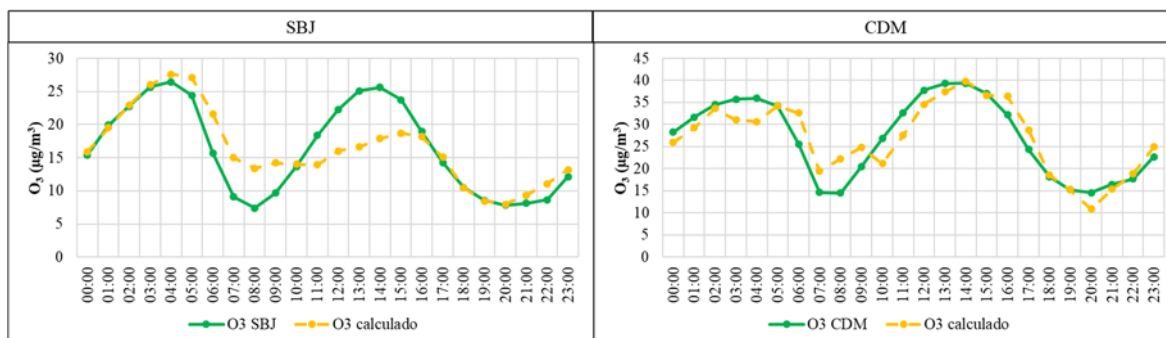


Figura 62: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (33), Ecuación (34) y Ecuación (35) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el verano en las estaciones SMP, CRB y PPD, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R²) ajustado de 0,77, 0,83 y 0,87, respectivamente. Además, se puede apreciar que para todas las estaciones las variables independientes no poseen un mismo signo, lo cual indicaría un efecto diferente de cada NO_x sobre la concentración horaria de O₃. Sin embargo, se espera que esto se debe al incumplimiento del supuesto de no colinealidad, dado que, como se puede apreciar en la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26, el NO, NO₂ y NO_x poseen un alto coeficiente de correlación. Adicionalmente, se aprecia que los niveles de NO₂ en verano poseen una relación positiva con los niveles de O₃ en verano, a excepción de la estación SMP, lo cual, como se explicó en las secciones anteriores, se debe a los periodos de bajos niveles de ambos contaminantes que se desarrollan durante la noche y la madrugada que tienen un comportamiento similar.

$$O_{3(SMP)}i = -1,13 - 0,36 * NO_{2(SMP)}i - 0,93 * NO_{(MO2)}i + 0,85 * NO_{X(MO2)}i \quad (33)$$

$$O_{3(CRB)}i = -15,56 + 0,16 * NO_{2(CRB)}i - 1,87 * NO_{(MO2)}i + 1,55 * NO_{X(MO2)}i \quad (34)$$

$$O_{3(PPD)}i = -8,36 + 0,54 * NO_{2(PPD)}i - 0,67 * NO_{(MO2)}i + 0,48 * NO_{X(MO2)}i \quad (35)$$

En este sentido, se procedió a mantener solo a las variables independientes que no están relacionadas y volver a plantear el modelo. Para ello, se generaron gráficos de correlación lineal para todas las variables independientes, tal como se aprecia en la Figura 63, Figura 64 y Figura 65. Sin embargo, al estar todas las variables independientes relacionadas, se realizaron modelos de regresión lineal simple para cada una de estas con la concentración horaria de O₃ en la estación evaluada en verano. De entre dichas evaluaciones, las cuales se muestran en el Anexo 2, las que toman en cuenta a los niveles de NO horario presentaron un sustento estadístico significativo gracias a su buena correlación como se aprecia en la Figura 63, Figura 64 y Figura 65, aunque sus coeficientes de determinación son inferiores a los de la Ecuación (33), Ecuación (34) y Ecuación (35). Por lo tanto, se espera que los mejores modelos que representan y predicen las concentraciones horarias de O₃ durante el verano en la estación SMP, CRB y PPD son los mostrados en la Ecuación (33), Ecuación (34) y Ecuación (35), aunque no representan de manera adecuada la influencia individual de cada variable independiente sobre la variable dependiente.

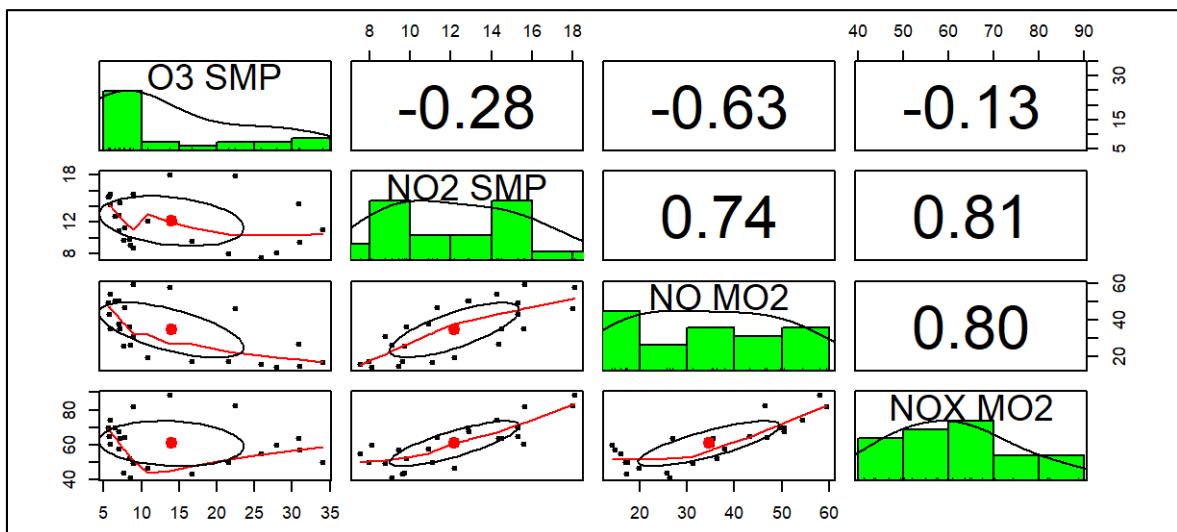


Figura 63: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

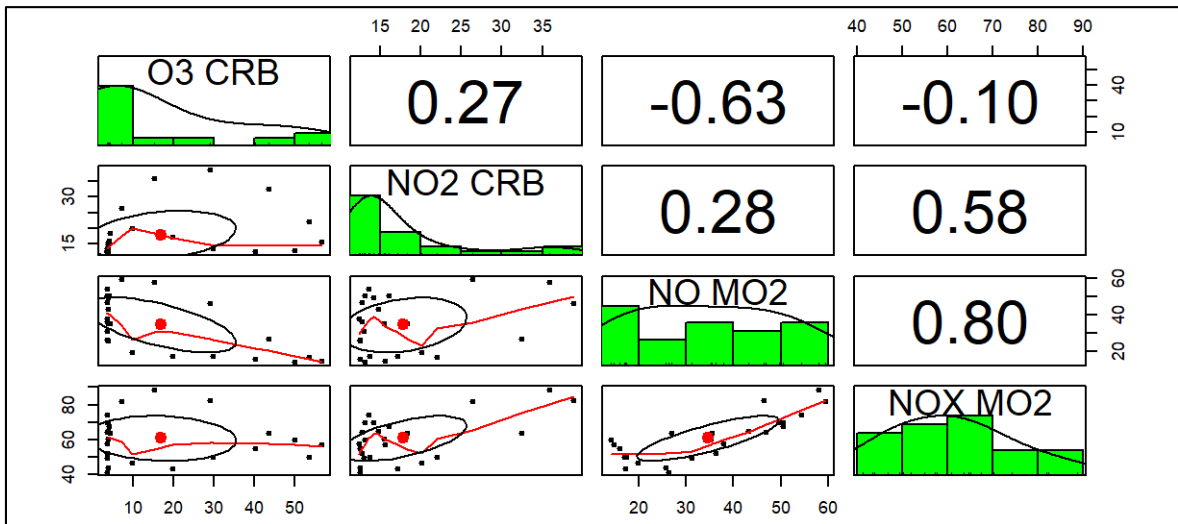


Figura 64: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

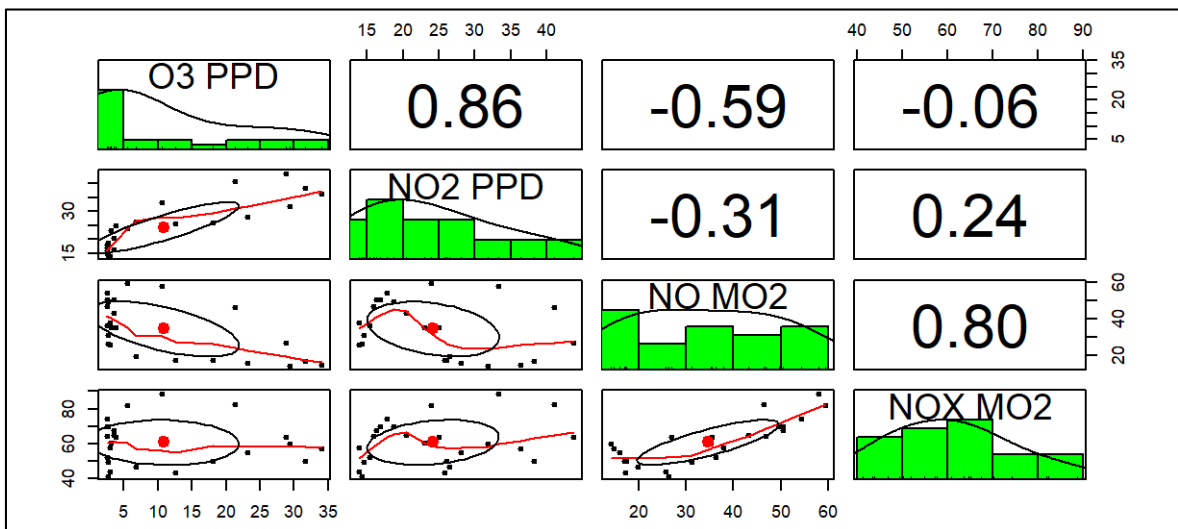


Figura 65: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 66 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SMP, CRB y PPD para el verano generan resultados que comparten cierta similitud con los registros históricos, principalmente en la estación PPD. Sin embargo, se espera que existan otras variables no tomadas en cuenta que influyen significativamente el comportamiento de estos niveles.

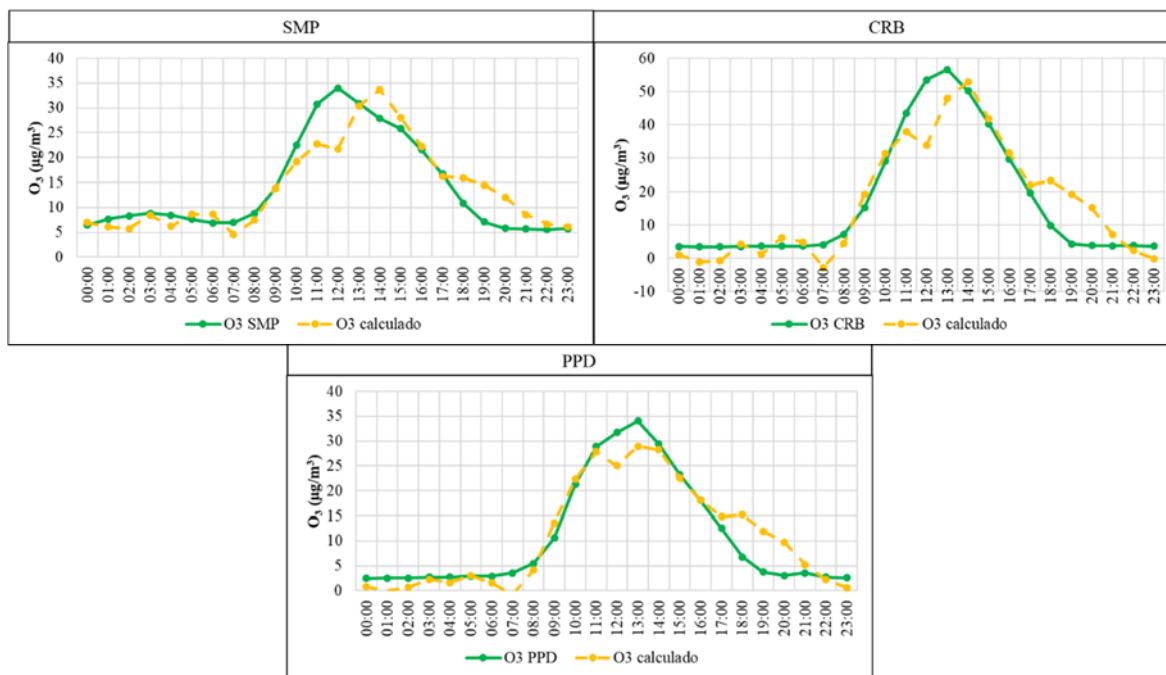


Figura 66: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (36), Ecuación (37) y Ecuación (38) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el invierno en las estaciones SMP, CRB y PPD, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,88, 0,37 y -0,02, respectivamente. Además, se puede apreciar que para todas las estaciones las variables independientes no poseen un mismo signo, lo cual indicaría un efecto diferente de cada NO_x sobre la concentración horaria de O₃. Sin embargo, se espera que esto se debe al incumplimiento del supuesto de no colinealidad, dado que, como se puede apreciar en la Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 29, el NO, NO₂ y NO_x poseen un alto coeficiente de correlación. Adicionalmente, se aprecia que los niveles de NO₂ en invierno poseen una relación negativa con los niveles de O₃ en invierno, a excepción de la estación PPD, lo cual, como se explicó en las secciones anteriores, se debe a los periodos de bajos niveles de ambos contaminantes que se desarrollan durante la noche y la madrugada que tienen un comportamiento similar.

$$O_{3(SMP)i} = 31,16 - 2,04 * NO_{2(SMP)i} - 1 * NO_{(MO2)i} + 1,02 * NO_{X(MO2)i} \quad (36)$$

$$O_{3(CRB)}i = -15,7 -5,09*NO_{2(CRB)}i -6,23*NO_{(MO2)}i +4,85*NO_{X(MO2)}i \quad (37)$$

$$O_{3(PPD)}i = 2,31 +0,4*NO_{2(PPD)}i -0,54*NO_{(MO2)}i +0,13*NO_{X(MO2)}i \quad (38)$$

En este sentido, se procedió a mantener solo a las variables independientes que no están relacionadas y volver a plantear el modelo. Para ello, se generaron gráficos de correlación lineal para todas las variables independientes, tal como se aprecia en la Figura 67, Figura 68 y Figura 69. Sin embargo, al estar todas las variables independientes relacionadas, se realizaron modelos de regresión lineal simple para cada una de estas con la concentración horaria de O₃ en la estación evaluada en invierno. De entre dichas evaluaciones, las cuales se muestran en el Anexo 2, las que toman en cuenta a los niveles de NO y NO_x horario para los niveles de O₃ en la estación SMP presentaron un sustento estadístico significativo gracias a su buena correlación como se aprecia en la Figura 67, Figura 68 y Figura 69, aunque sus coeficientes de determinación son inferiores a los de la Ecuación (36), Ecuación (37) y Ecuación (38). Por lo tanto, se espera que los mejores modelos que representan y predicen las concentraciones horarias de O₃ durante el invierno en la estación SMP, CRB y PPD son los mostrados en la Ecuación (36), Ecuación (37) y Ecuación (38), aunque no representan de manera adecuada la influencia individual de cada variable independiente sobre la variable dependiente.

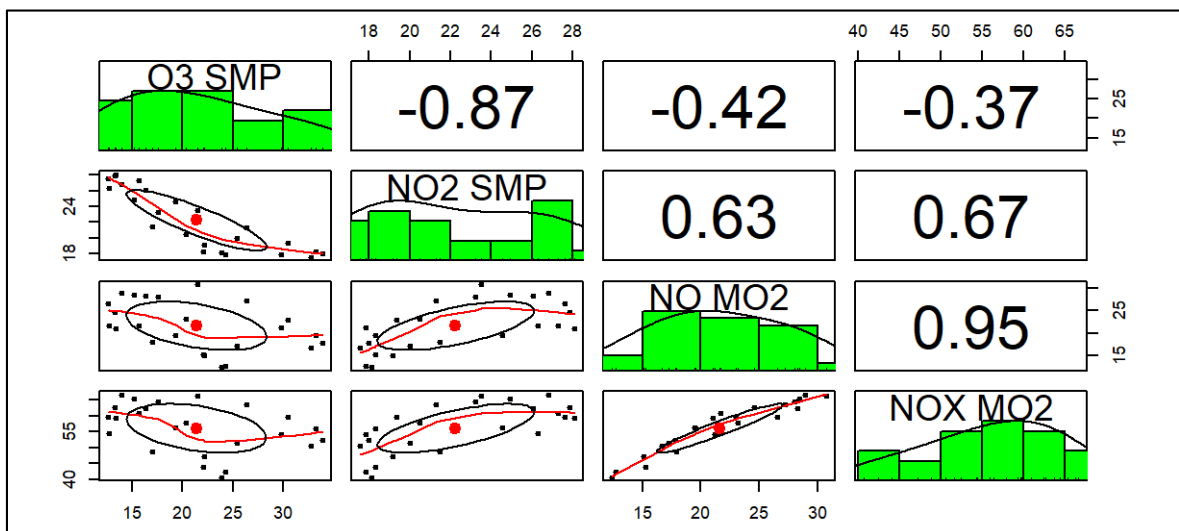


Figura 67: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

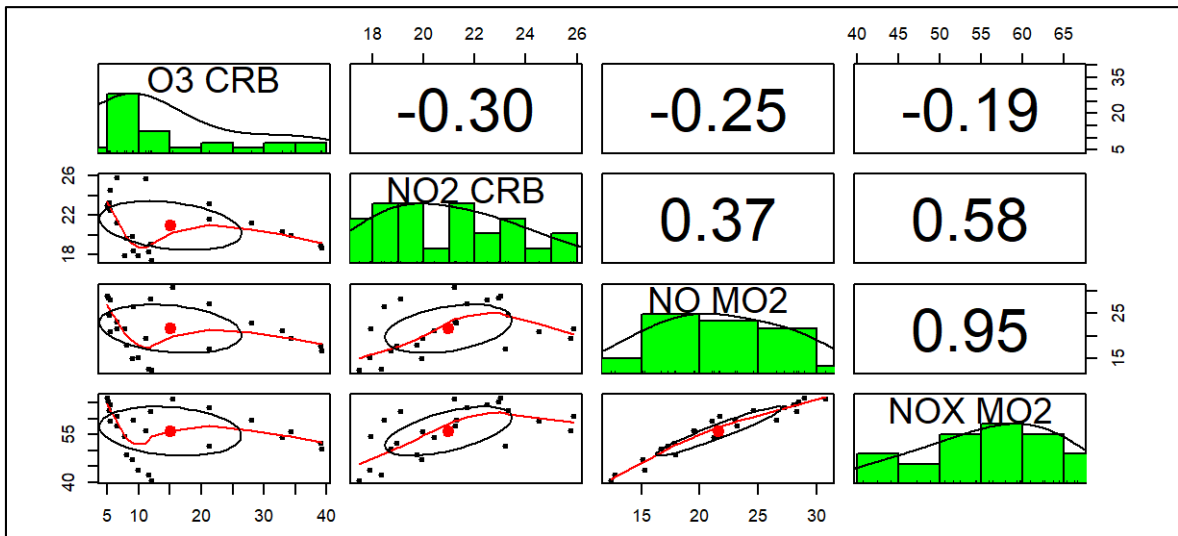


Figura 68: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

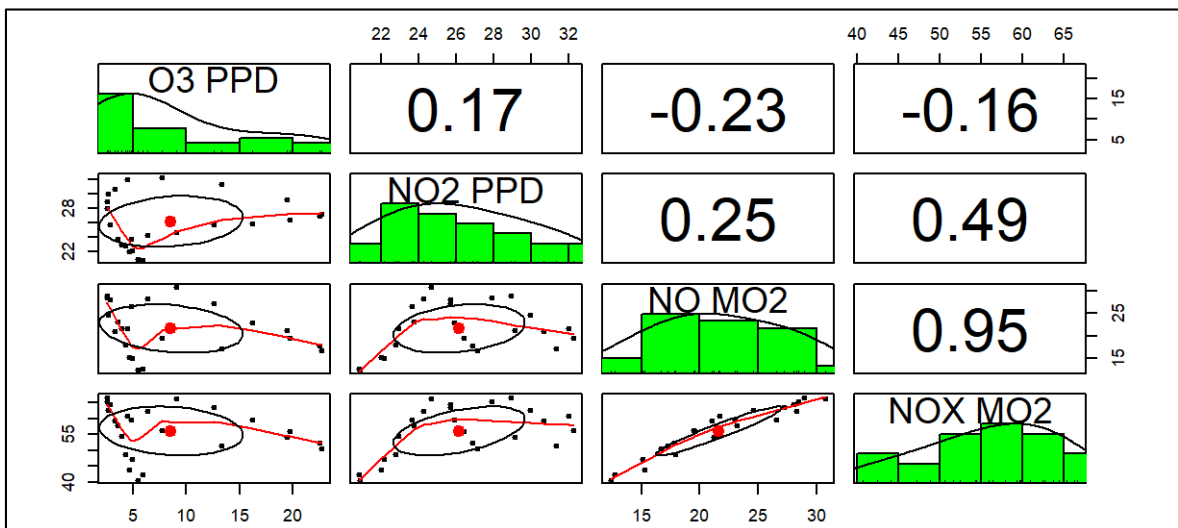


Figura 69: Correlación entre el O₃ y los óxidos de nitrógeno en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 70 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SMP, CRB y PPD para el invierno generan resultados que comparten cierta similitud con los registros históricos, principalmente en la estación SMP. Sin embargo, se espera que existan otras variables no tomadas en cuenta que influyeran significativamente el comportamiento de estos niveles.

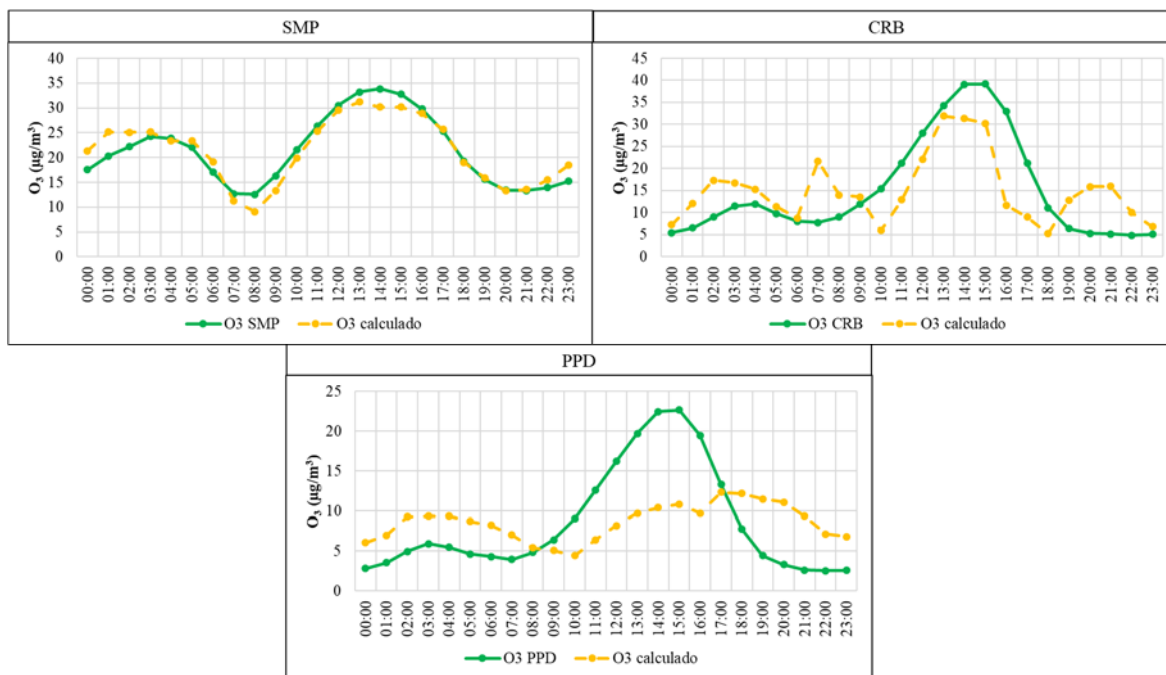


Figura 70: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

Por lo visto en la presente sección, se espera que tanto para la zona centro como para la zona norte de Lima Metropolitana los niveles de O₃ se vean influenciados en diferentes magnitudes por los NO_x de acuerdo a la ubicación y a la estación del año. Asimismo, se espera que existan otras variables como los parámetros meteorológicos que influyen en mayor medida a los niveles horarios de O₃ en las estaciones evaluadas.

Finalmente, los modelos que mejor predicen los niveles horarios de O₃ para las estaciones evaluadas son los que toman en cuenta a todos los NO_x, aunque, tal como se vio en el estudio de Roberts *et al.* (2012), no reflejan individualmente la influencia de cada uno de estos sobre el O₃. En dicho estudio, se obtuvo que los niveles horarios de O₃ varían en 0,059 al haber una variación unitaria de los niveles horarios de NO₂ y en -0,253 al haber una variación unitaria de los niveles horarios de NO. Sin embargo, los niveles de NO₂ y NO se correlacionaban, por lo que, a pesar de que el modelo predecía de manera adecuada los niveles horarios de O₃, se apreciaba una incoherencia entre los signos de los coeficientes del NO₂ y del NO.

4.4 Determinación de la influencia de la temperatura del aire y la radiación solar en la concentración de los NO_x y O₃ en las zonas norte y centro de Lima Metropolitana durante los años 2015 – 2018.

Con el fin de medir la influencia de los parámetros meteorológicos sobre el O₃ y el NO_x, se procedió a realizar un análisis gráfico descriptivo y un análisis de correlación para finalmente generar una regresión lineal múltiple entre estos parámetros, tal como se desarrolló en las secciones anteriores. Así, en la Figura 71 se aprecia la variación horaria de la temperatura y en la Figura 72 se aprecia la variación horaria de la radiación solar para las estaciones que registran estos parámetros en la zona centro y norte de Lima Metropolitana.

Para ambos parámetros meteorológicos, se ha observado que su comportamiento horario es usual, aumentando durante la salida del sol y disminuyendo una vez ocurrida la puesta de sol. Además, la temperatura del aire para la zona norte y centro posee magnitudes similares, llegando a valores de 15 °C durante los meses de invierno y de 25 a 30 °C durante los meses de verano. Por su lado, la radiación solar también es similar para la zona norte y centro, variando de mínimos de 300 W/m² en los meses de invierno hasta máximos entre 300 y 900 W/m² para los meses de verano.

Cabe señalar que, en el caso de la temperatura del aire de la estación SBJ, no se contó con información para las 12:00 p.m., por lo que se realizó un promedio entre los valores de las 11:00 a.m. y la 01:00 p.m. para obtener dicho dato faltante en todos los meses.

Conociendo el comportamiento horario de los parámetros meteorológicos, se procedió a calcular los coeficientes de correlación de Pearson entre estos parámetros y los gases evaluados. Cabe señalar que, este análisis, así como la regresión lineal múltiple, se realizó de manera diferenciada para el verano (febrero) y el invierno (agosto).

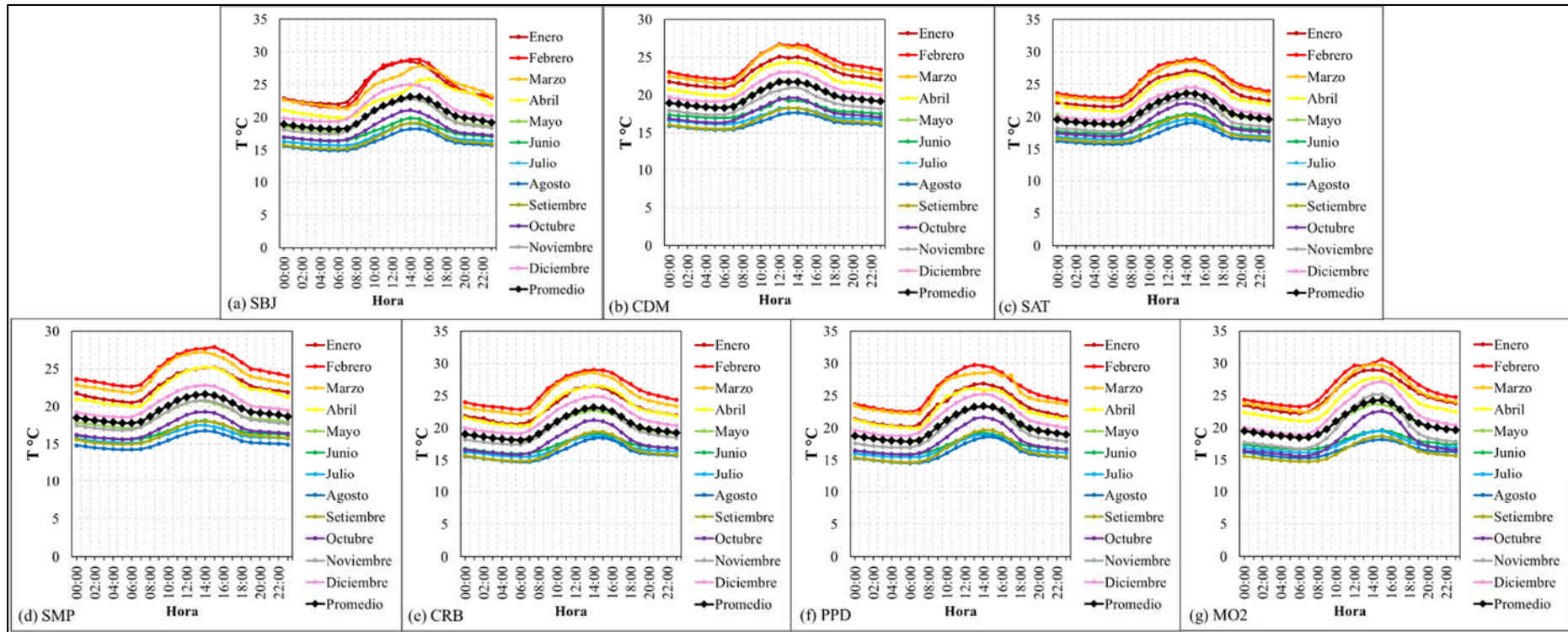


Figura 71: Variación horaria mensual de la temperatura del aire para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

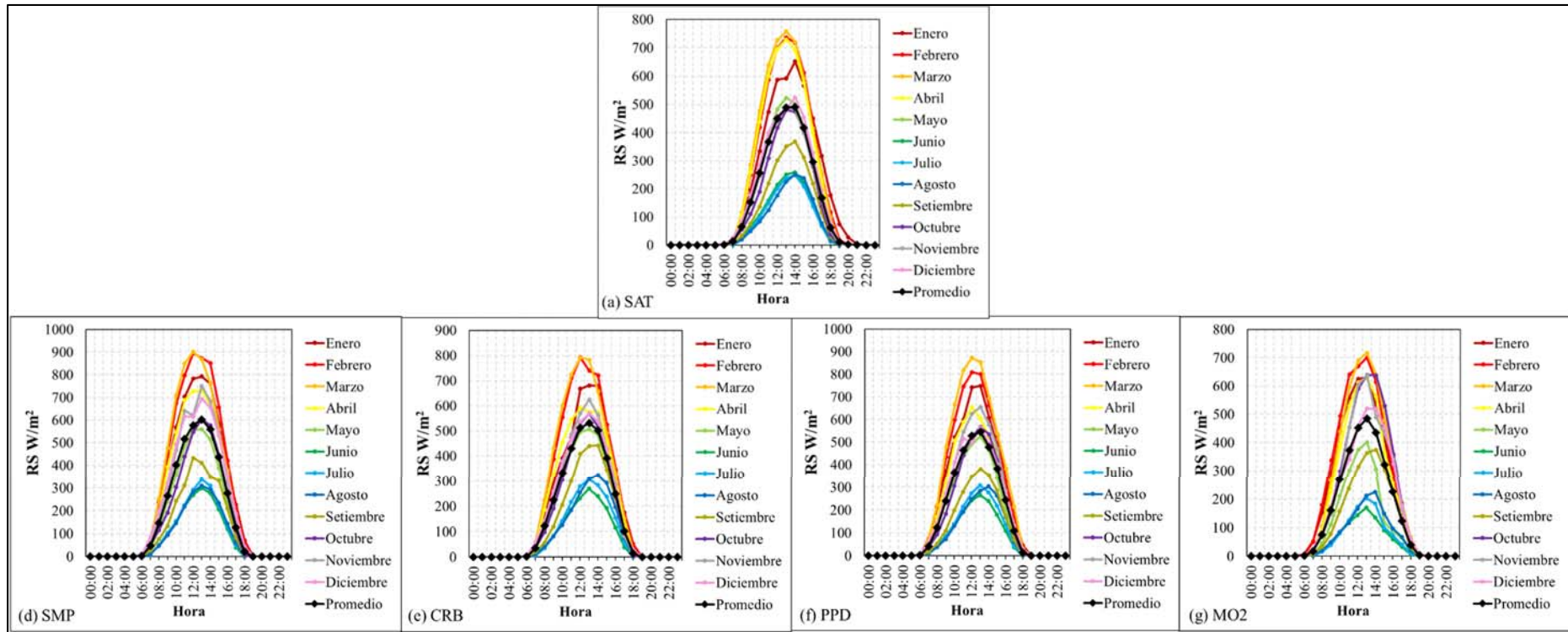


Figura 72: Variación horaria mensual de la radiación solar para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del área de estudio durante el periodo 2015-2018.

Para el caso de los niveles de O₃ durante el verano en la estación SBJ y CDM, guardan una correlación positiva con la temperatura del aire y la radiación solar, tal como se aprecia en la Tabla 30 y Tabla 31, respectivamente. Esta alta correlación positiva se debe a que la generación de este gas se desarrolla a partir de reacciones fotoquímicas (i.e. por acción de la luz del sol) (Adyani *et al.*, 2009; Bell *et al.*, 2013; Gasmi *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2017; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Morena, 2006; Roberts *et al.*, 2012; Vilorio, 2008). Por otro lado, los niveles de NO₂ en dichas estaciones también guardan una relación positiva con los parámetros meteorológicos evaluados, aunque en menor medida que para el O₃. Sin embargo, el NO y NO_x no presentaron p-value significativos, por lo que se espera que no tengan una relación significativa con los parámetros meteorológicos al estar influenciados principalmente por el comportamiento del tráfico vehicular.

Tabla 30: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SBJ	NO₂ SBJ	NO SAT	NO_x SAT	T SBJ	RS SAT
O ₃ SBJ	1,00	0,49	-0,28	-0,17	0,81	0,95
p-value	0,00	0,01	0,19	0,43	0,00	0,00
NO ₂ SBJ		1,00	0,58	0,69	0,59	0,51
p-value		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
NO SAT			1,00	0,98	-0,24	-0,28
p-value			0,00	0,00	0,26	0,19
NO _x SAT				1,00	-0,12	-0,18
p-value				0,00	0,58	0,39
T SBJ					1,00	0,92
p-value					0,00	0,00
RS SAT						1,00
p-value						0,00

Tabla 31: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CDM	NO₂ CDM	NO SAT	NO_x SAT	T CDM	RS SAT
O ₃ CDM	1,00	0,38	-0,34	-0,25	0,86	0,98
p-value	0,00	0,06	0,10	0,25	0,00	0,00
NO ₂ CDM		1,00	0,42	0,49	0,70	0,51
p-value		0,00	0,04	0,01	0,00	0,01
NO SAT			1,00	0,98	-0,2	-0,28
p-value			0,00	0,00	0,35	0,19
NO _x SAT				1,00	-0,08	-0,18
p-value				0,00	0,72	0,39
T CDM					1,00	0,92
p-value					0,00	0,00
RS SAT						1,00
p-value						0,00

Para el caso de los niveles de O₃ durante el invierno en la estación SBJ y CDM, a diferencia que para el verano, estos no guardan una buena correlación con la temperatura del aire y la radiación solar, tal como se aprecia en la Tabla 32 y Tabla 33, respectivamente. Esto se debe al comportamiento bimodal más pronunciado que posee el O₃ durante el invierno, lo cual genera que exista una influencia significativa sobre sus niveles relacionada con el transporte de dicho gas a partir de otras capas de la atmósfera. Por otro lado, los niveles de NO₂, NO y NO_x en dichas estaciones tampoco guardan una buena relación con los parámetros meteorológicos y, como para el verano, se espera que se deba a que están influenciados principalmente por el comportamiento del tráfico vehicular.

Tabla 32: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SBJ	NO₂ SBJ	NO SAT	NO_x SAT	T SBJ	RS SAT
O ₃ SBJ	1,00	-0,73	-0,57	-0,69	0,28	0,49
p-value	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,02
NO ₂ SBJ		1,00	0,77	0,83	0,39	0,21
p-value		0,00	0,00	0,00	0,06	0,32
NO SAT			1,00	0,97	0,19	0,14
p-value			0,00	0,00	0,38	0,53
NO _x SAT				1,00	0,18	0,05
p-value				0,00	0,41	0,82
T SBJ					1,00	0,91
p-value					0,00	0,00
RS SAT						1,00
p-value						0,00

Tabla 33: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CDM	NO₂ CDM	NO SAT	NO_x SAT	T CDM	RS SAT
O ₃ CDM	1,00	-0,78	-0,41	-0,54	0,39	0,59
p-value	0,00	0,00	0,05	0,01	0,06	0,00
NO ₂ CDM		1,00	0,83	0,92	-0,02	-0,28
p-value		0,00	0,00	0,00	0,93	0,18
NO SAT			1,00	0,97	0,29	0,14
p-value			0,00	0,00	0,17	0,53
NO _x SAT				1,00	0,28	0,05
p-value				0,00	0,19	0,82
T CDM					1,00	0,92
p-value					0,00	0,00
RS SAT						1,00
p-value						0,00

Para el caso de los niveles de O₃ durante el verano en la estación SMP, CRB y PPD, guardan una correlación positiva con la temperatura del aire y la radiación solar, tal como se aprecia en la Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36, respectivamente. Esta alta correlación positiva se debe a que la generación de este gas se desarrolla a partir de reacciones fotoquímicas (i.e. por acción de la luz del sol) (Adyani *et al.*, 2009; Bell *et al.*, 2013; Gasmi *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2017; Kovač-Andrić *et al.*, 2013; Morena, 2006; Roberts

et al., 2012; Vilorio, 2008). Por otro lado, los niveles de NO₂ en dichas estaciones también guardan una relación positiva con los parámetros meteorológicos evaluados, aunque en menor medida que para el O₃. Sin embargo, el NO y NO_x no presentaron p-value significativos, por lo que se espera que no tengan una relación significativa con los parámetros meteorológicos al estar influenciados principalmente por el comportamiento del tráfico vehicular. Asimismo, esta relación positiva del NO₂, lo cual también se observó en las estaciones de la zona centro, se puede relacionar al primer pico del tráfico vehicular que coincide parcialmente con las horas de mayor radiación solar, lo cual se ha podido observar en otros estudios (Roberts *et al.*, 2012). Cabe mencionar que, el comportamiento relacionado con la estación MO2 se espera que haya sido causado por las anomalías presentadas para esta estación durante el verano más que por su comportamiento promedio, el cual se espera que esté relacionado principalmente con el tráfico vehicular.

Tabla 34: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SMP	NO₂ SMP	NO MO2	NO_x MO2	T SMP	RS SMP
O ₃ SMP	1,00	-0,28	-0,63	-0,13	0,86	0,97
p-value	0,00	0,18	0,00	0,56	0,00	0,00
NO ₂ SMP		1,00	0,74	0,81	-0,16	-0,12
p-value		0,00	0,00	0,00	0,45	0,56
NO MO2			1,00	0,80	-0,61	-0,47
p-value			0,00	0,00	0,00	0,02
NO _x MO2				1,00	-0,06	0,08
p-value				0,00	0,77	0,71
T SMP					1,00	0,84
p-value					0,00	0,00
RS SMP						1,00
p-value						0,00

Tabla 35: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CRB	NO₂ CRB	NO MO2	NO_x MO2	T CRB	RS CRB
O ₃ CRB	1,00	0,27	-0,63	-0,10	0,88	0,97
p-value	0,00	0,20	0,00	0,64	0,00	0,00
NO ₂ CRB		1,00	0,28	0,58	0,32	0,47
p-value		0,00	0,19	0,00	0,13	0,02
NO MO2			1,00	0,80	-0,60	-0,45
p-value			0,00	0,00	0,00	0,03
NO _x MO2				1,00	-0,05	0,09
p-value				0,00	0,81	0,67
T CRB					1,00	0,84
p-value					0,00	0,00
RS CRB						1,00
p-value						0,00

Tabla 36: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ PPD	NO₂ PPD	NO MO2	NO_x MO2	T PPD	RS PPD
O ₃ PPD	1,00	0,86	-0,59	-0,06	0,88	0,98
p-value	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00
NO ₂ PPD		1,00	-0,31	0,24	0,85	0,89
p-value		0,00	0,14	0,26	0,00	0,00
NO MO2			1,00	0,80	-0,60	-0,45
p-value			0,00	0,00	0,00	0,03
NO _x MO2				1,00	-0,05	0,09
p-value				0,00	0,81	0,67
T PPD					1,00	0,84
p-value					0,00	0,00
RS PPD						1,00
p-value						0,00

Para el caso de los niveles de O₃ durante el invierno en la estación SMP, CRB y PPD, a diferencia que para la zona centro, estos continúan guardando una buena relación con la temperatura del aire y la radiación solar, tal como se aprecia en la Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39, respectivamente. Esto se debe al comportamiento bimodal menos pronunciado que posee el O₃ durante el invierno. Por otro lado, los niveles de NO₂, NO y NO_x en dichas estaciones tampoco guardan una buena relación con los parámetros meteorológicos y,

como para el verano, se espera que se deba a que están influenciados principalmente por el comportamiento del tráfico vehicular.

Tabla 37: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ SMP	NO₂ SMP	NO MO2	NO_x MO2	T SMP	RS SMP
O ₃ SMP	1,00	-0,87	-0,42	-0,37	0,75	0,80
p-value	0,00	0,00	0,04	0,07	0,00	0,00
NO ₂ SMP		1,00	0,63	0,67	-0,34	-0,46
p-value		0,00	0,00	0,00	0,10	0,02
NO MO2			1,00	0,95	0,06	0,04
p-value			0,00	0,00	0,77	0,85
NO _x MO2				1,00	0,21	0,10
p-value				0,00	0,31	0,65
T SMP					1,00	0,88
p-value					0,00	0,00
RS SMP						1,00
p-value						0,00

Tabla 38: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O₃ CRB	NO₂ CRB	NO MO2	NO_x MO2	T CRB	RS CRB
O ₃ CRB	1,00	-0,30	-0,25	-0,19	0,89	0,96
p-value	0,00	0,16	0,23	0,37	0,00	0,00
NO ₂ CRB		1,00	0,37	0,58	0,16	-0,25
p-value		0,00	0,08	0,00	0,46	0,24
NO MO2			1,00	0,95	-0,04	-0,03
p-value			0,00	0,00	0,87	0,89
NO _x MO2				1,00	0,12	0,03
p-value				0,00	0,56	0,89
T CRB					1,00	0,87
p-value					0,00	0,00
RS CRB						1,00
p-value						0,00

Tabla 39: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

	O ₃ PPD	NO ₂ PPD	NO MO2	NO _x MO2	T PPD	RS PPD
O ₃ PPD	1,00	0,17	-0,23	-0,16	0,91	0,95
p-value	0,00	0,42	0,28	0,47	0,00	0,00
NO ₂ PPD		1,00	0,25	0,49	0,52	0,10
p-value		0,00	0,24	0,02	0,01	0,64
NO MO2			1,00	0,95	-0,04	-0,03
p-value			0,00	0,00	0,87	0,89
NO _x MO2				1,00	0,12	0,03
p-value				0,00	0,56	0,89
T PPD					1,00	0,87
p-value					0,00	0,00
RS PPD						1,00
p-value						0,00

Adicionalmente, se generaron gráficas comparativas de los seis (06) parámetros evaluadas, las cuales se aprecian de la Figura 73 a la Figura 77 diferenciando los registros de verano e invierno.

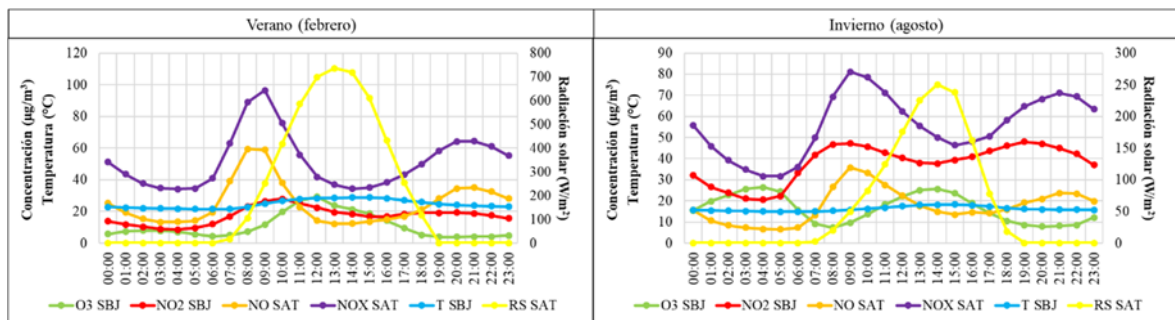


Figura 73: Relación entre los NO_x, el O₃, la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones SBJ y SAT durante el periodo 2015-2018.

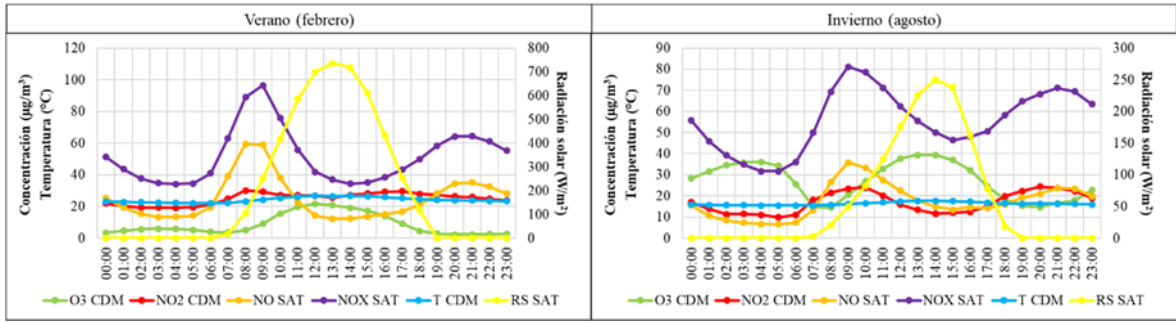


Figura 74: Relación entre los NO_x, el O₃, la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones CDM y SAT durante el periodo 2015-2018.

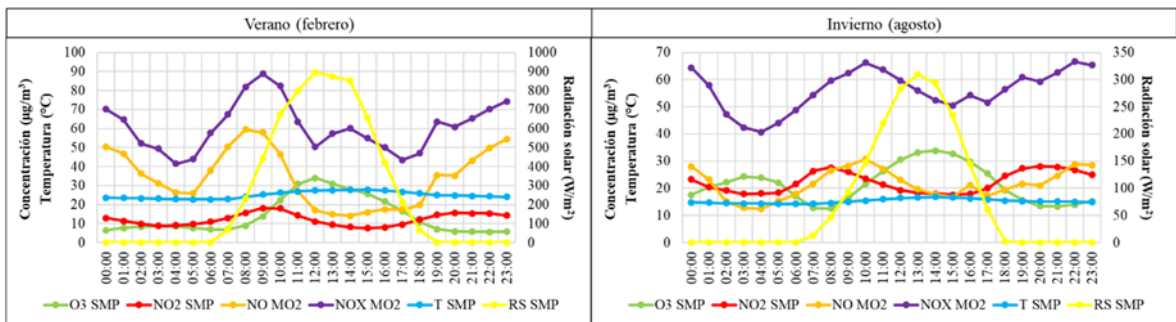


Figura 75: Relación entre los NO_x, el O₃, la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones SMP y MO2 durante el periodo 2015-2018.

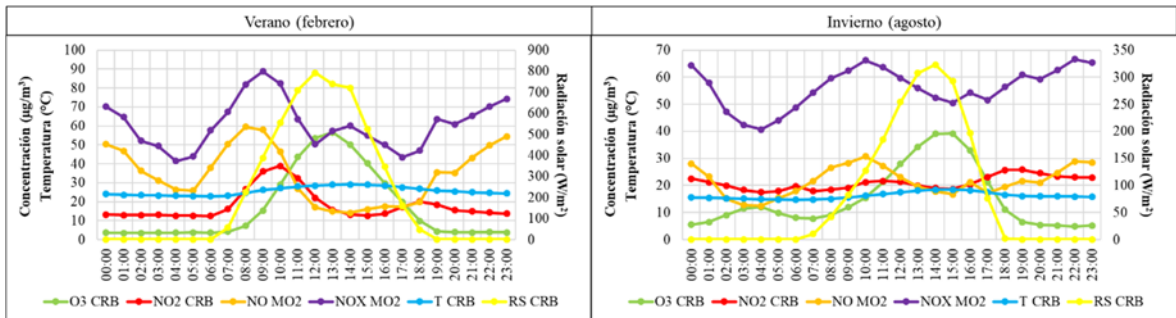


Figura 76: Relación entre los NO_x, el O₃, la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones CRB y MO2 durante el periodo 2015-2018.

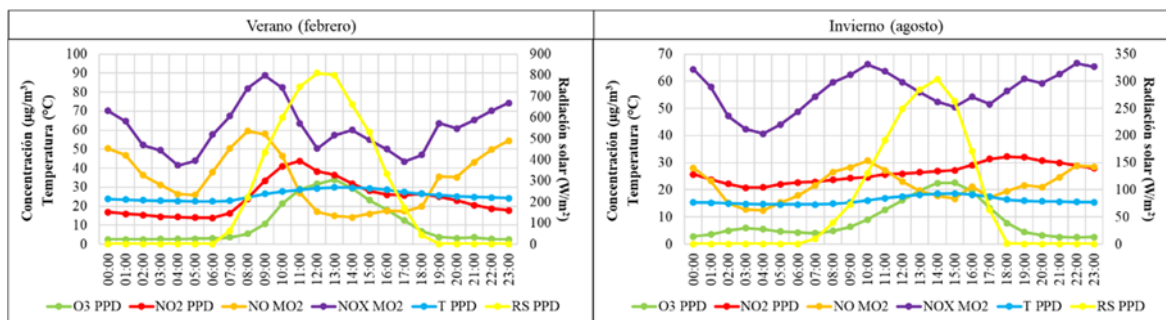


Figura 77: Relación entre los NO_x, el O₃, la temperatura del aire y la radiación solar en las estaciones PPD y MO2 durante el periodo 2015-2018.

Una vez evaluados los coeficientes de correlación y el comportamiento de los parámetros meteorológicos, se generaron las ecuaciones de regresión lineal múltiple para cada estación que registra O₃ y NO_x tomando en cuenta si los registros son de verano o invierno, tal como se realizó en la sección anterior. Asimismo, se tomó en cuenta los resultados de dicha sección en cuanto a la mejor relación observada con respecto al NO y NO_x para las estaciones que no registran dichos parámetros. La totalidad de dichas inferencias estadísticas se presentan en el Anexo 3.

Así, en la Ecuación (39) y Ecuación (40) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el verano en las estaciones SBJ y CDM, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,97 y 0,99, respectivamente. Además, en cuanto a los parámetros meteorológicos, en ambas ecuaciones se aprecia una influencia positiva con respecto a la radiación solar y negativa con respecto a la temperatura. Como se mencionó previamente, se espera que el valor negativo de la temperatura del aire se deba a que es un parámetro que depende muy estrechamente de la radiación solar y, por lo tanto, ocasiona este tipo de resultados en estos análisis al no cumplir el supuesto de no colinealidad. Asimismo, se aprecia que el NO, NO₂ y NO_x guardan una relación diferente con el O₃ comparado al de la Ecuación (29) y Ecuación (30), lo cual es producido también por esto último mencionado.

Por otro lado, en la Ecuación (41) y Ecuación (42) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple para los niveles de NO_x en verano en las estaciones SAT y MO1,

respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de -0,05 y -0,02, respectivamente. Estos bajos coeficientes se deben a que los NO_x están más relacionados con el tráfico vehicular que con los parámetros meteorológicos para esta zona.

$$O_{3(SBJ)}i = 40,41 - 0,04*NO_{2(SBJ)}i - 0,9*NO_{(SAT)}i + 0,7*NO_{X(SAT)}i - 2,09*T_{(SBJ)}i + 0,04*RS_{(SAT)}i \quad (39)$$

$$O_{3(CDM)}i = 45,3 + 0,01*NO_{2(CDM)}i - 0,43*NO_{(SAT)}i + 0,31*NO_{X(SAT)}i - 2,03*T_{(CDM)}i + 0,03*RS_{(SAT)}i \quad (40)$$

$$NO_{X(SAT)}i = 15,13 + 1,63*T_{(SAT)}i - 0,02*RS_{(SAT)}i \quad (41)$$

$$NO_{X(MOI)}i = -73,07 + 5,66*T_{(CDM)}i - 0,04*RS_{(SAT)}i \quad (42)$$

En este sentido, se procedió a mantener solo a las variables independientes que no están relacionadas y volver a plantear el modelo. Para ello, se generaron gráficos de correlación lineal para todas las variables independientes, tal como se aprecia en la Figura 78 y Figura 79. Por ello, se realizaron modelos de regresión lineal múltiple usando los valores de NO_x y radiación solar horario con la concentración horaria de O_3 en la estación evaluada en verano. De entre dichas evaluaciones, las cuales se muestran en el Anexo 4, todas presentaron un sustento estadístico significativo. Aún más, en la totalidad de modelos se obtuvo una influencia negativa por parte de los NO_x y una influencia positiva por parte de la radiación solar sobre los niveles de O_3 , lo cual se relaciona con el consumo de NO_x como precursores para formar O_3 y por el requerimiento de radiación solar para que se desarrolle dicha reacción (Jasaitis, Vasiliauskiene, Chadysiene & Peciuliene, 2016; Milena *et al.*, 2014). Por lo tanto, si bien los modelos presentados en la Ecuación (39) y Ecuación (40) poseen un mayor coeficiente de determinación comparado a los modelos que solo toman en cuenta a los NO_x y la radiación solar, los primeros no muestran la

verdadera influencia individual de dichos parámetros sobre el O₃, a diferencia de los segundos.

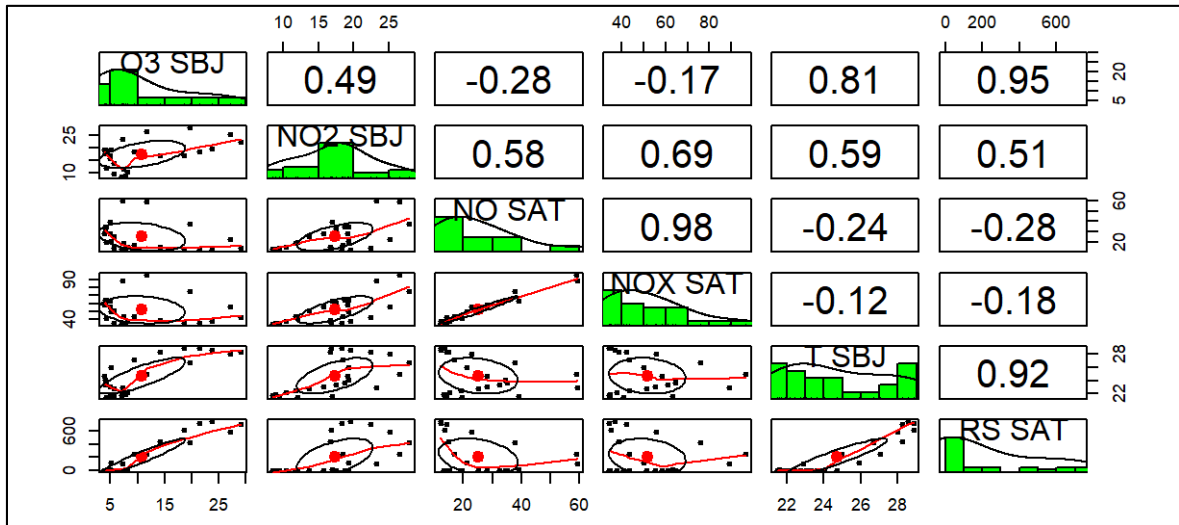


Figura 78: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

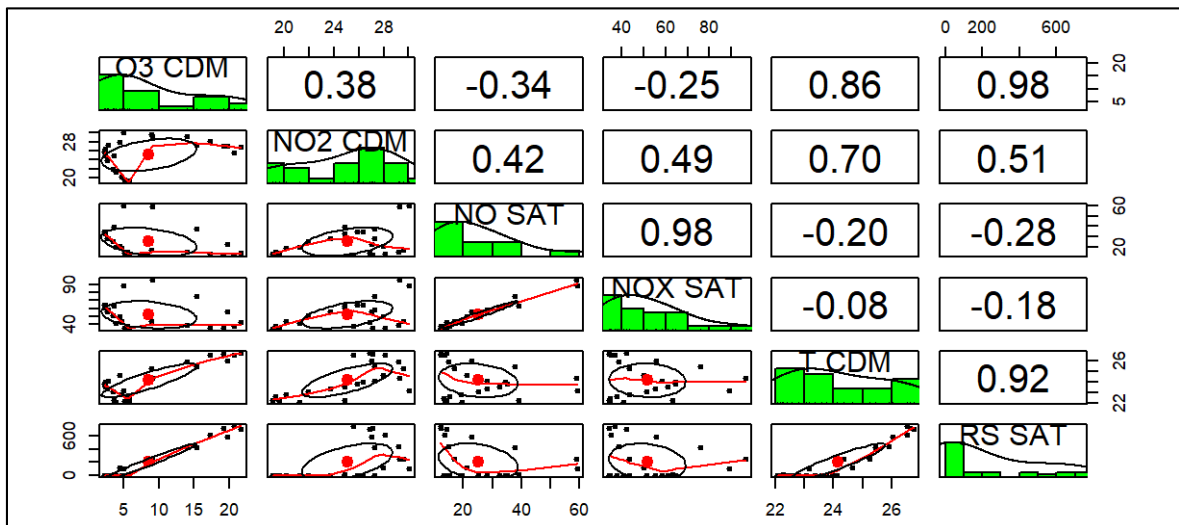


Figura 79: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 80 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SBJ y CDM para el verano generan resultados muy similares a los registros históricos. En este sentido, su comportamiento horario se puede predecir de mejor manera tomando en cuenta a la radiación solar y la temperatura del aire. Por otro lado, en la Figura 81 se aprecia gráficamente las ecuaciones

estructuradas para los niveles de NO_x en la estación SAT y MO1 para el verano, las cuales no presentan buenos resultados al no tomar en cuenta los niveles de tráfico vehicular.

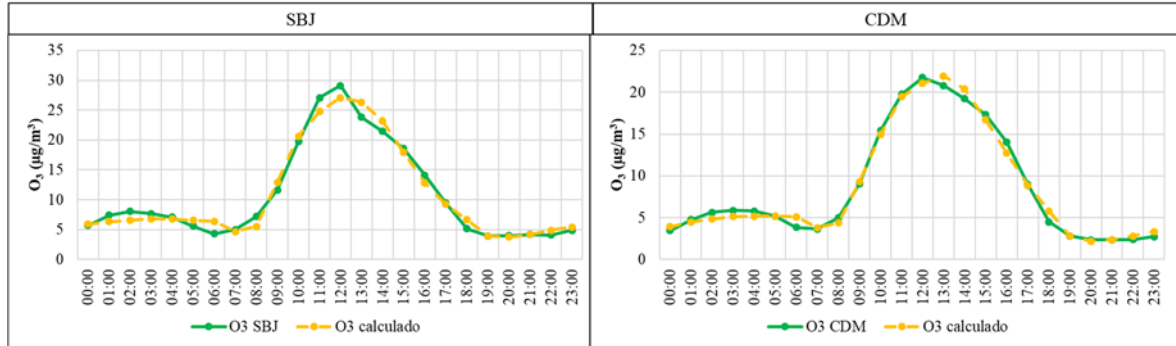


Figura 80: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

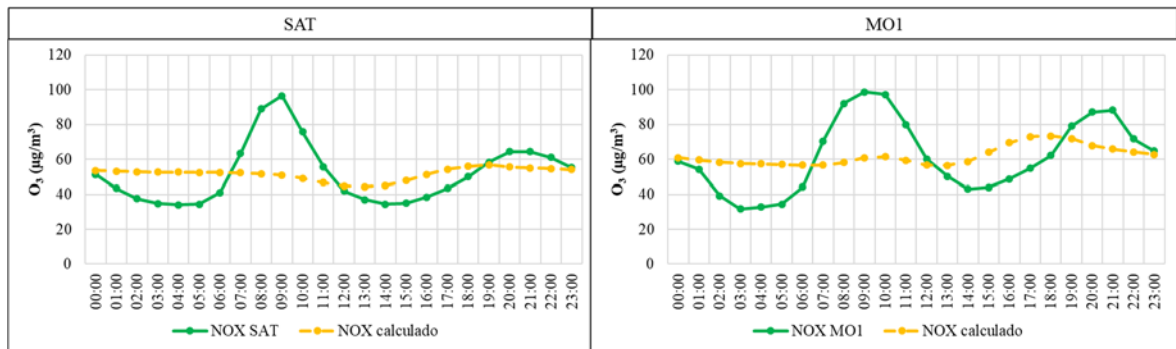


Figura 81: Niveles de NO_x históricos y calculados para la estación SAT y MO1 en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (43) y Ecuación (44) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el invierno en las estaciones SBJ y CDM, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,96 y 0,78, respectivamente. Además, en cuanto a los parámetros meteorológicos, en ambas ecuaciones se aprecia una influencia positiva con respecto a la temperatura del aire y una influencia de la radiación solar que depende de la estación. Como se mencionó previamente, se espera que el valor negativo de la radiación solar se deba a que es un parámetro relacionado muy estrechamente con la temperatura y, por lo tanto, ocasiona este tipo de resultados en estos análisis al no cumplir el supuesto de no colinealidad. Asimismo, se aprecia que el NO, NO₂ y NO_x guardan una relación diferente

con el O₃ comparado al de la Ecuación (31) y Ecuación (32), lo cual es producido también por esto último mencionado.

Por otro lado, en la Ecuación (45) y Ecuación (46) se puede apreciar las ecuaciones de regresión lineal múltiple para los niveles de NO_x en invierno en las estaciones SAT y MO1, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R²) ajustado de -0,05 y -0,01, respectivamente. Estos bajos coeficientes se deben a que los NO_x están más relacionados con el tráfico vehicular que con los parámetros meteorológicos para esta localidad.

$$O_{3(SBJ)}i = 19,52 - 0,68*NO_{2(SBJ)}i + 0,33*NO_{(SAT)}i - 0,18*NO_{X(SAT)}i + 1,56*T_{(SBJ)}i + 0,03*RS_{(SAT)}i \quad (43)$$

$$O_{3(CDM)}i = -41,12 - 2,48*NO_{2(CDM)}i + 1,01*NO_{(SAT)}i - 0,17*NO_{X(SAT)}i + 6,4*T_{(CDM)}i - 0,04*RS_{(SAT)}i \quad (44)$$

$$NO_{X(SAT)}i = -70,61 + 7,75*T_{(SAT)}i - 0,08*RS_{(SAT)}i \quad (45)$$

$$NO_{X(MO1)}i = -56,73 + 8,72*T_{(CDM)}i - 0,04*RS_{(SAT)}i \quad (46)$$

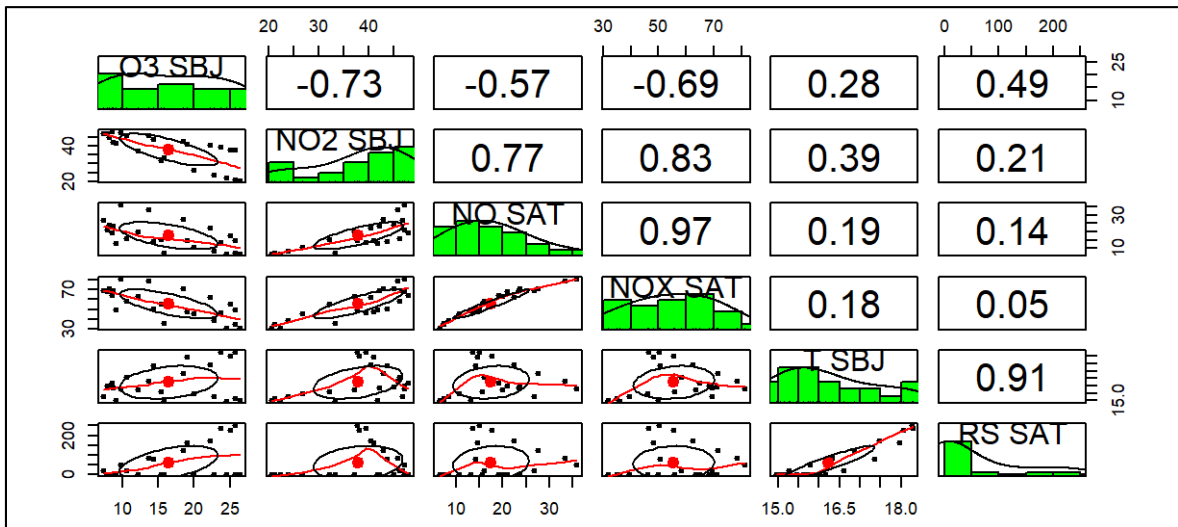


Figura 82: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SBJ y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

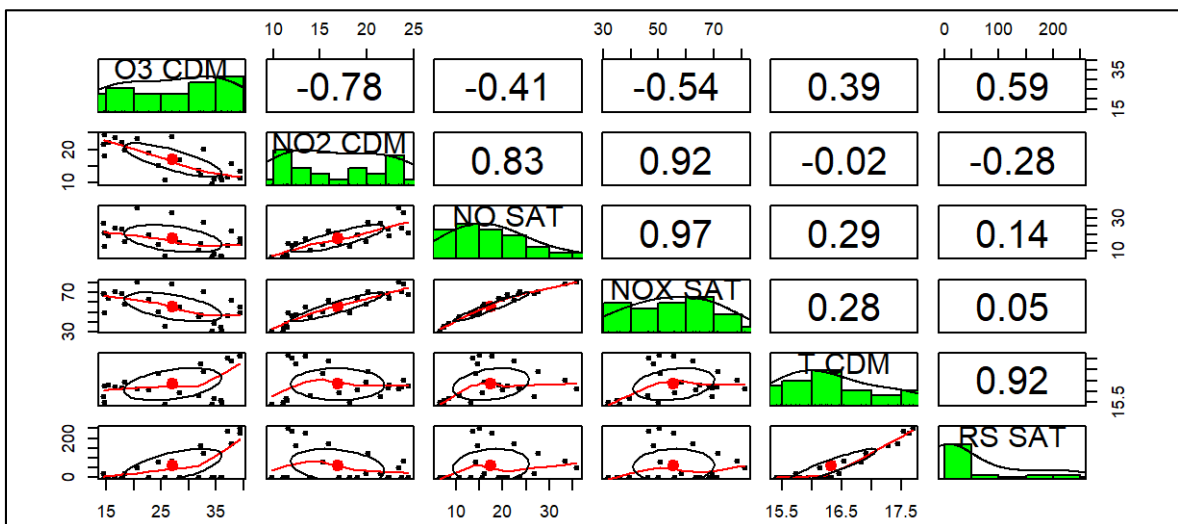


Figura 83: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CDM y SAT para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 84 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SBJ y CDM para el invierno generan resultados muy similares a los registros históricos. En este sentido, su comportamiento horario se puede predecir de mejor manera tomando en cuenta a la radiación solar y la temperatura del aire. Por otro lado, en la Figura 85 se aprecia gráficamente las ecuaciones estructuradas para los niveles de NO_x en la estación SAT y MO1 para el invierno, las

cuales no presentan buenos resultados al no tomar en cuenta los niveles de tráfico vehicular.

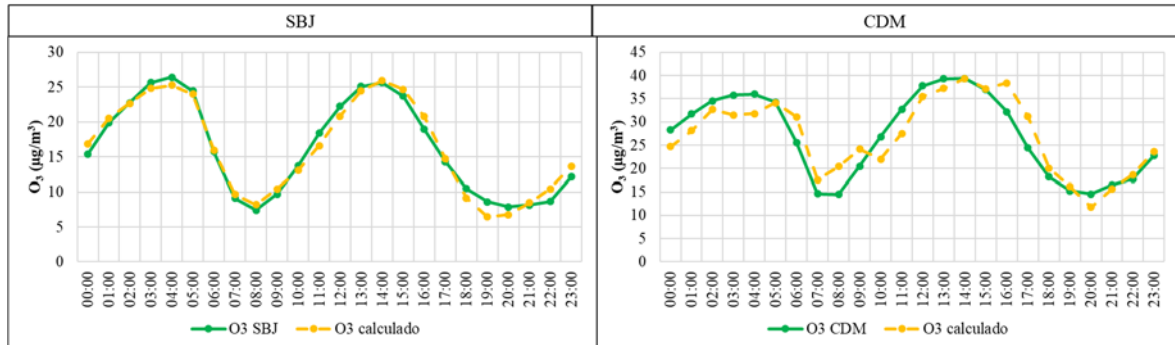


Figura 84: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SBJ y CDM en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

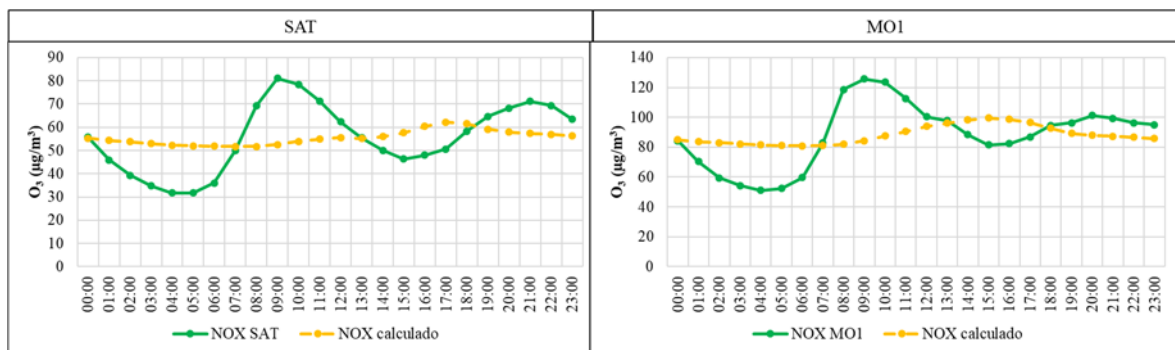


Figura 85: Niveles de NO_x históricos y calculados para la estación SAT y MO1 en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (47), Ecuación (48) y Ecuación (49) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el verano en las estaciones SMP, CRB y PPD, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0,99 en todos los casos. Además, en cuanto a los parámetros meteorológicos, en todas estas ecuaciones se aprecia una influencia positiva con respecto a la radiación solar y a la temperatura. Como se explicó previamente, esta influencia positiva se debe a que la generación de O₃ depende de una reacción fotoquímica, por lo que necesita de la luz solar, la cual está relacionada con la temperatura del aire. Asimismo, se aprecia que el NO, NO₂ y NO_x guardan una relación diferente con el O₃ comparado al de la Ecuación (33), Ecuación (34) y Ecuación (35), lo cual es producido por

no cumplir el supuesto de no colinealidad, debido a que estos parámetros están fuertemente relacionados.

Por otro lado, en la Ecuación (50) se puede apreciar la ecuación de regresión lineal múltiple para los niveles de NO_x en verano en la estación MO2. Esta ecuación cuenta con un coeficiente de determinación (R²) ajustado de 0,09. Este coeficiente se debe a que los NO_x están más relacionados con el tráfico vehicular que con los parámetros meteorológicos para esta localidad.

$$O_{3(SMP)}i = -6,09 + 0,01*NO_{2(SMP)}i + 0,23*NO_{(MO2)}i - 0,36*NO_{X(MO2)}i + 1,07*T_{(SMP)}i + 0,03*RS_{(SMP)}i \quad (47)$$

$$O_{3(CRB)}i = -19,32 - 0,39*NO_{2(CRB)}i + 0,01*NO_{(MO2)}i - 0,13*NO_{X(MO2)}i + 1,47*T_{(CRB)}i + 0,06*RS_{(CRB)}i \quad (48)$$

$$O_{3(PPD)}i = -8,99 - 0,13*NO_{2(PPD)}i - 0,13*NO_{(MO2)}i + 0,01*NO_{X(MO2)}i + 0,77*T_{(PPD)}i + 0,03*RS_{(PPD)}i \quad (49)$$

$$NO_{X(MO2)}i = 140,71 - 3,26*T_{(MO2)}i + 0,03*RS_{(MO2)}i \quad (50)$$

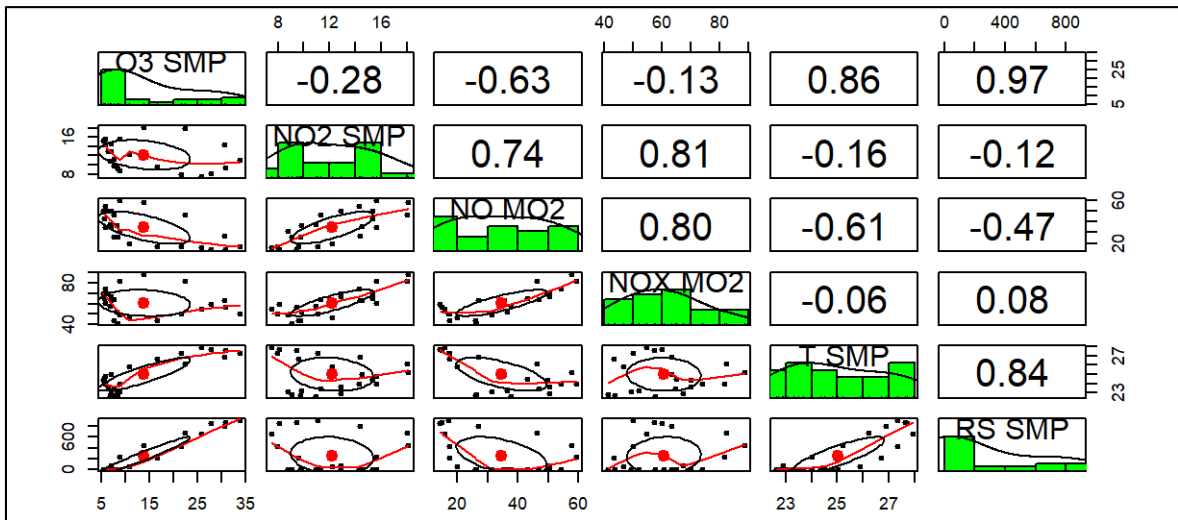


Figura 86: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

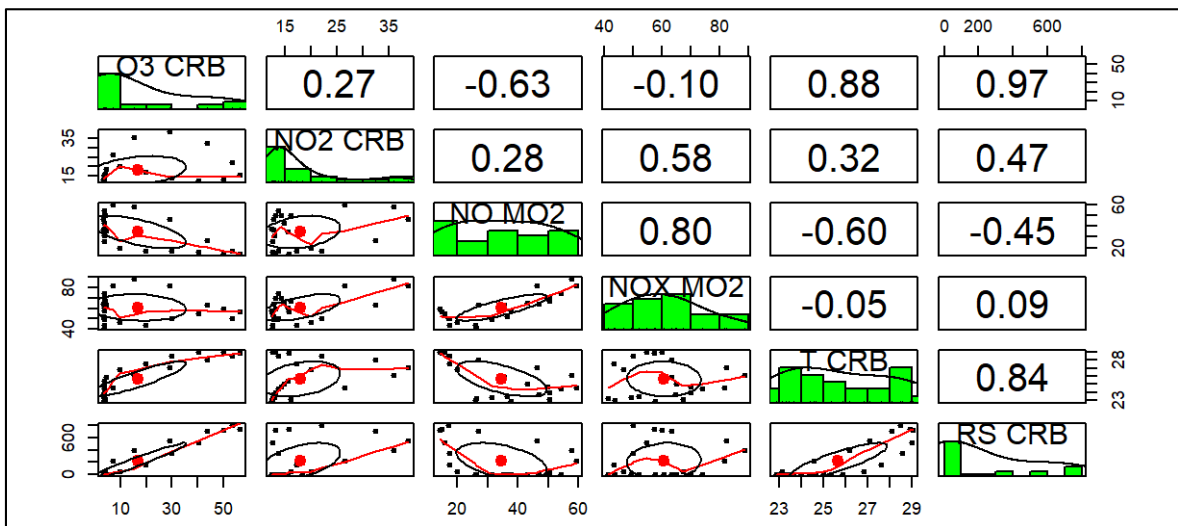


Figura 87: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

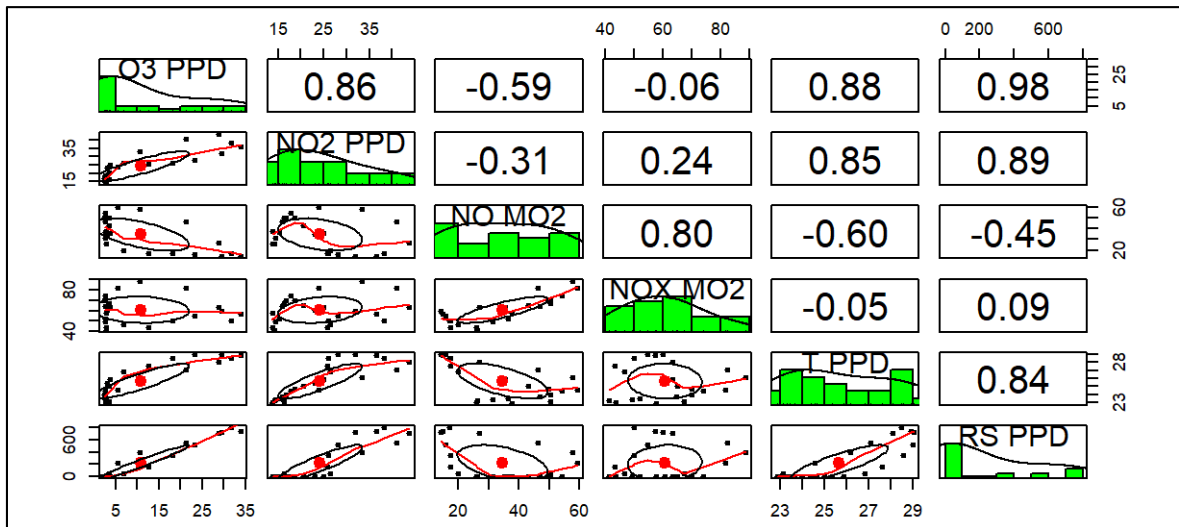


Figura 88: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el verano (febrero) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 89 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SMP, CRB y PPD para el verano generan resultados muy similares a los registros históricos. En este sentido, su comportamiento horario se puede predecir de mejor manera tomando en cuenta a la radiación solar y la temperatura del aire. Por otro lado, en la Figura 90 se aprecia gráficamente la ecuación estructurada para los niveles de NO_x en la estación MO2 para el verano, la cual no presenta buenos resultados al no tomar en cuenta los niveles de tráfico vehicular.

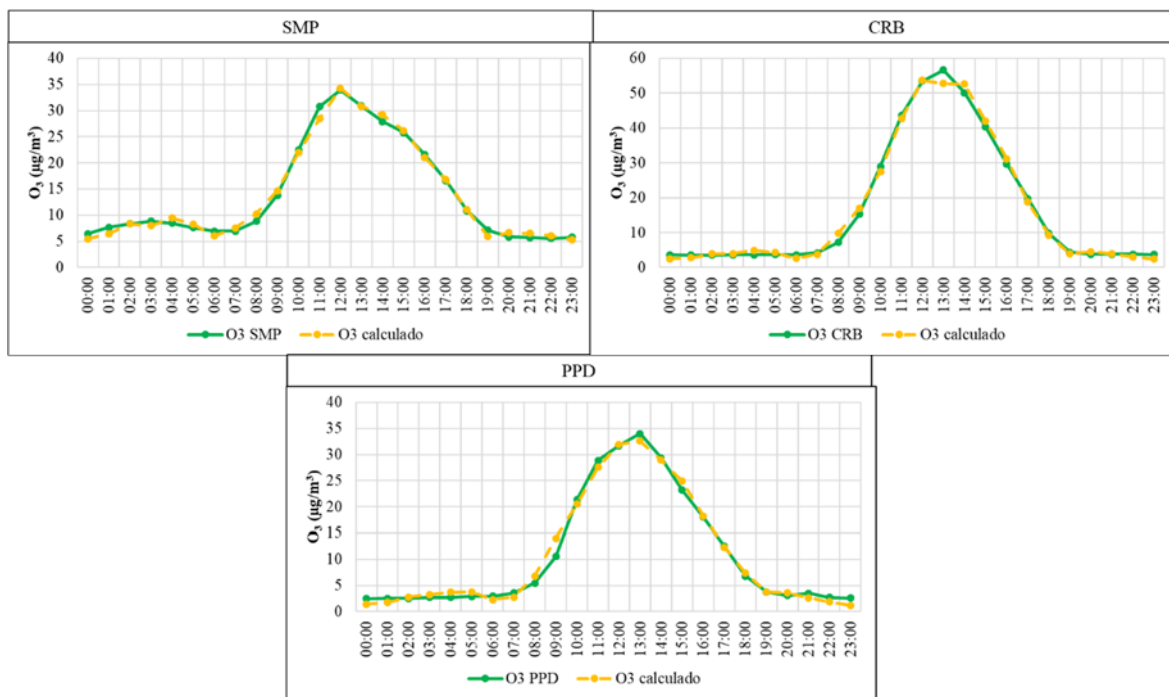


Figura 89: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

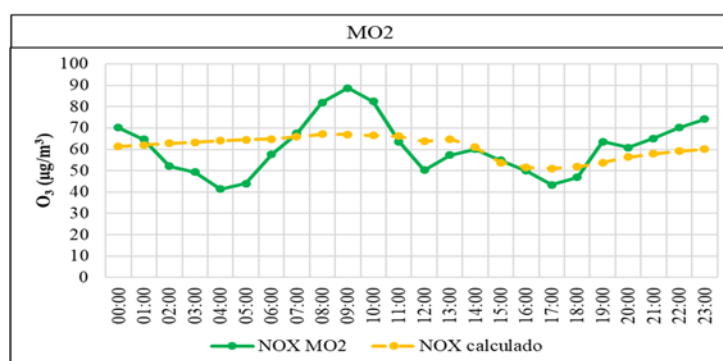


Figura 90: Niveles de NO_x históricos y calculados para la estación MO2 en verano (febrero) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

En la Ecuación (51), Ecuación (52), y Ecuación (53) se puede apreciar los modelos de regresión lineal múltiple estimado para los niveles de O₃ en el invierno en las estaciones SMP, CRB y PPD, respectivamente. Estas ecuaciones cuentan con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de aproximadamente 0,99 para todos los casos. Además, en cuanto a los parámetros meteorológicos, en todas estas ecuaciones se aprecia una influencia positiva con respecto a la temperatura del aire y la radiación solar. Como se

explicó previamente, esta influencia positiva se debe a que la generación de O₃ es una fotoquímica, por lo que necesita de la luz solar. Específicamente para el caso de la estación PPD, el coeficiente de 0 para la radiación solar puede deberse al alto coeficiente para la temperatura del aire, las cuales están relacionadas. Asimismo, se aprecia que el NO, NO₂ y NO_x guardan una relación diferente con el O₃ comparado al de la Ecuación (36), Ecuación (37) y Ecuación (38), lo cual es producido por no cumplir el supuesto de no colinealidad, debido a que estos parámetros están fuertemente relacionados.

Por otro lado, en la Ecuación (54) se puede apreciar la ecuación de regresión lineal múltiple para los niveles de NO_x en invierno en la estación MO2. Esta ecuación cuenta con un coeficiente de determinación (R²) ajustado de -0,06. Este coeficiente se debe a que los NO_x están más relacionados con el tráfico vehicular que con los parámetros meteorológicos para esta localidad.

$$O_{3(SMP)}i = 4,65 - 1,13*NO_{2(SMP)}i - 0,21*NO_{(MO2)}i + 0,1*NO_{X(MO2)}i + 2,59*T_{(SMP)}i + 0,01*RS_{(SMP)}i \quad (51)$$

$$O_{3(CRB)}i = -33,25 - 0,16*NO_{2(CRB)}i + 0,84*NO_{(MO2)}i - 0,94*NO_{X(MO2)}i + 5,09*T_{(CRB)}i + 0,05*RS_{(CRB)}i \quad (52)$$

$$O_{3(PPD)}i = -27,3 + 0,05*NO_{2(PPD)}i + 0,58*NO_{(MO2)}i - 0,62*NO_{X(MO2)}i + 3,42*T_{(PPD)}i + 0,02*RS_{(PPD)}i \quad (53)$$

$$NO_{X(MO2)}i = 18,41 + 2,34*T_{(MO2)}i - 0,02*RS_{(MO2)}i \quad (54)$$

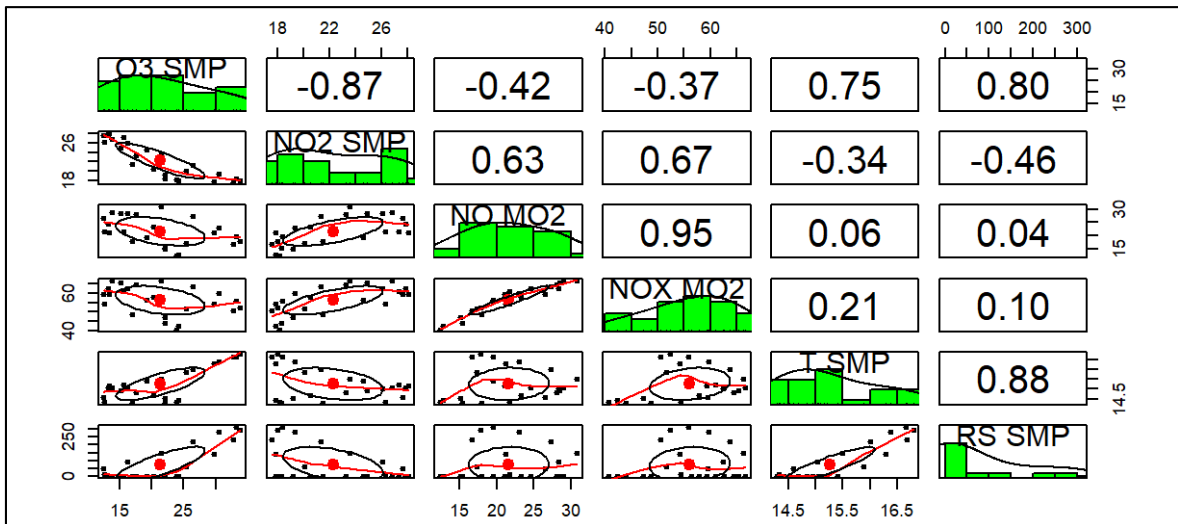


Figura 91: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones SMP y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

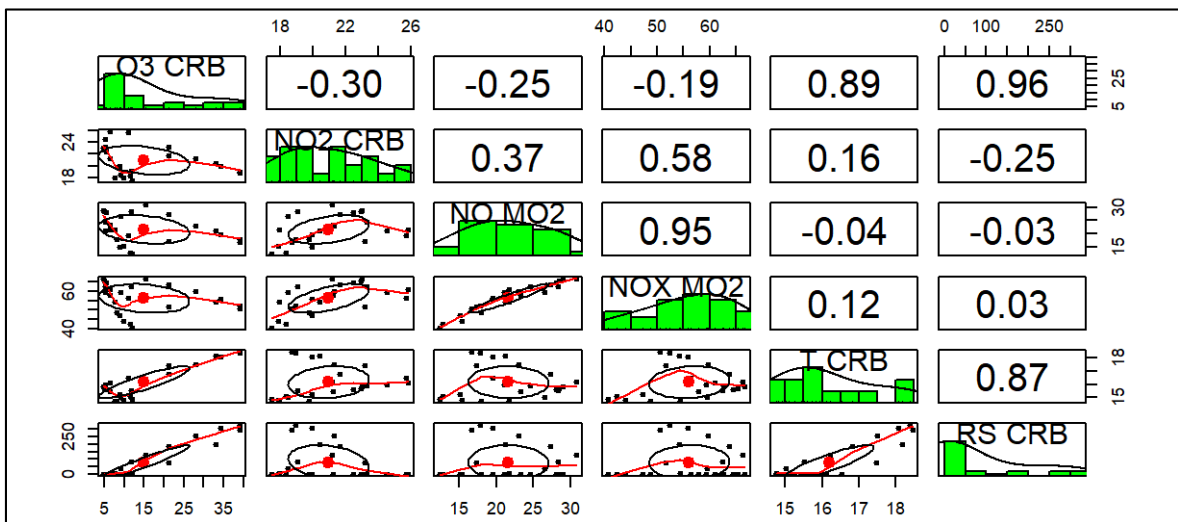


Figura 92: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones CRB y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

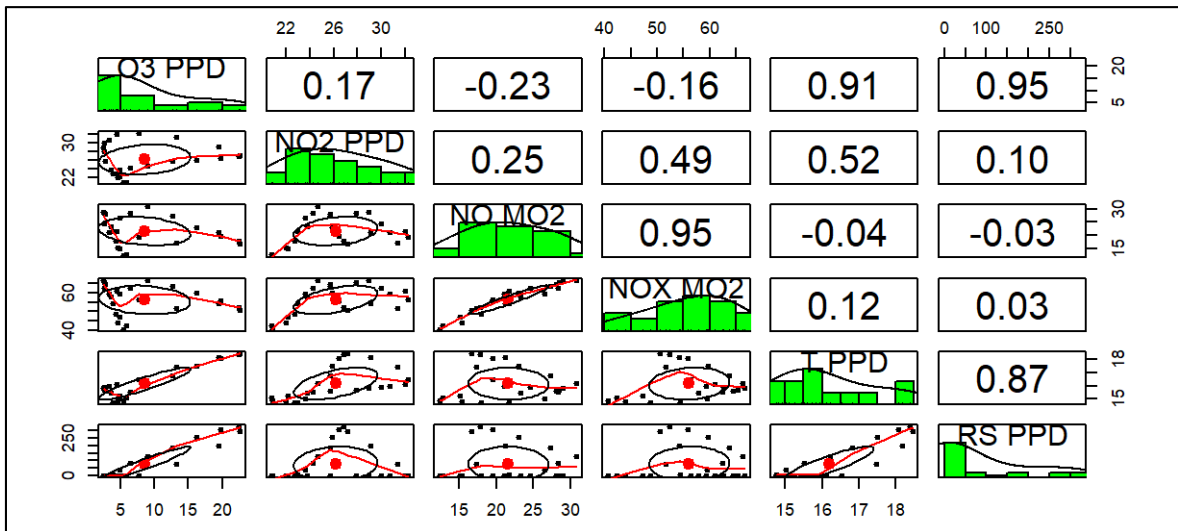


Figura 93: Correlación entre el O₃, los óxidos de nitrógeno y las variables meteorológicas en las estaciones PPD y MO2 para el invierno (agosto) durante el periodo 2015-2018.

En la Figura 94 se puede observar gráficamente que las ecuaciones estructuradas previamente para los niveles de O₃ en la estación SMP, CRB y PPD para el invierno generan resultados muy similares a los registros históricos. En este sentido, su comportamiento horario se puede predecir de mejor manera tomando en cuenta a la radiación solar y la temperatura del aire. Por otro lado, en la Figura 95 se aprecia gráficamente la ecuación estructurada para los niveles de NO_x en la estación MO2 para el invierno, la cual no presenta buenos resultados al no tomar en cuenta los niveles de tráfico vehicular.

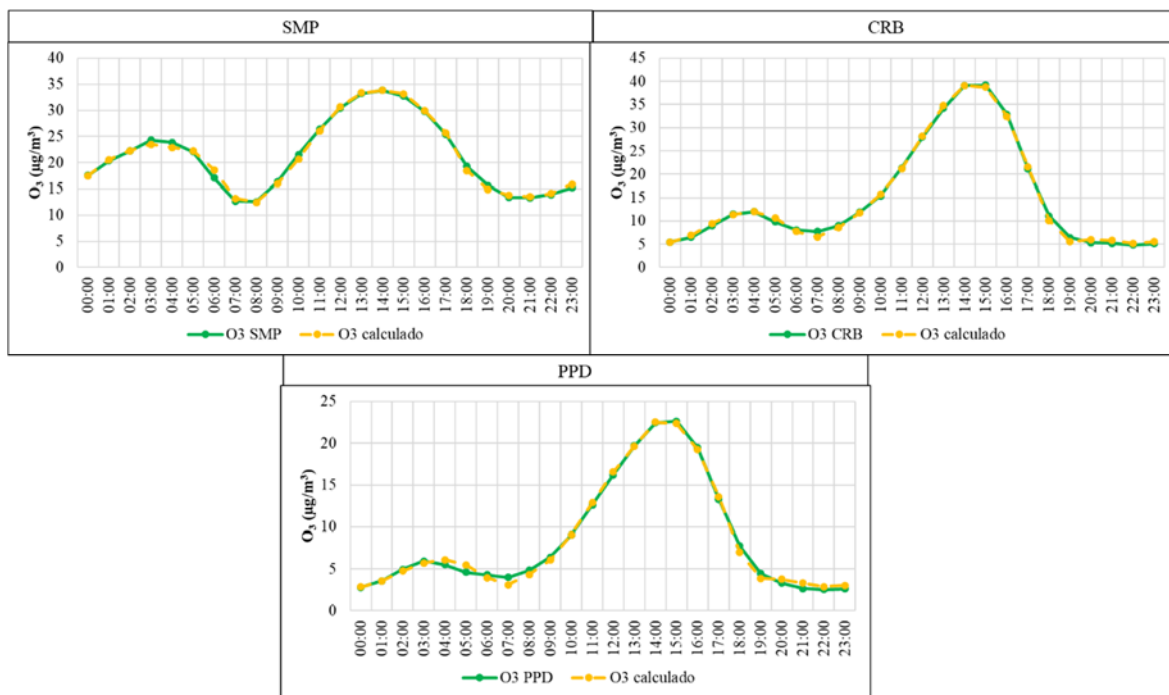


Figura 94: Niveles de O₃ históricos y calculados para la estación SMP, CRB y PPD en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

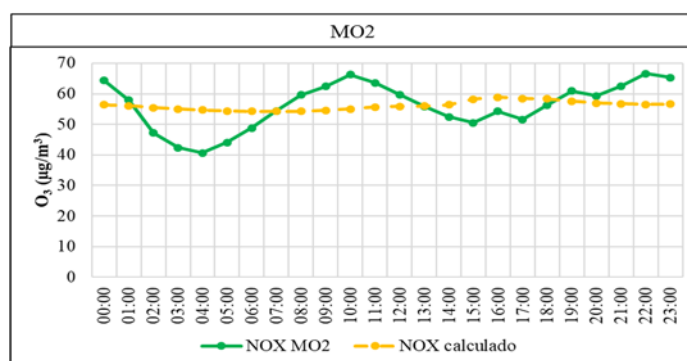


Figura 95: Niveles de NO_x históricos y calculados para la estación MO2 en invierno (agosto) utilizando las variables meteorológicas durante el periodo 2015-2018.

Por lo visto en la presente sección, se espera que tanto para la zona centro como para la zona norte de Lima Metropolitana los niveles de O₃ se vean influenciados fuertemente por la radiación solar y la temperatura del aire de acuerdo a la ubicación y a la estación del año. Asimismo, se espera que los niveles de NO_x también influyeran a la concentración de O₃ pero en menor medida. Por otro lado, para las zonas evaluadas, los parámetros

meteorológicos no tienen un efecto significativo sobre los niveles de los NO_x en las estaciones evaluadas.

Finalmente, los modelos que mejor predicen los niveles horarios de O₃ para las estaciones evaluadas son los que toman en cuenta a todos los NO_x, la radiación solar y la temperatura del aire aunque, tal como se vio en el estudio de Roberts *et al.* (2012), no reflejan individualmente la influencia de cada uno de estos sobre el O₃. Como se mencionó en la sección anterior, en dicho estudio se obtuvo que los niveles horarios de O₃ varían en 0,059 al haber una variación unitaria de los niveles horarios de NO₂, en -0,253 al haber una variación unitaria de los niveles horarios de NO y en 0,388 al haber una variación unitaria de la temperatura. Sin embargo, los niveles de NO₂ y NO se correlacionaban, por lo que, a pesar de que el modelo predecía de manera adecuada los niveles horarios de O₃, se apreciaba una incoherencia entre los signos de los coeficientes del NO₂ y del NO. Además, en dicho estudio se pudo observar que la temperatura influenciaba de manera poco significativa al NO₂ comparado con su influencia sobre el O₃. Adicionalmente, Milena *et al.* (2014) encontraron que el O₃ se relaciona más estrechamente con la radiación solar que con la temperatura, lo cual explica que los modelos que solo toman en cuenta a los niveles de NO_x y de radiación solar para predecir los niveles de O₃ tengan un alto coeficiente de determinación (R²) ajustado.

V. CONCLUSIONES

Se observó que los niveles horarios de NO_x están relacionados estrechamente con los niveles horarios del tráfico vehicular en ambas zonas de estudio y presentan un comportamiento bimodal durante todo el año; mientras que, los niveles horarios de O_3 se vieron relacionados con los niveles horarios de radiación solar y posiblemente con el transporte nocturno de O_3 a partir de su acumulación en otras capas de la atmósfera. Asimismo, se apreció que el comportamiento diario de los NO_x y el O_3 responde al llamado “efecto fin de semana del O_3 ” el cual se caracteriza por presentar los mínimos niveles de NO_x y los máximos niveles de O_3 durante los fines de semana derivado del comportamiento diario del tráfico vehicular. Por otro lado, el comportamiento mensual y estacional del NO_x no presentan una tendencia clara debido a su variabilidad relacionada con emisiones puntuales y locales; mientras que, en el caso del O_3 , sus mayores niveles mensuales se relacionan con los meses de mayor intensidad de la capa de inversión térmica (periodo de junio a octubre) que ocurre en la zona centro y, en menor medida, por los niveles mensuales de radiación solar para la zona norte. Por último, ni los NO_x ni el O_3 presentaron un comportamiento multianual claro, aunque los NO_x tienen una ligera tendencia generalizada de haber aumentado durante el año 2017 y 2018.

Se encontró una gran variabilidad con respecto a la correlación que existe entre el NO_2 y el O_3 y que, en los meses en los que el O_3 presenta un comportamiento bimodal marcado, se tienden a generar mejores correlaciones negativas con el NO_2 . Además, la mayoría de correlaciones entre el NO_2 , el NO y el NO_x presentaron una correlación positiva significativa debido a que los niveles horarios de estos parámetros guardan relación directa con los niveles de tráfico vehicular. Por último, se pudo observar que el NO_2 , O_3 , NO y NO_x presentan una buena correlación entre las estaciones que lo registran, y para el NO_2 esto se da principalmente en la zona centro

Se determinó que los niveles horarios de O₃ se ven más significativamente influenciados por los niveles horarios de NO_x durante el invierno comparado con el verano, debido a que durante el invierno se desarrolla un comportamiento bimodal marcado para este gas, similar al comportamiento bimodal habitual de los NO_x. Asimismo, se apreció que los niveles horarios de NO_x por si solos no predicen correctamente el comportamiento horario del O₃ tomando en cuenta los bajos coeficientes de determinación (R²) ajustados obtenidos.

Finalmente, se determinó que los niveles horarios de la temperatura, la radiación solar y, en menor medida, de los NO_x influyen significativamente en el comportamiento horario del O₃, no así para el comportamiento horario del NO_x que se ve influenciado principalmente por los niveles horarios de tráfico vehicular.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda la implementación de un monitoreo de los niveles horarios de tráfico vehicular para las principales avenidas próximas a las estaciones de calidad de aire con el fin de generar una correlación entre estos niveles y los de los NO_x. Así, se podrá evaluar la verdadera influencia del tráfico vehicular sobre la concentración horaria de los NO_x y tomar medidas de control adecuadas.

Se recomienda la medición horaria de la radiación solar en las estaciones de calidad de aire de la zona centro de Lima Metropolitana con el fin de poder mejorar la evaluación de la influencia de esta sobre los niveles de O₃ para dicha zona.

Se recomienda la medición horaria de temperatura a diferentes altitudes en las estaciones de calidad de aire con el fin de generar una base de datos de la estabilidad atmosférica, la cual se ve relacionada con el comportamiento horario y mensual del O₃.

Se recomienda realizar un análisis similar al del presente estudio incluyendo la evaluación de los valores horarios de monóxido de carbono (CO) y de compuestos orgánicos volátiles (COV), debido a que también se ven relacionados con la dinámica atmosférica de los NO_x y el O₃.

Se recomienda realizar un análisis de los NO_x y el O₃ tomando en consideración la variación horaria de la humedad relativa, debido a que se ha encontrado una buena correlación de estos parámetros en otros estudios. Además, se recomienda tomar en cuenta dentro del análisis a la variación horaria de la velocidad y dirección del viento, dado que Lima Metropolitana posee condiciones orográficas modeladas por una gran cantidad de cerros e infraestructuras como edificios de varios pisos que pueden condicionar el efecto dispersivo del viento sobre los NO_x y el O₃.

Se recomienda la implementación de estaciones de calidad de aire que midan NO en las zonas sur y zona este de Lima Metropolitana con el fin de realizar una evaluación espacial de los niveles de NO_x y una evaluación relacionada con su influencia sobre los niveles de O₃ en dichas zonas.

Se recomienda promover la concientización del efecto de los niveles de tráfico vehicular sobre los niveles de NO_x y O₃, los cuales no han demostrado una disminución en los últimos años y podrían causar consecuencias a largo plazo sobre la salud de la población de Lima Metropolitana.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Adyani, N., Azam, N., Shukri, A., Falzah, N., Sansuddin, N., & Ahmed, W. (2009). Transformation of nitrogen dioxide into ozone and prediction of ozone concentrations using multiple linear regression techniques. *Environ Monit Assess*, 165, 475–489.
- Alghamdi, M., Al-Hunaiti, A., Arar, S., Khoder, M., Abdelmaksoud, A., Al-Jeelani, H., Lihavainen, H., Hyvarinen, A., Shabbaj, I., Almeahadi, F., Zaidan, M., Hussein, T., & Dada, L. (2019). A Predictive Model for Steady State Ozone Concentration at an Urban-Coastal Site. *Environmental Research and Public Health*, 16(258), 1–10.
- Amat, J. (2016). *Introducción a la Regresión Lineal Múltiple*. España: Ciencia de Datos. Recuperado de https://www.cienciadedatos.net/documentos/24_correlacion_y_regresion_lineal#introducci%C3%B3n
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2016). *Óxidos de nitrógeno*. USA: Department of Health & Human Services. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2019). *Estudio de sustancias tóxicas*. USA: Department of Health & Human Services. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/4/es_lecturenotes.html
- American Meteorological Society. (2012). *Hydroperoxyl radical*. USA: American Meteorological Society. Recuperado de http://glossary.ametsoc.org/wiki/Hydroperoxyl_radical
- Andrews, G. E. (2013). Ultra-low nitrogen oxides (NO_x) emissions combustion in gas turbine systems. *Woodhead Publishing Limited*, 1, 715–790.
- Aslan, I. (2018). Diesel and Gasoline Engines. *Intechopen*, 1, 1–25.

- Australian Government. (2005). *National Standards for Criteria Air Pollutants 1 in Australia*. Australia: Department of Agriculture, Water and the Environment. Recuperado de <https://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-national-standards-criteria-air-pollutants-australia>
- Awang, N., Ramli, N., Yahaya, A., & Elbayoumi, M. (2015). High Nighttime Ground-Level Ozone Concentrations in Kemaman: NO and NO₂ Concentrations Attributions. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(1), 1357–1366.
- Bell, M., Galatioto, F., Chakravartty, A., & Namdeo, A. (2013). A novel approach for investigating the trends in nitrogen dioxide levels in UK cities. *Environmental Pollution*, 183(2), 184–194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.039>
- BMI ICOPAL. (2015). *Nitrogen Oxide (NOx) Pollution*. UK: BMI ICOPAL. Recuperado de <http://www.icopal-noxite.co.uk/nox-problem/nox-pollution.aspx>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2020). *Canadian Ambient Air Quality Standards*. Canada: CCME. Recuperado de <https://www.alberta.ca/canadian-ambient-air-quality-standards.aspx>
- Castellano, M., Franco, A., Cartelle, D., Febrero, M., & Roca, E. (2009). Identification of NOx and Ozone Episodes and Estimation of Ozone by Statistical Analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, 198, 95–110.
- Chalk, P., & Smith, C. (1983). Chemodenitrification. En Freney *et al.* (Ed.), *Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-Soil Systems* (pp. 65–66). USA: Developments in Plant and Soil Sciences.
- Cichowicz, R., & Stelegowski, A. (2019). Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77, 197–213.
- Clapp, L., & Jenkin, M. (2001). Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NOx in the UK. *Atmospheric Environment*, 35, 6391–6405.
- Clean Air Asia. (2012). *China Releases New Ambient Air Quality*. China: Clean Air Asia. Recuperado de <https://cleanairasia.org/node8163/>

- Climate & Clean Air Coalition. (2014). *Tropospheric ozone*. USA: United Nations Environment Programme. Recuperado de <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/tropospheric-ozone>
- Cofala, J., & Syri, S. (1988). *Nitrogen oxides emissions, abatement technologies and related costs for Europe in the RAINS model database*. Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- DaViz. (2008). *Tropospheric Ozone: Background Information*. Dinamarca: European Environment Agency.
- Depayras, S., Kondakova, T., Heipieper, H., Feuilloley, M., Orange, N., & Duclairoir-Poc, C. (2018). The Hidden Face of Nitrogen Oxides Species: From Toxic Effects to Potential Cure? En Anónimo (s.f.), *Emerging Pollutants - Some Strategies for the Quality Preservation of Our Environment* (pp. 1–27). USA: IntechOpen.
- DesktopClass. (2019). *Pollutants and Their Effects On Environment*. USA: DesktopClass. Recuperado de <https://www.desktopclass.com/health-care/pollutants-effects-environment.html>
- Dirección General de Salud Ambiental. (2005). *Protocolo De Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos*. Perú: DIGESA.
- E Instruments. (2016). *Nitrogen oxides: What is NOx? Combustion Training*. USA: Sauermann. Recuperado de <https://www.e-inst.com/training/combustion/nitrogen-oxides-nox/>
- El Comercio. (2019). *El día de la semana con más tráfico vehicular en Lima*. Perú: El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/lima/transporte/dia-semana-traffic-vehicular-lima-notepases-noticia-613044-noticia/?ref=ecr>
- El Tiempo. (2018). *El radical hidroxilo (OH) se recicla en la atmósfera*. España: El Tiempo. Recuperado de <https://www.tiempo.com/ram/486041/el-radical-hidroxilo-oh-se-recicla-en-la-atmosfera/>
- Environment Agency. (1996). *The Categorisation of Volatile Organic Compounds*. UK: Environment Agency.

- Espinoza, A. (2018). *Evaluación espacial y temporal del material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- European Environment Agency. (2019). *Air Quality Standards*. UE: WHO. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>
- Fluent Incorporated. (2003a). *Fuel NOx Formation*. USA: Fluent Incorporated. Recuperado de <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node626.htm>
- Fluent Incorporated. (2003b). *Prompt NOx Formation*. USA: Fluent Incorporated. Recuperado de <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node625.htm>
- Fundación Crana. (2014). *Óxidos de nitrógeno*. España: Fundación Crana. Recuperado de http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/axidos-nitrigeno-nox-no2
- Fundación Transitemos. (2018). *Transporte Urbano Lima y Callao - 2018*. Perú: Fundación Transitemos.
- Galán, D., y Fernández, R. (2006). Implicación de los NOx en la Química Atmosférica. *Revista Electrónica de Medioambiente*, 2(10), 90–103.
- Gasmí, K., Aljalal, A., Al-Basheer, W., & Abdulahi, M. (2017). Analysis of NOx, NO and NO₂ ambient levels in Dhahran, Saudi Arabia. *Urban Climate*, 21(2), 232–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.002>
- Gobierno de Aragón. (2014). *El ozono estratosférico y el ozono troposférico (o superficial)*. España: Gobierno de Aragón. Recuperado de http://www.aragonaire.es/ozone.php?n_action=types
- Gobierno de México. (2017). *Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente*. México: Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>
- Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., & Fall, R. (2000). Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America. *Atmospheric Environment*, 34, 2205–2230.
- Hanisco, T. (2003). HOx. *Stratospheric Chemistry Topics*, 5, 233-237.

- Henschel, S., Le Tertre, A., Atkinson, R., Querol, X., Pandolfi, M., Zeka, A., Haluza, D., Analitis, A., Katsouyanni, K., Bouland, C., Pascal, M., Medina, S., & Goodman, P. G. (2016). Trends of nitrogen oxides in ambient air in nine European cities between 1999 and 2010. *Atmospheric Environment*, *117*(2015), 234–241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.013>
- Holm, S., Balmes, J., & Roy, A. (2018). *Human Health Effects of Ozone*. USA: Environmental Defense Fund.
- Houston Clean Air Network. (2020). *Tropospheric and Stratospheric Ozone*. USA: Houston Clean Air Network. Recuperado de <https://houstoncleanairnetwork.com/tropospheric-and-stratospheric-ozone>
- Instituto Metropolitano Protransporte de Lima. (2011). *Estaciones de Calidad de Aire*. Lima: PROTRANSPORTE. Recuperado de <http://www.protransporte.gob.pe/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos nacionales 2017*. Perú: INEI. Recuperado de <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- Ismail, M., Abdullah, S., Yuen, F., & Adyani, N. (2016). A Ten Year Investigation on Ozone and It Precursors at Kemaman. *Environment Asia*, *9*(1), 1–8.
- Jaffar, M., Hamid, H., Yunus, R., & Raffee, A. (2018). Fitting Statistical Distribution on Air Pollution: An Overview. *Internation Journal of Engineering & Technology*, *7*, 40–44.
- Jang, E., Do, W., Park, G., Kim, M., & Yoo, E. (2017). Spatial and temporal variation of urban air pollutants and their concentrations in relation to meteorological conditions at four sites in Busan, South Korea. *Atmospheric Pollution Research*, *8*(1), 89–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.009>
- Jasaitis, D., Vasiliauskiene, V., Chadysiene, R. & Peciuliene, M. (2016). Surface Ozone Concentration and Its Relationship with UV Radiation, Meteorological Parameters and Radon on the Eastern Coast of the Baltic. *Atmosphere*, *7*(27), 1-11.
- Jiang, N., Hay, J., & Fisher, G. (2005). Effects of meteorological conditions on concentrations of nitrogen oxides in Auckland. *Weather and Climate*, *24*(2), 15–34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.590>

- Kang, D., & Pickering, K. (2018). Lightning NO_x Emissions and the Implications for Surface Air Quality over the Contiguous United States. *The Magazine for Environmental Managers*, 1(1), 1–7.
- Kassem, K. (2014). Statistical Analysis of Hourly Surface Ozone Concentrations in Cairo and Aswan/Egypt. *World Environment*, 4, 143–150.
- Kovač-Andrić, E., Radanović, T., Topalović, I., Marković, B., & Sakač, N. (2013). Temporal variations in concentrations of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide at Osijek, Croatia. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/469786>
- Lafond, A. (2020). *The Natural Sources of Volatile Organic Compounds (VOCs)*. USA: Foobot pioneers. Recuperado de <https://foobot.io/guides/natural-sources-of-volatile-organic-compounds.php>
- Leighton, P. (1961). *Photochemistry of Air Pollution*. USA: Academic Press.
- Leu, M. (1979). Rate constant for the reaction HO₂ + NO → OH + NO₂. *The Journal of Chemical Physics*, 70(4), 1662–1666. doi: <https://doi.org/10.1063/1.437680>
- LibreTexts. (2018). *Sources of Nitrogen Oxides*. USA: Chemistry. Recuperado de [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Environmental_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Environmental_Chemistry\)/Acid_Rain/Sources_of_Nitrogen_Oxides](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Environmental_Chemistry/Supplemental_Modules_(Environmental_Chemistry)/Acid_Rain/Sources_of_Nitrogen_Oxides)
- Matsumoto, J., Imai, H., Kosugi, N., & Kajii, Y. (2005). Methods for Preparing Standard Nitrate Radical (NO₃) Gas to Calibrate the LIF-based Instrument for Measurements in the Atmosphere. *Chemistry Letters*, 34(9), 1214–1215.
- Milena, D., Calesso, E., & Norte, F. (2014). Time-series analysis of surface ozone and nitrogen oxides concentrations in an urban area at Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 5(3), 411–420. doi: <https://doi.org/10.5094/APR.2014.048>
- Ministerio de Energía y Minas. (2012a). *Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones Sub Sector Hidrocarburos*. Perú: MINEM.
- Ministerio de Energía y Minas. (2012b). *Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones para Actividades Minero Metalúrgicas*. Perú: MINEM.

- Ministerio de Industria Turismo Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales. (2000). Resolución Ministerial N° 026-2000-ITINCI-DM. *El Peruano*, 1–38.
- Ministerio de Producción. (2010). Resolución Ministerial N° 194-2010-PRODUCE. *El Peruano*, 1–24.
- Ministerio del Ambiente. (2008). Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM. *El Peruano*, 1–4.
- Ministerio del Ambiente. (2016a). Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM. *El Peruano*, 1–6.
- Ministerio del Ambiente. (2016b). Resolución Ministerial N° 201-2016-MINAM. *El Peruano*, 1–72.
- Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. *El Peruano*, 6–9.
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire*. Perú: MINAM.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2018). *Normas Primarias de Calidad ambiental*. Chile: MMA. Recuperado de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>
- Miranda, L., y Chavez, S. (2012). Perfil y escenarios climáticos de Lima Metropolitana. *Actualidad Gubernamental*, 1(50), 4–6.
- MNN. (2009). Ozone: Health and environmental effects. USA: MNN. Recuperado de <https://www.mnn.com/health/fitness-well-being/stories/ozone-health-and-environmental-effects>
- Mohamad, N., & Mohamed, N. (2017). Variations of Ground-level Ozone Concentration in Malaysia: A Case Study in West Coast of Peninsular Malaysia. *MATEC Web of Conferences*, 97, 1–6.
- Monks, P., Archibald, A., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K., Mills, G., Stevenson, D., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., & Williams, M. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(1), 8889–8973.

- Morena, B. (2006). *Análisis de la concentración de O₃ y NO_x (NO + NO₂) en Andalucía Occidental*. España: CONAMA.
- Municipalidad de Madrid. (2015). *Analizadores y Técnicas de Análisis*. España: Ministerio para la Transición Ecológica. Recuperado de <http://www.mambiente.madrid.es/opencms/opencms/calibre/>
- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2019). Ordenanza N° 2164. *El Peruano*, 1-3.
- Munir, S., Chen, H., & Ropkins, K. (2011). Non-parametric nature of ground-level ozone and its dependence on nitrogen oxides (NO_x) a view point of vehicular emissions. *Air Pollution XIX*, 147, 93–104.
- National Aeronautics and Space Administration (2009). *Lightning's "NO_x-ious" Impact On Pollution, Climate*. USA: ScienceDaily. Recuperado de <https://www.sciencedaily.com/releases/2009/10/091030100022.htm>
- Ocak, S., & Turalioglu, F. (2008). Effect of Meteorology on the Atmospheric Concentrations of Traffic-Related Pollutants in Erzurum, Turkey. *Environmental Application & Science*, 3(5), 325–335. doi: <https://doi.org/10.1080/00022470.1981.10465335>
- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Suiza: OMS.
- Ott, W. (1990). A Physical Explanation of the Lognormality of Pollutant Concentrations. *Air Waste Manage*, 40, 1378-1383.
- Parliamentary Counsel Office. (2004). *National Environmental Standards for Air Quality*. Nueva Zelanda: Parliamentary Counsel Office. Recuperado de http://www.legislation.govt.nz/regulation/public/2004/0309/latest/DLM287036.html?search=ta_regulation_R_rc%40rinf%40rnif_an%40bn%40rn_25_a&p=3#DLM287036
- Pilegaard, K. (2013). Processes regulating nitric oxide emissions from soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 1(1), 1–8.
- Popescu, F., & Ionel, I. (2010). *Anthropogenic Air Pollution Sources*. USA: Air Quality.
- Presidencia de Consejo de Ministros. (2001). Decreto Supremo N° 074-2001-PCM. *El Peruano*, 1–16.

- PUBCHEM. (2005a). *Nitric Oxide*. USA: National Center for Biotechnology Information. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/145068#section=Top>
- PUBCHEM. (2005b). *Nitrogen Dioxide*. USA: National Center for Biotechnology Information. Recuperado de https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/nitrogen_dioxide#section=Top
- PUBCHEM. (2005c). *Ozone*. USA: National Center for Biotechnology Information. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24823>
- Richter, A. (2009). Nitrogen oxides in the troposphere-What have we learned from satellite measurements? *The European Physical Journal*, 1(2), 149–156. <https://doi.org/10.1140/epjconf/e2009-00916-9>
- Roberts, D., Song, F., & Gao, Y. (2012). Seasonal characteristics of ambient nitrogen oxides and ground-level ozone in metropolitan northeastern New Jersey. *Atmospheric Pollution Research*, 3, 247–257.
- Sanderson, M. (2007). *Climate change, methane and ozone*. UK: Royal Society of Chemistry. Recuperado de <https://www.envchemgroup.com/climate-change-methane-and-ozone.html>
- Scottish Environment Protection Agency. (2016). *Nitrogen oxides, NO and NO₂ as NO₂*. Escocia: SEPA. Recuperado de <http://apps.sepa.org.uk/spria/pages/substanceinformation.aspx?pid=122>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2010). *Estaciones de Calidad de Aire*. Lima: SENAMHI. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-del-aire>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2016). *Monitoreo y pronóstico de la calidad del aire*. Perú: SENAMHI. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/10/Exposición-FELIPE-GESTA-231015.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2020). *Mapa climático del Perú*. Perú: SENAMHI. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Shilenje, Z., & Ongoma, V. (2014). Observed surface ozone trend in the year 2012 over Nairobi, Kenya. *Atmósfera*, 27(4), 377–384.

- Steinberger, E., & Ganor, E. (1980). High Ozone Concentrations at Night in Jerusalem and Tel-Aviv. *Atmospheric Environment*, 14(1), 221–225.
- Szep, R., Matyas, L., Keresztes, R., & Ghimpusan, M. (2016). Tropospheric Ozone Concentrations - Seasonal and Daily Analysis and its Association with NO and NO₂ as Function of NO_x in Ciuc Depression - Romania. *Revista de Chimie*, 67(2), 205–2013.
- The Engineering ToolBox. (2009). *Combustion of Fuels and Nitrogen Oxides (NO_x) Emission*. USA: The Engineering ToolBox. Recuperado de https://www.engineeringtoolbox.com/nox-emission-combustion-fuels-d_1086.html
- The Toxicology Data Network. (1998). *Nitric Oxide*. USA: TOXNET. Recuperado de <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~d4hvJZ:1>
- Thomson, A., Giannopoulos, G., Pretty, J., Baggs, E., & Richardson, D. (2012). Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 367(1), 1157–1168.
- Tox Town. (2017). *Nitrogen Oxides*. USA: Library of Medicine. Recuperado de <https://toxtown.nlm.nih.gov/chemicals-and-contaminants/nitrogen-oxides>
- Tox Town. (2019). *Ozone*. USA: National Library of Medicine. Recuperado de <https://toxtown.nlm.nih.gov/chemicals-and-contaminants/ozone>
- United States Environmental Protection Agency. (1998). *NO_x: How nitrogen oxides affect the way we live and breathe*. U.S. USA: Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled*. USA: Clean Air Technology Center. doi: https://doi.org/EPA_456/F-99-006R
- United States Environmental Protection Agency. (2015). *NAAQS Table*. USA: USEPA. Recuperado de <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table#3>
- United States Environmental Protection Agency. (2017a). *Ecosystem Effects of Ozone Pollution*. USA: USEPA. Recuperado de <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ecosystem-effects-ozone-pollution>

- United States Environmental Protection Agency. (2017b). *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. USA: USEPA. Recuperado de <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- United States Environmental Protection Agency. (2018). *Ground-level Ozone Pollution*. USA: USEPA. Recuperado de <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation>
- United States Environmental Protection Agency. (2019). *Nitrogen Oxides Emissions*. USA: Report on the Environment. Recuperado de https://cfpub.epa.gov/roe/indicator_pdf.cfm?i=15
- Viloria, R. (2008). *Relación entre parámetros meteorológicos y contaminantes atmosféricos medidos con un sistema DOAS en Burgos*. España: CONAMA.
- Wang, W., Cheng, T., Gu, X., Chen, H., Guo, H., Wang, Y., Bao, F., Shi, S., Xu, B., Zuo, X., Meng, C., & Zhang, X. (2016). Assessing Spatial and Temporal Patterns of Observed Ground-level Ozone in China. *Scientific Reports*, 7, 1–12.
- Wang, X., Shen, Z., Cao, J., Zhang, L., Liu, L., Li, J., Liu, S., & Sun, Y. (2012). Characteristics of surface ozone at an urban site of Xi'an in Northeast China. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(116), 116–126.
- Wrage, N., Velthof, G., van Beusichem, M., & Oenema, O. (2001). Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, 33(1), 1723–1732.
- Zhang, J., Wang, C., Qu, K., Ding, J., Shang, Y., Liu, H., & Wei, M. (2019). Characteristics of Ozone Pollution, Regional Distribution and Causes during 2014-2018 in Shandong Province, East China. *Atmosphere*, 10(501), 1–29.
- Zhao, H., Zheng, Y., Li, T., Wei, L., & Guan, Q. (2018). Temporal and Spatial Variation in, and Population Exposure to, Summertime Ground-Level Ozone in Beijing. *Environmental Research and Public Health*, 15(628), 1–16.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple para el O₃

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2	X3
i	O3 SBJ	NO2 SBJ	NO SAT	NOX SAT
1	5.69	13.75	25.16	51.28
2	7.41	11.75	19.34	43.45
3	8.05	10.38	15.29	37.63
4	7.70	8.93	13.32	34.77
5	7.07	8.55	13.43	34.15
6	5.58	9.53	14.17	34.48
7	4.29	12.04	19.57	40.96
8	5.01	16.96	39.20	63.21
9	7.22	23.25	59.40	89.02
10	11.65	26.48	58.90	96.51
11	19.72	27.92	37.93	75.70
12	27.09	25.14	22.81	55.75
13	29.14	22.40	14.14	41.91
14	23.80	19.60	12.24	36.95
15	21.43	18.33	12.32	34.41
16	18.54	16.78	13.69	35.02
17	14.12	16.76	14.85	38.41
18	9.43	18.45	17.03	43.37
19	5.18	19.24	21.23	49.97
20	3.94	19.10	28.12	58.31
21	4.00	19.28	34.55	64.29
22	4.18	18.71	35.10	64.45
23	4.09	17.48	32.57	61.14
24	4.92	15.75	28.04	55.21

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(SBJ)_i = 7.12 + 1.88*NO2(SBJ)_i + 0.29*NO(SAT)_i - 0.7*NOX(SAT)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.86
Coefficiente de determinación	0.75
R^2 ajustado	0.71
Error típico	4.31
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	3.00	1098.49	366.16	19.73	0.00	3.10
Residuos	20.00	371.21	18.56			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	7.12	6.21	1.15	0.26	-5.83	20.06	-5.83	20.06
Variable X 1	1.88	0.33	5.70	0.00	1.19	2.56	1.19	2.56
Variable X 2	0.29	0.47	0.61	0.55	-0.70	1.27	-0.70	1.27
Variable X 3	-0.70	0.42	-1.67	0.11	-1.57	0.17	-1.57	0.17

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 19.73 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 19.73 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

0.71

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2	X3
i	O3 CDM	NO2 CDM	NO SAT	NOX SAT
1	3.47	21.92	25.16	51.28
2	4.76	20.17	19.34	43.45
3	5.62	19.30	15.29	37.63
4	5.88	19.35	13.32	34.77
5	5.80	19.11	13.43	34.15
6	5.19	19.60	14.17	34.48
7	3.86	21.25	19.57	40.96
8	3.65	24.85	39.20	63.21
9	4.97	30.07	59.40	89.02
10	9.05	29.29	58.90	96.51
11	15.40	27.27	37.93	75.70
12	19.76	27.04	22.81	55.75
13	21.75	26.85	14.14	41.91
14	20.78	25.59	12.24	36.95
15	19.24	27.13	12.32	34.41
16	17.33	28.13	13.69	35.02
17	14.04	29.20	14.85	38.41
18	8.98	29.55	17.03	43.37
19	4.49	27.94	21.23	49.97
20	2.82	27.30	28.12	58.31
21	2.35	26.35	34.55	64.29
22	2.33	25.87	35.10	64.45
23	2.39	24.89	32.57	61.14
24	2.73	23.74	28.04	55.21

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CDM)_i = - 18.28 + 0.99*NO_2(CDM)_i - 0.84*NO(SAT)_i + 0.45*NOX(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.71
Coefficiente de determinación	0.50
R^2 ajustado	0.42
Error típico	5.13
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	3.00	524.30	174.77	6.65	0.00	3.10
Residuos	20.00	525.75	26.29			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-18.28	8.29	-2.20	0.04	-35.58	-0.98	-35.58	-0.98
Variable X 1	0.99	0.36	2.74	0.01	0.24	1.75	0.24	1.75
Variable X 2	-0.84	0.42	-2.01	0.06	-1.72	0.03	-1.72	0.03
Variable X 3	0.45	0.34	1.31	0.20	-0.26	1.16	-0.26	1.16

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 6.65 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 6.65 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.42

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2	X3
i	O3 SBJ	NO2 SBJ	NO SAT	NOX SAT
1	15.41	32.08	15.58	55.66
2	19.90	26.61	10.69	45.93
3	22.77	23.82	8.42	39.28
4	25.66	21.04	7.40	34.79
5	26.43	20.58	6.61	31.74
6	24.44	22.29	6.56	31.70
7	15.71	33.24	7.38	36.08
8	9.11	41.79	13.24	49.99
9	7.39	46.75	26.64	69.28
10	9.69	47.21	35.83	81.15
11	13.69	45.75	33.39	78.48
12	18.40	42.81	27.49	71.27
13	22.25	40.30	22.46	62.30
14	25.09	38.04	17.66	55.46
15	25.64	37.74	14.95	50.11
16	23.74	39.33	13.53	46.41
17	18.95	40.89	14.57	48.02
18	14.28	43.59	14.27	50.63
19	10.49	46.11	16.06	58.33
20	8.59	47.96	19.20	64.73
21	7.85	47.08	21.00	68.25
22	8.14	45.01	23.74	71.16
23	8.66	42.20	23.41	69.42
24	12.13	37.09	19.85	63.43

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(SBJ)_i = 50.41 - 0.28 \cdot NO2(SBJ)_i + 1.09 \cdot NO(SAT)_i - 0.76 \cdot NOX(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.81
Coefficiente de determinación	0.66
R^2 ajustado	0.61
Error típico	4.25
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	3.00	710.49	236.83	13.12	0.00	3.10
Residuos	20.00	360.95	18.05			
Total	23.00	1071.43				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	50.41	6.28	8.02	0.00	37.30	63.51	37.30	63.51
Variable X 1	-0.28	0.18	-1.53	0.14	-0.66	0.10	-0.66	0.10
Variable X 2	1.09	0.44	2.48	0.02	0.17	2.00	0.17	2.00
Variable X 3	-0.76	0.28	-2.72	0.01	-1.35	-0.18	-1.35	-0.18

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 13.12 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 13.12 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.61

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2	X3
i	O3 CDM	NO2 CDM	NO SAT	NOX SAT
1	28.26	17.04	15.58	55.66
2	31.70	13.99	10.69	45.93
3	34.52	11.33	8.42	39.28
4	35.77	11.44	7.40	34.79
5	36.01	11.03	6.61	31.74
6	34.27	9.86	6.56	31.70
7	25.58	11.10	7.38	36.08
8	14.64	18.13	13.24	49.99
9	14.51	21.48	26.64	69.28
10	20.49	23.41	35.83	81.15
11	26.85	23.94	33.39	78.48
12	32.74	20.11	27.49	71.27
13	37.79	15.94	22.46	62.30
14	39.32	13.47	17.66	55.46
15	39.39	11.60	14.95	50.11
16	36.98	11.97	13.53	46.41
17	32.17	12.39	14.57	48.02
18	24.39	15.25	14.27	50.63
19	18.25	19.92	16.06	58.33
20	15.27	22.31	19.20	64.73
21	14.59	24.44	21.00	68.25
22	16.49	23.69	23.74	71.16
23	17.74	22.27	23.41	69.42
24	22.73	18.99	19.85	63.43

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CDM)_i = 48.05 - 3.02 \cdot NO_2(CDM)_i + 0.35 \cdot NO(SAT)_i + 0.43 \cdot NOX(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.90
Coefficiente de determinación	0.81
R ² ajustado	0.78
Error típico	4.15
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	3.00	1470.58	490.19	28.51	0.00	3.10
Residuos	20.00	343.93	17.20			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	48.05	7.02	6.84	0.00	33.40	62.70	33.40	62.70
Variable X 1	-3.02	0.52	-5.87	0.00	-4.10	-1.95	-4.10	-1.95
Variable X 2	0.35	0.49	0.72	0.48	-0.67	1.36	-0.67	1.36
Variable X 3	0.43	0.38	1.15	0.27	-0.35	1.22	-0.35	1.22

6. Regla de decisión

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si } F = 28.51 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$$

$$\text{Se acepta } H_0 \text{ si } F = 28.51 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

$$0.78$$

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

	Y	X1	X2	X3
i	O3 SMP	NO2 SMP	NO MO2	NOX MO2
1	6.45	12.83	50.38	70.18
2	7.69	11.30	46.86	64.65
3	8.34	9.82	36.31	52.09
4	8.84	8.74	31.30	49.34
5	8.46	9.11	26.39	41.45
6	7.64	9.72	25.80	43.96
7	6.92	10.90	37.89	57.68
8	6.97	12.89	50.39	67.45
9	8.86	15.65	59.42	81.91
10	13.80	18.09	57.91	88.79
11	22.42	17.99	46.46	82.40
12	30.77	14.35	26.89	63.64
13	33.97	11.08	17.06	50.27
14	30.90	9.44	14.85	57.35
15	27.89	8.11	14.20	60.01
16	25.80	7.53	15.92	54.95
17	21.57	7.96	17.41	50.02
18	16.63	9.61	17.29	43.42
19	10.84	12.20	19.76	46.88
20	7.11	14.51	35.57	63.60
21	5.84	15.61	35.24	60.81
22	5.72	15.31	43.11	65.20
23	5.53	15.29	49.73	70.14
24	5.78	14.27	54.40	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = - 1.13 - 0.36*NO_2(SMP)_i - 0.93*NO(MO2)_i + 0.85*NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación m	0.89
Coefficiente de determinación	0.80
R^2 ajustado	0.77
Error típico	4.59
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	3.00	1695.50	565.17	26.80	0.00	3.10
Residuos	20.00	421.80	21.09			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-1.13	5.26	-0.21	0.83	-12.10	9.85	-12.10	9.85
Variable X 1	-0.36	0.53	-0.67	0.51	-1.46	0.75	-1.46	0.75
Variable X 2	-0.93	0.11	-8.34	0.00	-1.16	-0.70	-1.16	-0.70
Variable X 3	0.85	0.15	5.74	0.00	0.54	1.16	0.54	1.16

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 26.8 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 26.8 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

0.77

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

	Y	X1	X2	X3
i	O3 CRB	NO2 CRB	NO MO2	NOX MO2
1	3.58	13.14	50.38	70.18
2	3.49	12.83	46.86	64.65
3	3.49	12.85	36.31	52.09
4	3.58	12.99	31.30	49.34
5	3.63	12.61	26.39	41.45
6	3.72	12.56	25.80	43.96
7	3.64	12.43	37.89	57.68
8	4.16	16.12	50.39	67.45
9	7.19	26.43	59.42	81.91
10	15.29	35.90	57.91	88.79
11	28.99	38.82	46.46	82.40
12	43.57	32.49	26.89	63.64
13	53.53	22.06	17.06	50.27
14	56.63	15.69	14.85	57.35
15	50.11	13.14	14.20	60.01
16	40.24	12.54	15.92	54.95
17	29.73	13.70	17.41	50.02
18	19.76	17.13	17.29	43.42
19	9.78	20.09	19.76	46.88
20	4.32	18.39	35.57	63.60
21	3.83	15.57	35.24	60.81
22	3.81	14.86	43.11	65.20
23	3.84	14.21	49.73	70.14
24	3.68	13.67	54.40	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = - 15.56 + 0.16*NO_2(CRB)_i - 1.87*NO(MO2)_i + 1.55*NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.92
Coefficiente de determinación	0.85
R^2 ajustado	0.83
Error típico	7.79
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	3.00	6778.87	2259.62	37.25	0.00	3.10
Residuos	20.00	1213.33	60.67			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-15.56	9.28	-1.68	0.11	-34.91	3.79	-34.91	3.79
Variable X 1	0.16	0.28	0.56	0.58	-0.43	0.75	-0.43	0.75
Variable X 2	-1.87	0.20	-9.40	0.00	-2.28	-1.45	-2.28	-1.45
Variable X 3	1.55	0.27	5.64	0.00	0.98	2.12	0.98	2.12

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 37.25 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 37.25 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

0.83

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

	Y	X1	X2	X3
i	O3 PPD	NO2 PPD	NO MO2	NOX MO2
1	2.48	16.82	50.38	70.18
2	2.53	15.89	46.86	64.65
3	2.54	15.31	36.31	52.09
4	2.72	14.50	31.30	49.34
5	2.74	14.26	26.39	41.45
6	2.90	13.91	25.80	43.96
7	2.94	13.88	37.89	57.68
8	3.57	16.32	50.39	67.45
9	5.49	23.94	59.42	81.91
10	10.57	33.35	57.91	88.79
11	21.34	41.02	46.46	82.40
12	28.88	43.74	26.89	63.64
13	31.71	38.29	17.06	50.27
14	34.01	36.45	14.85	57.35
15	29.38	31.88	14.20	60.01
16	23.20	28.03	15.92	54.95
17	18.05	26.07	17.41	50.02
18	12.52	25.76	17.29	43.42
19	6.81	26.45	19.76	46.88
20	3.74	24.97	35.57	63.60
21	3.06	33.04	35.24	60.81
22	3.54	20.52	43.11	65.20
23	2.72	18.74	49.73	70.14
24	2.57	17.84	54.40	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(PPD)_i = -8.36 + 0.54 \cdot NO_2(PPD)_i - 0.67 \cdot NO(MO2)_i + 0.48 \cdot NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.94
Coefficiente de determinación	0.89
R ² ajustado	0.87
Error típico	3.97
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	3.00	2505.38	835.13	53.00	0.00	3.10
Residuos	20.00	315.13	15.76			
Total	23.00	2820.50				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-8.36	4.65	-1.80	0.09	-18.06	1.33	-18.06	1.33
Variable X 1	0.54	0.19	2.82	0.01	0.14	0.93	0.14	0.93
Variable X 2	-0.67	0.19	-3.52	0.00	-1.07	-0.27	-1.07	-0.27
Variable X 3	0.48	0.22	2.22	0.04	0.03	0.94	0.03	0.94

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 53 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 53 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

0.87

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

	Y	X1	X2	X3
i	O3 SMP	NO2 SMP	NO MO2	NOX MO2
1	17.57	23.25	28.07	64.40
2	20.33	20.51	23.23	57.89
3	22.18	19.15	15.14	47.19
4	24.26	17.86	12.74	42.35
5	23.85	18.11	12.41	40.68
6	22.08	18.31	15.31	44.04
7	17.05	21.50	17.93	48.80
8	12.73	26.31	21.66	54.35
9	12.59	27.60	26.55	59.60
10	16.33	26.04	28.29	62.40
11	21.51	23.52	30.78	66.25
12	26.37	21.30	27.23	63.64
13	30.48	19.34	23.00	59.69
14	33.22	18.33	19.57	55.92
15	33.85	17.98	17.80	52.45
16	32.72	17.56	16.69	50.55
17	29.79	17.85	21.17	54.26
18	25.37	20.02	17.26	51.61
19	19.26	24.57	19.47	56.36
20	15.64	27.30	21.68	60.90
21	13.40	28.08	21.02	59.27
22	13.33	27.86	24.59	62.58
23	13.91	26.80	28.93	66.64
24	15.20	24.91	28.47	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(SMP)_i = 31.16 - 2.04 \cdot NO_2(SMP)_i - 1 \cdot NO(MO2)_i + 1.02 \cdot NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.94
Coefficiente de determinación	0.89
R^2 ajustado	0.88
Error típico	2.43
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	3.00	987.81	329.27	55.55	0.00	3.10
Residuos	20.00	118.56	5.93			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	31.16	6.20	5.03	0.00	18.23	44.10	18.23	44.10
Variable X 1	-2.04	0.18	-11.45	0.00	-2.41	-1.66	-2.41	-1.66
Variable X 2	-1.00	0.31	-3.26	0.00	-1.64	-0.36	-1.64	-0.36
Variable X 3	1.02	0.23	4.52	0.00	0.55	1.49	0.55	1.49

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 55.55 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 55.55 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.88

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

	Y	X1	X2	X3
i	O3 CRB	NO2 CRB	NO MO2	NOX MO2
1	5.46	22.49	28.07	64.40
2	6.52	21.24	23.23	57.89
3	8.99	19.92	15.14	47.19
4	11.50	18.35	12.74	42.35
5	11.99	17.46	12.41	40.68
6	9.83	17.89	15.31	44.04
7	8.06	19.73	17.93	48.80
8	7.77	17.92	21.66	54.35
9	9.01	18.44	26.55	59.60
10	11.88	19.07	28.29	62.40
11	15.41	21.19	30.78	66.25
12	21.28	21.67	27.23	63.64
13	27.99	21.27	23.00	59.69
14	34.23	19.95	19.57	55.92
15	39.10	18.92	17.80	52.45
16	39.17	18.70	16.69	50.55
17	32.92	20.39	21.17	54.26
18	21.19	23.17	17.26	51.61
19	11.11	25.74	19.47	56.36
20	6.43	25.86	21.68	60.90
21	5.35	24.52	21.02	59.27
22	5.20	23.30	24.59	62.58
23	4.88	23.02	28.93	66.64
24	5.13	22.94	28.47	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = -15.7 - 5.09 \cdot NO_2(CRB)_i - 6.23 \cdot NO(MO2)_i + 4.85 \cdot NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.67
Coefficiente de determinación	0.45
R^2 ajustado	0.37
Error típico	9.04
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	3.00	1339.93	446.64	5.47	0.01	3.10
Residuos	20.00	1633.66	81.68			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-15.70	23.70	-0.66	0.52	-65.15	33.75	-65.15	33.75
Variable X 1	-5.09	1.40	-3.63	0.00	-8.02	-2.16	-8.02	-2.16
Variable X 2	-6.23	1.72	-3.63	0.00	-9.81	-2.65	-9.81	-2.65
Variable X 3	4.85	1.38	3.51	0.00	1.97	7.73	1.97	7.73

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 5.47 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H0 si $F = 5.47 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

0.37

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

	Y	X1	X2	X3
i	O3 PPD	NO2 PPD	NO MO2	NOX MO2
1	2.82	25.73	28.07	64.40
2	3.57	23.77	23.23	57.89
3	4.95	22.15	15.14	47.19
4	5.93	20.82	12.74	42.35
5	5.51	20.87	12.41	40.68
6	4.62	22.02	15.31	44.04
7	4.31	22.75	17.93	48.80
8	3.98	22.94	21.66	54.35
9	4.85	23.66	26.55	59.60
10	6.40	24.29	28.29	62.40
11	9.04	24.67	30.78	66.25
12	12.63	25.73	27.23	63.64
13	16.22	25.89	23.00	59.69
14	19.69	26.41	19.57	55.92
15	22.46	26.87	17.80	52.45
16	22.65	27.15	16.69	50.55
17	19.47	29.12	21.17	54.26
18	13.28	31.35	17.26	51.61
19	7.75	32.27	19.47	56.36
20	4.45	32.00	21.68	60.90
21	3.30	30.69	21.02	59.27
22	2.64	29.98	24.59	62.58
23	2.56	28.94	28.93	66.64
24	2.60	27.91	28.47	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 2.31 + 0.4 \cdot NO_2(PPD)_i - 0.54 \cdot NO(MO2)_i + 0.13 \cdot NOX(MO2)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.33
Coefficiente de determinación	0.11
R^2 ajustado	-0.02
Error típico	6.81
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	3.00	116.26	38.75	0.84	0.49	3.10
Residuos	20.00	927.89	46.39			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	2.31	18.85	0.12	0.90	-37.00	41.63	-37.00	41.63
Variable X 1	0.40	0.76	0.52	0.61	-1.18	1.97	-1.18	1.97
Variable X 2	-0.54	1.41	-0.38	0.71	-3.47	2.40	-3.47	2.40
Variable X 3	0.13	1.10	0.12	0.90	-2.15	2.42	-2.15	2.42

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 0.84 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

Se acepta H_0 si $F = 0.84 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.1$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

-0.02

Anexo 2: Inferencia estadística de modelos de regresión lineal simple para el O₃

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en verano

i	Y	X1
	O3 SBJ	NO2 SBJ
1	5.69	13.75
2	7.41	11.75
3	8.05	10.38
4	7.70	8.93
5	7.07	8.55
6	5.58	9.53
7	4.29	12.04
8	5.01	16.96
9	7.22	23.25
10	11.65	26.48
11	19.72	27.92
12	27.09	25.14
13	29.14	22.40
14	23.80	19.60
15	21.43	18.33
16	18.54	16.78
17	14.12	16.76
18	9.43	18.45
19	5.18	19.24
20	3.94	19.10
21	4.00	19.28
22	4.18	18.71
23	4.09	17.48
24	4.92	15.75

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SBJ)_i = -1.88 + 0.73 \cdot NO_2(SBJ)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.49
Coefficiente de determinación	0.24
R ² ajustado	0.21
Error típico	7.11
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	357.16	357.16	7.06	0.01	4.30
Residuos	22.00	1112.54	50.57			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-1.88	4.99	-0.38	0.71	-12.22	8.47	-12.22	8.47
Variable X 1	0.73	0.27	2.66	0.01	0.16	1.30	0.16	1.30

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 7.06 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 7.06 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en verano tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

0.21

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano

i	Y	X1
	O3 SBJ	NO SAT
1	5.69	25.16
2	7.41	19.34
3	8.05	15.29
4	7.70	13.32
5	7.07	13.43
6	5.58	14.17
7	4.29	19.57
8	5.01	39.20
9	7.22	59.40
10	11.65	58.90
11	19.72	37.93
12	27.09	22.81
13	29.14	14.14
14	23.80	12.24
15	21.43	12.32
16	18.54	13.69
17	14.12	14.85
18	9.43	17.03
19	5.18	21.23
20	3.94	28.12
21	4.00	34.55
22	4.18	35.10
23	4.09	32.57
24	4.92	28.04

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SBJ)_i = 14.87 - 0.16 \cdot NO(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.28
Coefficiente de determinación	0.08
R^2 ajustado	0.03
Error típico	7.86
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	112.03	112.03	1.82	0.19	4.30
Residuos	22.00	1357.67	61.71			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.87	3.42	4.35	0.00	7.78	21.95	7.78	21.95
Variable X 1	-0.16	0.12	-1.35	0.19	-0.41	0.09	-0.41	0.09

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.82 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.82 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación SAT en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

0.03

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano

i	Y	X1
	O3 SBJ	NOX SAT
1	5.69	51.28
2	7.41	43.45
3	8.05	37.63
4	7.70	34.77
5	7.07	34.15
6	5.58	34.48
7	4.29	40.96
8	5.01	63.21
9	7.22	89.02
10	11.65	96.51
11	19.72	75.70
12	27.09	55.75
13	29.14	41.91
14	23.80	36.95
15	21.43	34.41
16	18.54	35.02
17	14.12	38.41
18	9.43	43.37
19	5.18	49.97
20	3.94	58.31
21	4.00	64.29
22	4.18	64.45
23	4.09	61.14
24	4.92	55.21

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SBJ)_i = 14.8 - 0.08 * NOX(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.17
Coefficiente de determinación	0.03
R^2 ajustado	-0.02
Error típico	8.06
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	41.97	41.97	0.65	0.43	4.30
Residuos	22.00	1427.73	64.90			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.80	5.24	2.83	0.01	3.94	25.67	3.94	25.67
Variable X 1	-0.08	0.10	-0.80	0.43	-0.28	0.12	-0.28	0.12

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.65 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.65 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

-0.02

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en verano

i	Y	X1
	O3 CDM	NO2 CDM
1	3.47	21.92
2	4.76	20.17
3	5.62	19.30
4	5.88	19.35
5	5.80	19.11
6	5.19	19.60
7	3.86	21.25
8	3.65	24.85
9	4.97	30.07
10	9.05	29.29
11	15.40	27.27
12	19.76	27.04
13	21.75	26.85
14	20.78	25.59
15	19.24	27.13
16	17.33	28.13
17	14.04	29.20
18	8.98	29.55
19	4.49	27.94
20	2.82	27.30
21	2.35	26.35
22	2.33	25.87
23	2.39	24.89
24	2.73	23.74

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CDM)_i = -9.34 + 0.72 \cdot NO_2(CDM)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.38
Coefficiente de determinación	0.15
R ² ajustado	0.11
Error típico	6.38
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	155.28	155.28	3.82	0.06	4.30
Residuos	22.00	894.77	40.67			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-9.34	9.28	-1.01	0.32	-28.58	9.90	-28.58	9.90
Variable X 1	0.72	0.37	1.95	0.06	-0.04	1.48	-0.04	1.48

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 3.82 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 3.82 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación CDM en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.11

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano

i	Y	X1
	O3 CDM	NO SAT
1	3.47	25.16
2	4.76	19.34
3	5.62	15.29
4	5.88	13.32
5	5.80	13.43
6	5.19	14.17
7	3.86	19.57
8	3.65	39.20
9	4.97	59.40
10	9.05	58.90
11	15.40	37.93
12	19.76	22.81
13	21.75	14.14
14	20.78	12.24
15	19.24	12.32
16	17.33	13.69
17	14.04	14.85
18	8.98	17.03
19	4.49	21.23
20	2.82	28.12
21	2.35	34.55
22	2.33	35.10
23	2.39	32.57
24	2.73	28.04

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O3(CDM)_i = 12.84 - 0.17 \cdot NO(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.34
Coefficiente de determinación	0.12
R^2 ajustado	0.08
Error típico	6.50
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	121.50	121.50	2.88	0.10	4.30
Residuos	22.00	928.56	42.21			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	12.84	2.83	4.54	0.00	6.98	18.70	6.98	18.70
Variable X 1	-0.17	0.10	-1.70	0.10	-0.37	0.04	-0.37	0.04

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 2.88 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 2.88 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación SAT en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.08

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano

i	Y	X1
	O3 CDM	NOX SAT
1	3.47	51.28
2	4.76	43.45
3	5.62	37.63
4	5.88	34.77
5	5.80	34.15
6	5.19	34.48
7	3.86	40.96
8	3.65	63.21
9	4.97	89.02
10	9.05	96.51
11	15.40	75.70
12	19.76	55.75
13	21.75	41.91
14	20.78	36.95
15	19.24	34.41
16	17.33	35.02
17	14.04	38.41
18	8.98	43.37
19	4.49	49.97
20	2.82	58.31
21	2.35	64.29
22	2.33	64.45
23	2.39	61.14
24	2.73	55.21

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CDM)_i = 13.52 - 0.1 \cdot NOX(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.25
Coefficiente de determinación	0.06
R^2 ajustado	0.02
Error típico	6.70
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	63.24	63.24	1.41	0.25	4.30
Residuos	22.00	986.82	44.86			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	13.52	4.36	3.10	0.01	4.49	22.55	4.49	22.55
Variable X 1	-0.10	0.08	-1.19	0.25	-0.26	0.07	-0.26	0.07

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.41 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.41 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.02

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en invierno

i	Y	X1
	O3 SBJ	NO2 SBJ
1	15.41	32.08
2	19.90	26.61
3	22.77	23.82
4	25.66	21.04
5	26.43	20.58
6	24.44	22.29
7	15.71	33.24
8	9.11	41.79
9	7.39	46.75
10	9.69	47.21
11	13.69	45.75
12	18.40	42.81
13	22.25	40.30
14	25.09	38.04
15	25.64	37.74
16	23.74	39.33
17	18.95	40.89
18	14.28	43.59
19	10.49	46.11
20	8.59	47.96
21	7.85	47.08
22	8.14	45.01
23	8.66	42.20
24	12.13	37.09

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SBJ)_i = 37.61 - 0.56 \cdot NO_2(SBJ)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.73367556
Coefficiente de determinación	0.538279827
R^2 ajustado	0.517292546
Error típico	4.741989777
Observaciones	24

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1	576.7308217	576.7308217	25.64790727	4.50857E-05	4.30
Residuos	22	494.702275	22.48646704			
Total	23	1071.433097				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	37.6089653	4.291754003	8.76307572	1.25945E-08	28.70841226	46.50951834	28.70841226	46.50951834
Variable X 1	-0.558876278	0.110354414	-5.064376297	4.50857E-05	-0.787737324	-0.330015231	-0.787737324	-0.330015231

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 25.65 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 25.65 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.52

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno

i	Y	X1
	O3 SBJ	NO SAT
1	15.41	15.58
2	19.90	10.69
3	22.77	8.42
4	25.66	7.40
5	26.43	6.61
6	24.44	6.56
7	15.71	7.38
8	9.11	13.24
9	7.39	26.64
10	9.69	35.83
11	13.69	33.39
12	18.40	27.49
13	22.25	22.46
14	25.09	17.66
15	25.64	14.95
16	23.74	13.53
17	18.95	14.57
18	14.28	14.27
19	10.49	16.06
20	8.59	19.20
21	7.85	21.00
22	8.14	23.74
23	8.66	23.41
24	12.13	19.85

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SBJ)_i = 24.75 - 0.48 \cdot NO(SAT)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.567310506
Coefficiente de determinación	0.32184121
R ² ajustado	0.291015811
Error típico	5.746942951
Observaciones	24

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1	344.8313244	344.8313244	10.44077984	0.003838753	4.30
Residuos	22	726.6017722	33.02735328			
Total	23	1071.433097				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	24.74730514	2.827648095	8.751904165	1.28755E-08	18.88312191	30.61148837	18.88312191	30.61148837
Variable X 1	-0.475133479	0.147044628	-3.23121956	0.003838753	-0.780085373	-0.170181585	-0.780085373	-0.170181585

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 10.44 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 10.44 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.29

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno

i	Y	X1
	O3 SBJ	NOX SAT
1	15.41	55.66
2	19.90	45.93
3	22.77	39.28
4	25.66	34.79
5	26.43	31.74
6	24.44	31.70
7	15.71	36.08
8	9.11	49.99
9	7.39	69.28
10	9.69	81.15
11	13.69	78.48
12	18.40	71.27
13	22.25	62.30
14	25.09	55.46
15	25.64	50.11
16	23.74	46.41
17	18.95	48.02
18	14.28	50.63
19	10.49	58.33
20	8.59	64.73
21	7.85	68.25
22	8.14	71.16
23	8.66	69.42
24	12.13	63.43

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SBJ)_i = 34.28 - 0.32 \cdot NOX(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.68954951
Coefficiente de determinación	0.475478527
R^2 ajustado	0.451636642
Error típico	5.054204669
Observaciones	24

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1	509.4434302	509.4434302	19.94299208	0.000193387	4.30
Residuos	22	561.9896664	25.54498484			
Total	23	1071.433097				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	34.2759172	4.126342775	8.306609282	3.14408E-08	25.71840605	42.83342835	25.71840605	42.83342835
Variable X 1	-0.321093471	0.071901229	-4.465757727	0.000193387	-0.470207495	-0.171979448	-0.470207495	-0.171979448

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 19.94 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 19.94 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.45

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en invierno

i	Y	X1
	O3 CDM	NO2 CDM
1	28.26	17.04
2	31.70	13.99
3	34.52	11.33
4	35.77	11.44
5	36.01	11.03
6	34.27	9.86
7	25.58	11.10
8	14.64	18.13
9	14.51	21.48
10	20.49	23.41
11	26.85	23.94
12	32.74	20.11
13	37.79	15.94
14	39.32	13.47
15	39.39	11.60
16	36.98	11.97
17	32.17	12.39
18	24.39	15.25
19	18.25	19.92
20	15.27	22.31
21	14.59	24.44
22	16.49	23.69
23	17.74	22.27
24	22.73	18.99

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CDM)_i = 50.51 - 1.39 \cdot NO_2(CDM)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.78
Coefficiente de determinación	0.61
R^2 ajustado	0.59
Error típico	5.68
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	1104.94	1104.94	34.26	0.00	4.30
Residuos	22.00	709.58	32.25			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	50.51	4.16	12.13	0.00	41.88	59.15	41.88	59.15
Variable X 1	-1.39	0.24	-5.85	0.00	-1.88	-0.90	-1.88	-0.90

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 34.26 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 34.26 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación CDM en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

0.59

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno

i	Y	X1
	O3 CDM	NO SAT
1	28.26	15.58
2	31.70	10.69
3	34.52	8.42
4	35.77	7.40
5	36.01	6.61
6	34.27	6.56
7	25.58	7.38
8	14.64	13.24
9	14.51	26.64
10	20.49	35.83
11	26.85	33.39
12	32.74	27.49
13	37.79	22.46
14	39.32	17.66
15	39.39	14.95
16	36.98	13.53
17	32.17	14.57
18	24.39	14.27
19	18.25	16.06
20	15.27	19.20
21	14.59	21.00
22	16.49	23.74
23	17.74	23.41
24	22.73	19.85

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O3(CDM)_i = 34.94 - 0.45 \cdot NO(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.41
Coefficiente de determinación	0.17
R^2 ajustado	0.13
Error típico	8.28
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	306.23	306.23	4.47	0.05	4.30
Residuos	22.00	1508.28	68.56			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	34.94	4.07	8.58	0.00	26.49	43.38	26.49	43.38
Variable X 1	-0.45	0.21	-2.11	0.05	-0.89	-0.01	-0.89	-0.01

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 4.47 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 4.47 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

0.13

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno

i	Y	X1
	O3 CDM	NOX SAT
1	28.26	55.66
2	31.70	45.93
3	34.52	39.28
4	35.77	34.79
5	36.01	31.74
6	34.27	31.70
7	25.58	36.08
8	14.64	49.99
9	14.51	69.28
10	20.49	81.15
11	26.85	78.48
12	32.74	71.27
13	37.79	62.30
14	39.32	55.46
15	39.39	50.11
16	36.98	46.41
17	32.17	48.02
18	24.39	50.63
19	18.25	58.33
20	15.27	64.73
21	14.59	68.25
22	16.49	71.16
23	17.74	69.42
24	22.73	63.43

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O3(CDM)_i = 45.33 - 0.33 \cdot NOX(SAT)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.54
Coefficiente de determinación	0.29
R^2 ajustado	0.26
Error típico	7.64
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	531.88	531.88	9.12	0.01	4.30
Residuos	22.00	1282.63	58.30			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	45.33	6.23	7.27	0.00	32.40	58.26	32.40	58.26
Variable X 1	-0.33	0.11	-3.02	0.01	-0.55	-0.10	-0.55	-0.10

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 9.12 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 9.12 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

0.26

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en verano

i	Y	X1
	O3 SMP	NO2 SMP
1	6.45	12.83
2	7.69	11.30
3	8.34	9.82
4	8.84	8.74
5	8.46	9.11
6	7.64	9.72
7	6.92	10.90
8	6.97	12.89
9	8.86	15.65
10	13.80	18.09
11	22.42	17.99
12	30.77	14.35
13	33.97	11.08
14	30.90	9.44
15	27.89	8.11
16	25.80	7.53
17	21.57	7.96
18	16.63	9.61
19	10.84	12.20
20	7.11	14.51
21	5.84	15.61
22	5.72	15.31
23	5.53	15.29
24	5.78	14.27

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 24.22 - 0.84 \cdot NO_2(SMP)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.28
Coefficiente de determinación	0.08
R ² ajustado	0.04
Error típico	9.42
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	166.63	166.63	1.88	0.18	4.30
Residuos	22.00	1950.66	88.67			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	24.22	7.74	3.13	0.00	8.17	40.27	8.17	40.27
Variable X 1	-0.84	0.62	-1.37	0.18	-2.12	0.43	-2.12	0.43

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.88 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.88 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación SMP en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

0.04

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 SMP	NO MO2
1	6.45	50.38
2	7.69	46.86
3	8.34	36.31
4	8.84	31.30
5	8.46	26.39
6	7.64	25.80
7	6.92	37.89
8	6.97	50.39
9	8.86	59.42
10	13.80	57.91
11	22.42	46.46
12	30.77	26.89
13	33.97	17.06
14	30.90	14.85
15	27.89	14.20
16	25.80	15.92
17	21.57	17.41
18	16.63	17.29
19	10.84	19.76
20	7.11	35.57
21	5.84	35.24
22	5.72	43.11
23	5.53	49.73
24	5.78	54.40

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SMP)_i = 27.88 - 0.4 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.63
Coefficiente de determinación	0.39
R ² ajustado	0.37
Error típico	7.64
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	834.78	834.78	14.32	0.00	4.30
Residuos	22.00	1282.51	58.30			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	27.88	4.00	6.97	0.00	19.59	36.17	19.59	36.17
Variable X 1	-0.40	0.11	-3.78	0.00	-0.62	-0.18	-0.62	-0.18

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 14.32 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 14.32 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

0.37

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 SMP	NOX MO2
1	6.45	70.18
2	7.69	64.65
3	8.34	52.09
4	8.84	49.34
5	8.46	41.45
6	7.64	43.96
7	6.92	57.68
8	6.97	67.45
9	8.86	81.91
10	13.80	88.79
11	22.42	82.40
12	30.77	63.64
13	33.97	50.27
14	30.90	57.35
15	27.89	60.01
16	25.80	54.95
17	21.57	50.02
18	16.63	43.42
19	10.84	46.88
20	7.11	63.60
21	5.84	60.81
22	5.72	65.20
23	5.53	70.14
24	5.78	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SMP)_i = 19.71 - 0.09 \cdot NOX(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.13
Coefficiente de determinación	0.02
R^2 ajustado	-0.03
Error típico	9.73
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	33.96	33.96	0.36	0.56	4.30
Residuos	22.00	2083.33	94.70			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	19.71	9.82	2.01	0.06	-0.66	40.08	-0.66	40.08
Variable X 1	-0.09	0.16	-0.60	0.56	-0.42	0.23	-0.42	0.23

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.36 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.36 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

-0.03

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en verano

i	Y	X1
	O3 CRB	NO2 CRB
1	3.58	13.14
2	3.49	12.83
3	3.49	12.85
4	3.58	12.99
5	3.63	12.61
6	3.72	12.56
7	3.64	12.43
8	4.16	16.12
9	7.19	26.43
10	15.29	35.90
11	28.99	38.82
12	43.57	32.49
13	53.53	22.06
14	56.63	15.69
15	50.11	13.14
16	40.24	12.54
17	29.73	13.70
18	19.76	17.13
19	9.78	20.09
20	4.32	18.39
21	3.83	15.57
22	3.81	14.86
23	3.84	14.21
24	3.68	13.67

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 4.99 + 0.66 \cdot NO_2(CRB)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.27
Coefficiente de determinación	0.07
R^2 ajustado	0.03
Error típico	18.33
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	599.38	599.38	1.78	0.20	4.30
Residuos	22.00	7392.82	336.04			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	4.99	9.61	0.52	0.61	-14.94	24.93	-14.94	24.93
Variable X 1	0.66	0.49	1.34	0.20	-0.36	1.68	-0.36	1.68

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.78 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.78 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación CRB en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

0.03

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 CRB	NO MO2
1	3.58	50.38
2	3.49	46.86
3	3.49	36.31
4	3.58	31.30
5	3.63	26.39
6	3.72	25.80
7	3.64	37.89
8	4.16	50.39
9	7.19	59.42
10	15.29	57.91
11	28.99	46.46
12	43.57	26.89
13	53.53	17.06
14	56.63	14.85
15	50.11	14.20
16	40.24	15.92
17	29.73	17.41
18	19.76	17.29
19	9.78	19.76
20	4.32	35.57
21	3.83	35.24
22	3.81	43.11
23	3.84	49.73
24	3.68	54.40

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 43.76 - 0.78 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.63
Coefficiente de determinación	0.39
R^2 ajustado	0.36
Error típico	14.88
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	3122.31	3122.31	14.11	0.00	4.30
Residuos	22.00	4869.89	221.36			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	43.76	7.79	5.62	0.00	27.60	59.92	27.60	59.92
Variable X 1	-0.78	0.21	-3.76	0.00	-1.21	-0.35	-1.21	-0.35

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 14.11 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 14.11 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

0.36

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 CRB	NOX MO2
1	3.58	70.18
2	3.49	64.65
3	3.49	52.09
4	3.58	49.34
5	3.63	41.45
6	3.72	43.96
7	3.64	57.68
8	4.16	67.45
9	7.19	81.91
10	15.29	88.79
11	28.99	82.40
12	43.57	63.64
13	53.53	50.27
14	56.63	57.35
15	50.11	60.01
16	40.24	54.95
17	29.73	50.02
18	19.76	43.42
19	9.78	46.88
20	4.32	63.60
21	3.83	60.81
22	3.81	65.20
23	3.84	70.14
24	3.68	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 25.67 - 0.15 \cdot NOX(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.10
Coefficiente de determinación	0.01
R^2 ajustado	-0.03
Error típico	18.96
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	80.17	80.17	0.22	0.64	4.30
Residuos	22.00	7912.02	359.64			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	25.67	19.14	1.34	0.19	-14.03	65.36	-14.03	65.36
Variable X 1	-0.15	0.31	-0.47	0.64	-0.78	0.49	-0.78	0.49

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.22 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.22 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

-0.03

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en verano

i	Y	X1
	O3 PPD	NO2 PPD
1	2.48	16.82
2	2.53	15.89
3	2.54	15.31
4	2.72	14.50
5	2.74	14.26
6	2.90	13.91
7	2.94	13.88
8	3.57	16.32
9	5.49	23.94
10	10.57	33.35
11	21.34	41.02
12	28.88	43.74
13	31.71	38.29
14	34.01	36.45
15	29.38	31.88
16	23.20	28.03
17	18.05	26.07
18	12.52	25.76
19	6.81	26.45
20	3.74	24.97
21	3.06	23.04
22	3.54	20.52
23	2.72	18.74
24	2.57	17.84

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = -14.33 + 1.04 \cdot NO_2(PPD)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.86
Coefficiente de determinación	0.74
R^2 ajustado	0.73
Error típico	5.74
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	2094.46	2094.46	63.46	0.00	4.30
Residuos	22.00	726.04	33.00			
Total	23.00	2820.50				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-14.33	3.37	-4.25	0.00	-21.32	-7.35	-21.32	-7.35
Variable X 1	1.04	0.13	7.97	0.00	0.77	1.31	0.77	1.31

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 63.46 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 63.46 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación PPD en verano tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

0.73

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 PPD	NO MO2
1	2.48	50.38
2	2.53	46.86
3	2.54	36.31
4	2.72	31.30
5	2.74	26.39
6	2.90	25.80
7	2.94	37.89
8	3.57	50.39
9	5.49	59.42
10	10.57	57.91
11	21.34	46.46
12	28.88	26.89
13	31.71	17.06
14	34.01	14.85
15	29.38	14.20
16	23.20	15.92
17	18.05	17.41
18	12.52	17.29
19	6.81	19.76
20	3.74	35.57
21	3.06	35.24
22	3.54	43.11
23	2.72	49.73
24	2.57	54.40

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 26.06 - 0.44 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.59
Coefficiente de determinación	0.35
R^2 ajustado	0.32
Error típico	9.10
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	996.74	996.74	12.02	0.00	4.30
Residuos	22.00	1823.76	82.90			
Total	23.00	2820.50				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	26.06	4.77	5.47	0.00	16.17	35.94	16.17	35.94
Variable X 1	-0.44	0.13	-3.47	0.00	-0.70	-0.18	-0.70	-0.18

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 12.02 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 12.02 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

0.32

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

i	Y	X1
	O3 PPD	NOX MO2
1	2.48	70.18
2	2.53	64.65
3	2.54	52.09
4	2.72	49.34
5	2.74	41.45
6	2.90	43.96
7	2.94	57.68
8	3.57	67.45
9	5.49	81.91
10	10.57	88.79
11	21.34	82.40
12	28.88	63.64
13	31.71	50.27
14	34.01	57.35
15	29.38	60.01
16	23.20	54.95
17	18.05	50.02
18	12.52	43.42
19	6.81	46.88
20	3.74	63.60
21	3.06	60.81
22	3.54	65.20
23	2.72	70.14
24	2.57	74.23

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 14 - 0.05 \cdot NOX(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.06
Coefficiente de determinación	0.00
R^2 ajustado	-0.04
Error típico	11.30
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	10.24	10.24	0.08	0.78	4.30
Residuos	22.00	2810.26	127.74			
Total	23.00	2820.50				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.00	11.41	1.23	0.23	-9.66	37.65	-9.66	37.65
Variable X 1	-0.05	0.18	-0.28	0.78	-0.43	0.33	-0.43	0.33

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.08 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.08 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

-0.04

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en invierno

i	Y	X1
	O3 SMP	NO2 SMP
1	17.57	23.25
2	20.33	20.51
3	22.18	19.15
4	24.26	17.86
5	23.85	18.11
6	22.08	18.31
7	17.05	21.50
8	12.73	26.31
9	12.59	27.60
10	16.33	26.04
11	21.51	23.52
12	26.37	21.30
13	30.48	19.34
14	33.22	18.33
15	33.85	17.98
16	32.72	17.56
17	29.79	17.85
18	25.37	20.02
19	19.26	24.57
20	15.64	27.30
21	13.40	28.08
22	13.33	27.86
23	13.91	26.80
24	15.20	24.91

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 56.26 - 1.57 \cdot NO_2(SMP)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.87
Coefficiente de determinación	0.76
R ² ajustado	0.75
Error típico	3.50
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	837.15	837.15	68.41	0.00	4.30
Residuos	22.00	269.22	12.24			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	56.26	4.28	13.15	0.00	47.39	65.13	47.39	65.13
Variable X 1	-1.57	0.19	-8.27	0.00	-1.96	-1.17	-1.96	-1.17

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 68.41 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 68.41 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación SMP en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.75

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 SMP	NO MO2
1	17.57	28.07
2	20.33	23.23
3	22.18	15.14
4	24.26	12.74
5	23.85	12.41
6	22.08	15.31
7	17.05	17.93
8	12.73	21.66
9	12.59	26.55
10	16.33	28.29
11	21.51	30.78
12	26.37	27.23
13	30.48	23.00
14	33.22	19.57
15	33.85	17.80
16	32.72	16.69
17	29.79	21.17
18	25.37	17.26
19	19.26	19.47
20	15.64	21.68
21	13.40	21.02
22	13.33	24.59
23	13.91	28.93
24	15.20	28.47

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(SMP)_i = 33.22 - 0.55 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.42
Coefficiente de determinación	0.18
R^2 ajustado	0.14
Error típico	6.42
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	199.68	199.68	4.85	0.04	4.30
Residuos	22.00	906.69	41.21			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	33.22	5.54	6.00	0.00	21.74	44.71	21.74	44.71
Variable X 1	-0.55	0.25	-2.20	0.04	-1.06	-0.03	-1.06	-0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 4.85 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 4.85 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.14

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 SMP	NOX MO2
1	17.57	64.40
2	20.33	57.89
3	22.18	47.19
4	24.26	42.35
5	23.85	40.68
6	22.08	44.04
7	17.05	48.80
8	12.73	54.35
9	12.59	59.60
10	16.33	62.40
11	21.51	66.25
12	26.37	63.64
13	30.48	59.69
14	33.22	55.92
15	33.85	52.45
16	32.72	50.55
17	29.79	54.26
18	25.37	51.61
19	19.26	56.36
20	15.64	60.90
21	13.40	59.27
22	13.33	62.58
23	13.91	66.64
24	15.20	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 40.43 - 0.34 \cdot NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.37
Coefficiente de determinación	0.14
R ² ajustado	0.10
Error típico	6.58
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	154.82	154.82	3.58	0.07	4.30
Residuos	22.00	951.54	43.25			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	40.43	10.16	3.98	0.00	19.36	61.50	19.36	61.50
Variable X 1	-0.34	0.18	-1.89	0.07	-0.71	0.03	-0.71	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 3.58 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 3.58 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.10

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en invierno

i	Y	X1
	O3 CRB	NO2 CRB
1	5.46	22.49
2	6.52	21.24
3	8.99	19.92
4	11.50	18.35
5	11.99	17.46
6	9.83	17.89
7	8.06	19.73
8	7.77	17.92
9	9.01	18.44
10	11.88	19.07
11	15.41	21.19
12	21.28	21.67
13	27.99	21.27
14	34.23	19.95
15	39.10	18.92
16	39.17	18.70
17	32.92	20.39
18	21.19	23.17
19	11.11	25.74
20	6.43	25.86
21	5.35	24.52
22	5.20	23.30
23	4.88	23.02
24	5.13	22.94

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 43.55 - 1.36 \cdot NO_2(CRB)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.30
Coefficiente de determinación	0.09
R^2 ajustado	0.05
Error típico	11.10
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	262.87	262.87	2.13	0.16	4.30
Residuos	22.00	2710.72	123.21			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	43.55	19.66	2.21	0.04	2.77	84.33	2.77	84.33
Variable X 1	-1.36	0.93	-1.46	0.16	-3.29	0.57	-3.29	0.57

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 2.13 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 2.13 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación CRB en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

0.05

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 CRB	NO MO2
1	5.46	28.07
2	6.52	23.23
3	8.99	15.14
4	11.50	12.74
5	11.99	12.41
6	9.83	15.31
7	8.06	17.93
8	7.77	21.66
9	9.01	26.55
10	11.88	28.29
11	15.41	30.78
12	21.28	27.23
13	27.99	23.00
14	34.23	19.57
15	39.10	17.80
16	39.17	16.69
17	32.92	21.17
18	21.19	17.26
19	11.11	19.47
20	6.43	21.68
21	5.35	21.02
22	5.20	24.59
23	4.88	28.93
24	5.13	28.47

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 26.57 - 0.53 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.25
Coefficiente de determinación	0.06
R^2 ajustado	0.02
Error típico	11.25
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	189.89	189.89	1.50	0.23	4.30
Residuos	22.00	2783.70	126.53			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	26.57	9.70	2.74	0.01	6.44	46.69	6.44	46.69
Variable X 1	-0.53	0.44	-1.23	0.23	-1.44	0.37	-1.44	0.37

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.5 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.5 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

0.02

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 CRB	NOX MO2
1	5.46	64.40
2	6.52	57.89
3	8.99	47.19
4	11.50	42.35
5	11.99	40.68
6	9.83	44.04
7	8.06	48.80
8	7.77	54.35
9	9.01	59.60
10	11.88	62.40
11	15.41	66.25
12	21.28	63.64
13	27.99	59.69
14	34.23	55.92
15	39.10	52.45
16	39.17	50.55
17	32.92	54.26
18	21.19	51.61
19	11.11	56.36
20	6.43	60.90
21	5.35	59.27
22	5.20	62.58
23	4.88	66.64
24	5.13	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CRB)_i = 31.02 - 0.29 \cdot NOX(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.19
Coefficiente de determinación	0.04
R^2 ajustado	-0.01
Error típico	11.41
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	109.27	109.27	0.84	0.37	4.30
Residuos	22.00	2864.32	130.20			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	31.02	17.63	1.76	0.09	-5.53	67.58	-5.53	67.58
Variable X 1	-0.29	0.31	-0.92	0.37	-0.93	0.36	-0.93	0.36

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.84 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.84 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

-0.01

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en invierno

i	Y	X1
	O3 PPD	NO2 PPD
1	2.82	25.73
2	3.57	23.77
3	4.95	22.15
4	5.93	20.82
5	5.51	20.87
6	4.62	22.02
7	4.31	22.75
8	3.98	22.94
9	4.85	23.66
10	6.40	24.29
11	9.04	24.67
12	12.63	25.73
13	16.22	25.89
14	19.69	26.41
15	22.46	26.87
16	22.65	27.15
17	19.47	29.12
18	13.28	31.35
19	7.75	32.27
20	4.45	32.00
21	3.30	30.69
22	2.64	29.98
23	2.56	28.94
24	2.60	27.91

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = - 0.1 + 0.33 \cdot NO_2(PPD)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.17
Coefficiente de determinación	0.03
R^2 ajustado	-0.01
Error típico	6.79
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	31.24	31.24	0.68	0.42	4.30
Residuos	22.00	1012.90	46.04			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-0.10	10.62	-0.01	0.99	-22.12	21.92	-22.12	21.92
Variable X 1	0.33	0.40	0.82	0.42	-0.50	1.17	-0.50	1.17

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.68 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.68 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO2 en la estación PPD en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

-0.01

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 PPD	NO MO2
1	2.82	28.07
2	3.57	23.23
3	4.95	15.14
4	5.93	12.74
5	5.51	12.41
6	4.62	15.31
7	4.31	17.93
8	3.98	21.66
9	4.85	26.55
10	6.40	28.29
11	9.04	30.78
12	12.63	27.23
13	16.22	23.00
14	19.69	19.57
15	22.46	17.80
16	22.65	16.69
17	19.47	21.17
18	13.28	17.26
19	7.75	19.47
20	4.45	21.68
21	3.30	21.02
22	2.64	24.59
23	2.56	28.93
24	2.60	28.47

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 14.85 - 0.29 \cdot NO(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = 0$

Ha: β_1 es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.23
Coefficiente de determinación	0.05
R^2 ajustado	0.01
Error típico	6.70
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	1.00	56.13	56.13	1.25	0.28	4.30
Residuos	22.00	988.01	44.91			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.85	5.78	2.57	0.02	2.86	26.84	2.86	26.84
Variable X 1	-0.29	0.26	-1.12	0.28	-0.83	0.25	-0.83	0.25

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1.25 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 1.25 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

0.01

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

i	Y	X1
	O3 PPD	NOX MO2
1	2.82	64.40
2	3.57	57.89
3	4.95	47.19
4	5.93	42.35
5	5.51	40.68
6	4.62	44.04
7	4.31	48.80
8	3.98	54.35
9	4.85	59.60
10	6.40	62.40
11	9.04	66.25
12	12.63	63.64
13	16.22	59.69
14	19.69	55.92
15	22.46	52.45
16	22.65	50.55
17	19.47	54.26
18	13.28	51.61
19	7.75	56.36
20	4.45	60.90
21	3.30	59.27
22	2.64	62.58
23	2.56	66.64
24	2.60	65.31

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(PPD)_i = 16.24 - 0.14 \cdot NOX(MO2)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_a: \beta_1 \text{ es diferente a } 0$$

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.16
Coefficiente de determinación	0.02
R ² ajustado	-0.02
Error típico	6.81
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	1.00	25.12	25.12	0.54	0.47	4.30
Residuos	22.00	1019.03	46.32			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	16.24	10.51	1.54	0.14	-5.56	38.05	-5.56	38.05
Variable X 1	-0.14	0.19	-0.74	0.47	-0.52	0.25	-0.52	0.25

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.54 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

Se acepta H0 si $F = 0.54 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,1,22) = 4.3$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno no tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

-0.02

Anexo 3: Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple para el O₃ y NO_x que toman en cuenta parámetros meteorológicos

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 SBJ	NO2 SBJ	NO SAT	NOX SAT	T SBJ	RS SAT
1	5.69	13.75	25.16	51.28	22.75	0.00
2	7.41	11.75	19.34	43.45	22.45	0.00
3	8.05	10.38	15.29	37.63	22.16	0.00
4	7.70	8.93	13.32	34.77	21.92	0.00
5	7.07	8.55	13.43	34.15	21.70	0.00
6	5.58	9.53	14.17	34.48	21.59	0.00
7	4.29	12.04	19.57	40.96	21.47	0.00
8	5.01	16.96	39.20	63.21	21.61	17.33
9	7.22	23.25	59.40	89.02	22.90	105.65
10	11.65	26.48	58.90	96.51	24.99	250.51
11	19.72	27.92	37.93	75.70	26.70	418.78
12	27.09	25.14	22.81	55.75	27.96	586.27
13	29.14	22.40	14.14	41.91	28.26	699.20
14	23.80	19.60	12.24	36.95	28.56	735.77
15	21.43	18.33	12.32	34.41	28.84	718.27
16	18.54	16.78	13.69	35.02	28.85	611.86
17	14.12	16.76	14.85	38.41	28.27	432.17
18	9.43	18.45	17.03	43.37	27.07	254.00
19	5.18	19.24	21.23	49.97	25.92	116.57
20	3.94	19.10	28.12	58.31	24.70	0.00
21	4.00	19.28	34.55	64.29	24.01	0.00
22	4.18	18.71	35.10	64.45	23.64	0.00
23	4.09	17.48	32.57	61.14	23.31	0.00
24	4.92	15.75	28.04	55.21	23.03	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(SBJ)_i = 40.41 - 0.04*NO2(SBJ)_i - 0.9*NO(SAT)_i + 0.7*NOX(SAT)_i - 2.09*T(SBJ)_i + 0.04*RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.97
R^2 ajustado	0.97
Error típico	1.48
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	5.00	1430.36	286.07	130.91	0.00	2.77
Residuos	18.00	39.34	2.19			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	40.41	8.75	4.62	0.00	22.03	58.79	22.03	58.79
Variable X 1	-0.04	0.33	-0.12	0.91	-0.72	0.65	-0.72	0.65
Variable X 2	-0.90	0.19	-4.63	0.00	-1.31	-0.49	-1.31	-0.49
Variable X 3	0.70	0.21	3.39	0.00	0.27	1.14	0.27	1.14
Variable X 4	-2.09	0.39	-5.37	0.00	-2.90	-1.27	-2.90	-1.27
Variable X 5	0.04	0.00	12.30	0.00	0.04	0.05	0.04	0.05

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 130.91 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 130.91 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

0.97

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y):	Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
Variable independiente 1 (X1):	Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en verano
Variable independiente 2 (X2):	Concentración horaria de NO en la estación SAT en verano
Variable independiente 3 (X3):	Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano
Variable independiente 4 (X4):	Temperatura horaria en la estación CDM en verano
Variable independiente 5 (X5):	Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 CDM	NO2 CDM	NO SAT	NOX SAT	T CDM	RS SAT
1	3.47	21.92	25.16	51.28	23.05	0.00
2	4.76	20.17	19.34	43.45	22.78	0.00
3	5.62	19.30	15.29	37.63	22.57	0.00
4	5.88	19.35	13.32	34.77	22.39	0.00
5	5.80	19.11	13.43	34.15	22.25	0.00
6	5.19	19.60	14.17	34.48	22.15	0.00
7	3.86	21.25	19.57	40.96	22.06	0.00
8	3.65	24.85	39.20	63.21	22.28	17.33
9	4.97	30.07	59.40	89.02	23.15	105.65
10	9.05	29.29	58.90	96.51	24.33	250.51
11	15.40	27.27	37.93	75.70	25.46	418.78
12	19.76	27.04	22.81	55.75	26.04	586.27
13	21.75	26.85	14.14	41.91	26.75	699.20
14	20.78	25.59	12.24	36.95	26.54	735.77
15	19.24	27.13	12.32	34.41	26.64	718.27
16	17.33	28.13	13.69	35.02	26.54	611.86
17	14.04	29.20	14.85	38.41	25.90	432.17
18	8.98	29.55	17.03	43.37	25.24	254.00
19	4.49	27.94	21.23	49.97	24.66	116.57
20	2.82	27.30	28.12	58.31	24.10	0.00
21	2.35	26.35	34.55	64.29	23.94	0.00
22	2.33	25.87	35.10	64.45	23.77	0.00
23	2.39	24.89	32.57	61.14	23.57	0.00
24	2.73	23.74	28.04	55.21	23.34	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CDM)_i = 45.3 + 0.01 * NO_2(CDM)_i - 0.43 * NO(SAT)_i + 0.31 * NOX(SAT)_i - 2.03 * T(CDM)_i + 0.03 * RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.99
R ² ajustado	0.99
Error típico	0.80
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	1038.49	207.70	323.23	0.00	2.77
Residuos	18.00	11.57	0.64			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	45.30	11.46	3.95	0.00	21.23	69.37	21.23	69.37
Variable X 1	0.01	0.15	0.05	0.96	-0.31	0.32	-0.31	0.32
Variable X 2	-0.43	0.11	-3.71	0.00	-0.67	-0.18	-0.67	-0.18
Variable X 3	0.31	0.08	3.92	0.00	0.14	0.48	0.14	0.48
Variable X 4	-2.03	0.65	-3.12	0.01	-3.40	-0.66	-3.40	-0.66
Variable X 5	0.03	0.00	14.37	0.00	0.03	0.04	0.03	0.04

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 323.23 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 323.23 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y):	Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
Variable independiente 1 (X1):	Concentración horaria de NO2 en la estación SBJ en invierno
Variable independiente 2 (X2):	Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno
Variable independiente 3 (X3):	Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno
Variable independiente 4 (X4):	Temperatura horaria en la estación SBJ en invierno
Variable independiente 5 (X5):	Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 SBJ	NO2 SBJ	NO SAT	NOX SAT	T SBJ	RS SAT
1	15.41	32.08	15.58	55.66	15.61	0.00
2	19.90	26.61	10.69	45.93	15.46	0.00
3	22.77	23.82	8.42	39.28	15.29	0.00
4	25.66	21.04	7.40	34.79	15.15	0.00
5	26.43	20.58	6.61	31.74	15.04	0.00
6	24.44	22.29	6.56	31.70	14.98	0.00
7	15.71	33.24	7.38	36.08	14.95	0.00
8	9.11	41.79	13.24	49.99	14.99	2.50
9	7.39	46.75	26.64	69.28	15.27	20.35
10	9.69	47.21	35.83	81.15	15.77	49.57
11	13.69	45.75	33.39	78.48	16.32	82.90
12	18.40	42.81	27.49	71.27	16.87	124.40
13	22.25	40.30	22.46	62.30	17.46	175.63
14	25.09	38.04	17.66	55.46	18.05	225.59
15	25.64	37.74	14.95	50.11	18.26	250.48
16	23.74	39.33	13.53	46.41	18.29	238.01
17	18.95	40.89	14.57	48.02	17.97	162.37
18	14.28	43.59	14.27	50.63	17.34	78.14
19	10.49	46.11	16.06	58.33	16.61	18.65
20	8.59	47.96	19.20	64.73	16.17	0.00
21	7.85	47.08	21.00	68.25	16.02	0.00
22	8.14	45.01	23.74	71.16	15.94	0.00
23	8.66	42.20	23.41	69.42	15.86	0.00
24	12.13	37.09	19.85	63.43	15.74	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SBJ)_i = 19.52 - 0.68 \cdot NO_2(SBJ)_i + 0.33 \cdot NO(SAT)_i - 0.18 \cdot NOX(SAT)_i + 1.56 \cdot T(SBJ)_i + 0.03 \cdot RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.97
R ² ajustado	0.96
Error típico	1.30
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	1041.19	208.24	123.93	0.00	2.77
Residuos	18.00	30.24	1.68			
Total	23.00	1071.43				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	19.52	12.07	1.62	0.12	-5.83	44.88	-5.83	44.88
Variable X 1	-0.68	0.06	-10.57	0.00	-0.82	-0.55	-0.82	-0.55
Variable X 2	0.33	0.19	1.75	0.10	-0.07	0.73	-0.07	0.73
Variable X 3	-0.18	0.12	-1.57	0.13	-0.43	0.06	-0.43	0.06
Variable X 4	1.56	0.90	1.72	0.10	-0.34	3.46	-0.34	3.46
Variable X 5	0.03	0.01	2.70	0.01	0.01	0.06	0.01	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 123.93 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 123.93 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.96

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 CDM	NO2 CDM	NO SAT	NOX SAT	T CDM	RS SAT
1	28.26	17.04	15.58	55.66	15.94	0.00
2	31.70	13.99	10.69	45.93	15.80	0.00
3	34.52	11.33	8.42	39.28	15.66	0.00
4	35.77	11.44	7.40	34.79	15.56	0.00
5	36.01	11.03	6.61	31.74	15.48	0.00
6	34.27	9.86	6.56	31.70	15.41	0.00
7	25.58	11.10	7.38	36.08	15.40	0.00
8	14.64	18.13	13.24	49.99	15.48	2.50
9	14.51	21.48	26.64	69.28	15.74	20.35
10	20.49	23.41	35.83	81.15	16.13	49.57
11	26.85	23.94	33.39	78.48	16.53	82.90
12	32.74	20.11	27.49	71.27	16.91	124.40
13	37.79	15.94	22.46	62.30	17.43	175.63
14	39.32	13.47	17.66	55.46	17.64	225.59
15	39.39	11.60	14.95	50.11	17.70	250.48
16	36.98	11.97	13.53	46.41	17.54	238.01
17	32.17	12.39	14.57	48.02	17.28	162.37
18	24.39	15.25	14.27	50.63	16.83	78.14
19	18.25	19.92	16.06	58.33	16.45	18.65
20	15.27	22.31	19.20	64.73	16.32	0.00
21	14.59	24.44	21.00	68.25	16.27	0.00
22	16.49	23.69	23.74	71.16	16.23	0.00
23	17.74	22.27	23.41	69.42	16.16	0.00
24	22.73	18.99	19.85	63.43	16.06	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CDM)_i = -41.12 - 2.48 \cdot NO_2(CDM)_i + 1.01 \cdot NO(SAT)_i - 0.17 \cdot NOX(SAT)_i + 6.4 \cdot T(CDM)_i - 0.04 \cdot RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.91
Coefficiente de determinación	0.83
R ² ajustado	0.78
Error típico	4.16
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	5.00	1503.44	300.69	17.40	0.00	2.77
Residuos	18.00	311.08	17.28			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-41.12	75.51	-0.54	0.59	-199.76	117.52	-199.76	117.52
Variable X 1	-2.48	0.88	-2.81	0.01	-4.33	-0.62	-4.33	-0.62
Variable X 2	1.01	0.70	1.43	0.17	-0.47	2.49	-0.47	2.49
Variable X 3	-0.17	0.58	-0.30	0.77	-1.40	1.05	-1.40	1.05
Variable X 4	6.40	5.36	1.19	0.25	-4.87	17.66	-4.87	17.66
Variable X 5	-0.04	0.05	-0.85	0.41	-0.14	0.06	-0.14	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 17.4 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 17.4 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

0.78

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y):	Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
Variable independiente 1 (X1):	Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en verano
Variable independiente 2 (X2):	Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
Variable independiente 3 (X3):	Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
Variable independiente 4 (X4):	Temperatura horaria en la estación SMP en verano
Variable independiente 5 (X5):	Radiación solar horaria en la estación SMP en verano

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 SMP	NO2 SMP	NO MO2	NOX MO2	T SMP	RS SMP
1	6.45	12.83	50.38	70.18	23.66	0.00
2	7.69	11.30	46.86	64.65	23.49	0.00
3	8.34	9.82	36.31	52.09	23.29	0.00
4	8.84	8.74	31.30	49.34	23.08	0.00
5	8.46	9.11	26.39	41.45	22.87	0.00
6	7.64	9.72	25.80	43.96	22.72	0.00
7	6.92	10.90	37.89	57.68	22.62	0.00
8	6.97	12.89	50.39	67.45	22.89	68.48
9	8.86	15.65	59.42	81.91	24.00	231.81
10	13.80	18.09	57.91	88.79	25.20	442.81
11	22.42	17.99	46.46	82.40	26.20	673.78
12	30.77	14.35	26.89	63.64	26.89	797.83
13	33.97	11.08	17.06	50.27	27.35	895.93
14	30.90	9.44	14.85	57.35	27.62	873.49
15	27.89	8.11	14.20	60.01	27.69	851.98
16	25.80	7.53	15.92	54.95	27.92	657.46
17	21.57	7.96	17.41	50.02	27.35	421.76
18	16.63	9.61	17.29	43.42	26.71	212.79
19	10.84	12.20	19.76	46.88	25.86	65.02
20	7.11	14.51	35.57	63.60	25.01	0.00
21	5.84	15.61	35.24	60.81	24.81	0.00
22	5.72	15.31	43.11	65.20	24.52	0.00
23	5.53	15.29	49.73	70.14	24.34	0.00
24	5.78	14.27	54.40	74.23	24.02	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = -6.09 + 0.01 \cdot NO_2(SMP)_i + 0.23 \cdot NO(MO2)_i - 0.36 \cdot NOX(MO2)_i + 1.07 \cdot T(SMP)_i + 0.03 \cdot RS(SMP)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Cálculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	1.00
Coefficiente de determinación	0.99
R ² ajustado	0.99
Error típico	1.05
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	2097.63	419.53	384.11	0.00	2.77
Residuos	18.00	19.66	1.09			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-6.09	7.66	-0.79	0.44	-22.19	10.01	-22.19	10.01
Variable X 1	0.01	0.13	0.07	0.94	-0.25	0.27	-0.25	0.27
Variable X 2	0.23	0.09	2.68	0.02	0.05	0.41	0.05	0.41
Variable X 3	-0.36	0.08	-4.38	0.00	-0.54	-0.19	-0.54	-0.19
Variable X 4	1.07	0.35	3.05	0.01	0.33	1.80	0.33	1.80
Variable X 5	0.03	0.00	18.63	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 384.11 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 384.11 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación CRB en verano
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación CRB en verano

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 CRB	NO2 CRB	NO MO2	NOX MO2	T CRB	RS CRB
1	3.58	13.14	50.38	70.18	24.00	0.00
2	3.49	12.83	46.86	64.65	23.66	0.00
3	3.49	12.85	36.31	52.09	23.44	0.00
4	3.58	12.99	31.30	49.34	23.30	0.00
5	3.63	12.61	26.39	41.45	23.17	0.00
6	3.72	12.56	25.80	43.96	22.98	0.00
7	3.64	12.43	37.89	57.68	22.88	0.00
8	4.16	16.12	50.39	67.45	23.15	57.68
9	7.19	26.43	59.42	81.91	24.59	224.28
10	15.29	35.90	57.91	88.79	26.18	388.33
11	28.99	38.82	46.46	82.40	27.10	553.84
12	43.57	32.49	26.89	63.64	28.06	710.08
13	53.53	22.06	17.06	50.27	28.48	791.88
14	56.63	15.69	14.85	57.35	28.89	739.17
15	50.11	13.14	14.20	60.01	29.01	721.29
16	40.24	12.54	15.92	54.95	28.96	524.14
17	29.73	13.70	17.41	50.02	28.55	345.83
18	19.76	17.13	17.29	43.42	27.62	163.43
19	9.78	20.09	19.76	46.88	26.81	47.91
20	4.32	18.39	35.57	63.60	25.89	0.00
21	3.83	15.57	35.24	60.81	25.35	0.00
22	3.81	14.86	43.11	65.20	25.02	0.00
23	3.84	14.21	49.73	70.14	24.67	0.00
24	3.68	13.67	54.40	74.23	24.38	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = -19.32 - 0.39 \cdot NO_2(CRB)_i + 0.01 \cdot NO(MO2)_i - 0.13 \cdot NOX(MO2)_i + 1.47 \cdot T(CRB)_i + 0.06 \cdot RS(CRB)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	1.00
Coefficiente de determinación	0.99
R^2 ajustado	0.99
Error típico	1.64
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	7943.97	1588.79	592.93	0.00	2.77
Residuos	18.00	48.23	2.68			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-19.32	10.44	-1.85	0.08	-41.25	2.61	-41.25	2.61
Variable X 1	-0.39	0.07	-5.97	0.00	-0.53	-0.25	-0.53	-0.25
Variable X 2	0.01	0.14	0.09	0.93	-0.28	0.31	-0.28	0.31
Variable X 3	-0.13	0.13	-0.97	0.34	-0.40	0.15	-0.40	0.15
Variable X 4	1.47	0.48	3.06	0.01	0.46	2.48	0.46	2.48
Variable X 5	0.06	0.00	20.74	0.00	0.05	0.06	0.05	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 592.93 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 592.93 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación PPD en verano
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación PPD en verano

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 PPD	NO2 PPD	NO MO2	NOX MO2	T PPD	RS PPD
1	2.48	16.82	50.38	70.18	23.72	0.00
2	2.53	15.89	46.86	64.65	23.42	0.00
3	2.54	15.31	36.31	52.09	23.14	0.00
4	2.72	14.50	31.30	49.34	22.84	0.00
5	2.74	14.26	26.39	41.45	22.68	0.00
6	2.90	13.91	25.80	43.96	22.54	0.00
7	2.94	13.88	37.89	57.68	22.46	0.00
8	3.57	16.32	50.39	67.45	22.87	64.18
9	5.49	23.94	59.42	81.91	24.56	218.84
10	10.57	33.35	57.91	88.79	26.49	434.99
11	21.34	41.02	46.46	82.40	27.73	599.01
12	28.88	43.74	26.89	63.64	28.63	746.11
13	31.71	38.29	17.06	50.27	29.41	809.50
14	34.01	36.45	14.85	57.35	29.78	800.65
15	29.38	31.88	14.20	60.01	29.63	661.72
16	23.20	28.03	15.92	54.95	29.34	529.64
17	18.05	26.07	17.41	50.02	28.58	331.34
18	12.52	25.76	17.29	43.42	27.42	171.02
19	6.81	26.45	19.76	46.88	26.53	42.60
20	3.74	24.97	35.57	63.60	25.67	0.00
21	3.06	23.04	35.24	60.81	25.15	0.00
22	3.54	20.52	43.11	65.20	24.77	0.00
23	2.72	18.74	49.73	70.14	24.49	0.00
24	2.57	17.84	54.40	74.23	24.16	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(PPD)_i = - 8.99 - 0.13*NO_2(PPD)_i - 0.13*NO(MO2)_i + 0.01*NOX(MO2)_i + 0.77*T(PPD)_i + 0.03*RS(PPD)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.99
R^2 ajustado	0.99
Error típico	1.30
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	2790.24	558.05	331.93	0.00	2.77
Residuos	18.00	30.26	1.68			
Total	23.00	2820.50				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-8.99	8.44	-1.07	0.30	-26.72	8.73	-26.72	8.73
Variable X 1	-0.13	0.09	-1.47	0.16	-0.31	0.05	-0.31	0.05
Variable X 2	-0.13	0.11	-1.23	0.23	-0.36	0.09	-0.36	0.09
Variable X 3	0.01	0.10	0.14	0.89	-0.20	0.23	-0.20	0.23
Variable X 4	0.77	0.41	1.87	0.08	-0.09	1.63	-0.09	1.63
Variable X 5	0.03	0.00	12.96	0.00	0.03	0.04	0.03	0.04

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 331.93 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 331.93 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación SMP en invierno

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 SMP	NO2 SMP	NO MO2	NOX MO2	T SMP	RS SMP
1	17.57	23.25	28.07	64.40	14.83	0.00
2	20.33	20.51	23.23	57.89	14.68	0.00
3	22.18	19.15	15.14	47.19	14.52	0.00
4	24.26	17.86	12.74	42.35	14.41	0.00
5	23.85	18.11	12.41	40.68	14.34	0.00
6	22.08	18.31	15.31	44.04	14.28	0.00
7	17.05	21.50	17.93	48.80	14.28	0.00
8	12.73	26.31	21.66	54.35	14.32	12.83
9	12.59	27.60	26.55	59.60	14.58	47.36
10	16.33	26.04	28.29	62.40	15.03	93.32
11	21.51	23.52	30.78	66.25	15.49	147.11
12	26.37	21.30	27.23	63.64	16.00	219.33
13	30.48	19.34	23.00	59.69	16.38	283.52
14	33.22	18.33	19.57	55.92	16.66	309.58
15	33.85	17.98	17.80	52.45	16.80	293.42
16	32.72	17.56	16.69	50.55	16.67	234.44
17	29.79	17.85	21.17	54.26	16.30	144.33
18	25.37	20.02	17.26	51.61	15.88	60.56
19	19.26	24.57	19.47	56.36	15.40	2.14
20	15.64	27.30	21.68	60.90	15.20	0.00
21	13.40	28.08	21.02	59.27	15.15	0.00
22	13.33	27.86	24.59	62.58	15.09	0.00
23	13.91	26.80	28.93	66.64	15.05	0.00
24	15.20	24.91	28.47	65.31	14.94	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 4.65 - 1.13 \cdot NO_2(SMP)_i - 0.21 \cdot NO(MO2)_i + 0.1 \cdot NOX(MO2)_i + 2.59 \cdot T(SMP)_i + 0.01 \cdot RS(SMP)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	1.00
Coefficiente de determinación	0.99
R ² ajustado	0.99
Error típico	0.64
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	1099.01	219.80	537.81	0.00	2.77
Residuos	18.00	7.36	0.41			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	4.65	6.22	0.75	0.46	-8.42	17.72	-8.42	17.72
Variable X 1	-1.13	0.07	-15.41	0.00	-1.28	-0.97	-1.28	-0.97
Variable X 2	-0.21	0.13	-1.70	0.11	-0.48	0.05	-0.48	0.05
Variable X 3	0.10	0.11	0.97	0.34	-0.12	0.32	-0.12	0.32
Variable X 4	2.59	0.53	4.87	0.00	1.47	3.70	1.47	3.70
Variable X 5	0.01	0.00	4.59	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 537.81 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 537.81 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y):	Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
Variable independiente 1 (X1):	Concentración horaria de NO2 en la estación CRB en invierno
Variable independiente 2 (X2):	Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
Variable independiente 3 (X3):	Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
Variable independiente 4 (X4):	Temperatura horaria en la estación CRB en invierno
Variable independiente 5 (X5):	Radiación solar horaria en la estación CRB en invierno

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 CRB	NO2 CRB	NO MO2	NOX MO2	T CRB	RS CRB
1	5.46	22.49	28.07	64.40	15.58	0.00
2	6.52	21.24	23.23	57.89	15.44	0.00
3	8.99	19.92	15.14	47.19	15.25	0.00
4	11.50	18.35	12.74	42.35	15.09	0.00
5	11.99	17.46	12.41	40.68	14.92	0.00
6	9.83	17.89	15.31	44.04	14.81	0.00
7	8.06	19.73	17.93	48.80	14.75	0.00
8	7.77	17.92	21.66	54.35	14.76	10.64
9	9.01	18.44	26.55	59.60	15.03	41.84
10	11.88	19.07	28.29	62.40	15.51	82.09
11	15.41	21.19	30.78	66.25	16.22	126.92
12	21.28	21.67	27.23	63.64	16.82	185.02
13	27.99	21.27	23.00	59.69	17.49	253.95
14	34.23	19.95	19.57	55.92	18.08	307.79
15	39.10	18.92	17.80	52.45	18.39	323.07
16	39.17	18.70	16.69	50.55	18.46	292.55
17	32.92	20.39	21.17	54.26	18.17	196.43
18	21.19	23.17	17.26	51.61	17.46	75.98
19	11.11	25.74	19.47	56.36	16.53	2.01
20	6.43	25.86	21.68	60.90	16.12	0.00
21	5.35	24.52	21.02	59.27	15.98	0.00
22	5.20	23.30	24.59	62.58	15.93	0.00
23	4.88	23.02	28.93	66.64	15.83	0.00
24	5.13	22.94	28.47	65.31	15.72	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = -33.25 - 0.16 \cdot NO_2(CRB)_i + 0.84 \cdot NO(MO2)_i - 0.94 \cdot NOX(MO2)_i + 5.09 \cdot T(CRB)_i + 0.05 \cdot RS(CRB)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	1.00
Coefficiente de determinación	1.00
R ² ajustado	1.00
Error típico	0.61
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	2966.80	593.36	1573.80	0.00	2.77
Residuos	18.00	6.79	0.38			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-33.25	5.25	-6.33	0.00	-44.29	-22.21	-44.29	-22.21
Variable X 1	-0.16	0.19	-0.86	0.40	-0.55	0.23	-0.55	0.23
Variable X 2	0.84	0.17	5.07	0.00	0.49	1.19	0.49	1.19
Variable X 3	-0.94	0.14	-6.75	0.00	-1.23	-0.65	-1.23	-0.65
Variable X 4	5.09	0.40	12.64	0.00	4.24	5.94	4.24	5.94
Variable X 5	0.05	0.00	10.44	0.00	0.04	0.06	0.04	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 1573.8 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 1573.8 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

1.00

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NO2 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Concentración horaria de NO en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 3 (X3): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 4 (X4): Temperatura horaria en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 5 (X5): Radiación solar horaria en la estación PPD en invierno

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
i	O3 PPD	NO2 PPD	NO MO2	NOX MO2	T PPD	RS PPD
1	2.82	25.73	28.07	64.40	15.30	0.00
2	3.57	23.77	23.23	57.89	15.18	0.00
3	4.95	22.15	15.14	47.19	15.00	0.00
4	5.93	20.82	12.74	42.35	14.83	0.00
5	5.51	20.87	12.41	40.68	14.70	0.00
6	4.62	22.02	15.31	44.04	14.62	0.00
7	4.31	22.75	17.93	48.80	14.57	0.00
8	3.98	22.94	21.66	54.35	14.62	10.06
9	4.85	23.66	26.55	59.60	14.89	39.03
10	6.40	24.29	28.29	62.40	15.36	73.17
11	9.04	24.67	30.78	66.25	16.12	130.73
12	12.63	25.73	27.23	63.64	16.92	191.54
13	16.22	25.89	23.00	59.69	17.61	249.49
14	19.69	26.41	19.57	55.92	18.18	284.40
15	22.46	26.87	17.80	52.45	18.56	303.91
16	22.65	27.15	16.69	50.55	18.62	263.24
17	19.47	29.12	21.17	54.26	18.22	170.54
18	13.28	31.35	17.26	51.61	17.47	62.63
19	7.75	32.27	19.47	56.36	16.42	1.30
20	4.45	32.00	21.68	60.90	15.96	0.00
21	3.30	30.69	21.02	59.27	15.77	0.00
22	2.64	29.98	24.59	62.58	15.63	0.00
23	2.56	28.94	28.93	66.64	15.52	0.00
24	2.60	27.91	28.47	65.31	15.41	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(PPD)_i = -27.3 + 0.05*NO_2(PPD)_i + 0.58*NO(MO2)_i - 0.62*NOX(MO2)_i + 3.42*T(PPD)_i + 0.02*RS(PPD)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	1.00
Coefficiente de determinación	1.00
R^2 ajustado	0.99
Error típico	0.52
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	5.00	1039.37	207.87	783.58	0.00	2.77
Residuos	18.00	4.78	0.27			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-27.30	6.01	-4.54	0.00	-39.91	-14.68	-39.91	-14.68
Variable X 1	0.05	0.12	0.40	0.69	-0.20	0.30	-0.20	0.30
Variable X 2	0.58	0.11	5.13	0.00	0.34	0.82	0.34	0.82
Variable X 3	-0.62	0.09	-6.59	0.00	-0.81	-0.42	-0.81	-0.42
Variable X 4	3.42	0.46	7.43	0.00	2.45	4.38	2.45	4.38
Variable X 5	0.02	0.01	4.64	0.00	0.01	0.03	0.01	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 783.58 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

Se acepta H0 si $F = 783.58 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 2.77$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

0.99

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación SAT en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2
i	NOX _{SAT}	T _{SAT}	RS _{SAT}
1	51.28	23.64	0.00
2	43.45	23.42	0.00
3	37.63	23.19	0.00
4	34.77	23.08	0.00
5	34.15	23.03	0.00
6	34.48	22.98	0.00
7	40.96	22.92	0.00
8	63.21	23.05	17.33
9	89.02	23.97	105.65
10	96.51	25.60	250.51
11	75.70	26.96	418.78
12	55.75	27.91	586.27
13	41.91	28.30	699.20
14	36.95	28.54	735.77
15	34.41	28.79	718.27
16	35.02	28.92	611.86
17	38.41	28.52	432.17
18	43.37	27.75	254.00
19	49.97	26.75	116.57
20	58.31	25.59	0.00
21	64.29	24.88	0.00
22	64.45	24.52	0.00
23	61.14	24.24	0.00
24	55.21	23.96	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$NOX(SAT)_i = 15.13 + 1.63 \cdot T(SAT)_i - 0.02 \cdot RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.21
Coefficiente de determinación	0.04
R ² ajustado	-0.05
Error típico	17.87
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	295.76	147.88	0.46	0.64	3.47
Residuos	21.00	6708.24	319.44			
Total	23.00	7004.00				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	15.13	92.41	0.16	0.87	-177.04	207.31	-177.04	207.31
Variable X 1	1.63	3.86	0.42	0.68	-6.39	9.65	-6.39	9.65
Variable X 2	-0.02	0.03	-0.75	0.46	-0.09	0.04	-0.09	0.04

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 0.46 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 0.46 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano.

8. R2

-0.05

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación MO1 en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación MO1 en verano
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación SAT en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2
<i>i</i>	<i>NOX MO1</i>	<i>T SAT</i>	<i>RS SAT</i>
1	58.86	23.64	0.00
2	54.33	23.42	0.00
3	39.17	23.19	0.00
4	31.59	23.08	0.00
5	32.72	23.03	0.00
6	34.33	22.98	0.00
7	44.21	22.92	0.00
8	70.39	23.05	17.33
9	92.13	23.97	105.65
10	98.69	25.60	250.51
11	97.22	26.96	418.78
12	79.97	27.91	586.27
13	60.21	28.30	699.20
14	50.30	28.54	735.77
15	42.98	28.79	718.27
16	44.05	28.92	611.86
17	48.84	28.52	432.17
18	54.84	27.75	254.00
19	62.15	26.75	116.57
20	79.05	25.59	0.00
21	87.09	24.88	0.00
22	88.22	24.52	0.00
23	71.79	24.24	0.00
24	64.71	23.96	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$NOX(MO1)_i = -73.07 + 5.66 * T(SAT)_i - 0.04 * RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación m	0.26
Coefficiente de determinación	0.07
R^2 ajustado	-0.02
Error típico	21.16
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	<i>F(1- α, k, n-k-1)</i>
Regresión	2.00	698.87	349.43	0.78	0.47	3.47
Residuos	21.00	9401.32	447.68			
Total	23.00	10100.19				

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-73.07	109.40	-0.67	0.51	-300.58	154.43	-300.58	154.43
Variable X 1	5.66	4.56	1.24	0.23	-3.83	15.16	-3.83	15.16
Variable X 2	-0.04	0.04	-1.18	0.25	-0.12	0.03	-0.12	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 0.78 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 0.78 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación MO1 en verano.

8. R2

-0.02

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2
i	NOX.SAT	T.SAT	RS.SAT
1	55.66	16.25	0.00
2	45.93	16.11	0.00
3	39.28	16.04	0.00
4	34.79	15.93	0.00
5	31.74	15.85	0.00
6	31.70	15.81	0.00
7	36.08	15.79	0.00
8	49.99	15.81	2.50
9	69.28	16.00	20.35
10	81.15	16.42	49.57
11	78.48	16.95	82.90
12	71.27	17.52	124.40
13	62.30	18.16	175.63
14	55.46	18.64	225.59
15	50.11	19.03	250.48
16	46.41	19.09	238.01
17	48.02	18.64	162.37
18	50.63	17.96	78.14
19	58.33	17.23	18.65
20	64.73	16.74	0.00
21	68.25	16.59	0.00
22	71.16	16.51	0.00
23	69.42	16.46	0.00
24	63.43	16.36	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$NOX(SAT)_i = - 70.61 + 7.75 * T(SAT)_i - 0.08 * RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación m	0.21
Coefficiente de determinación	0.04
R^2 ajustado	-0.05
Error típico	14.99
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	220.74	110.37	0.49	0.62	3.47
Residuos	21.00	4720.47	224.78			
Total	23.00	4941.21				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-70.61	130.45	-0.54	0.59	-341.90	200.68	-341.90	200.68
Variable X 1	7.75	8.04	0.96	0.35	-8.98	24.48	-8.98	24.48
Variable X 2	-0.08	0.10	-0.82	0.42	-0.29	0.13	-0.29	0.13

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 0.49 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 0.49 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno.

8. R2

-0.05

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación MO1 en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación MO1 en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2
i	NOX MO1	T SAT	RS SAT
1	84.31	16.25	0.00
2	70.29	16.11	0.00
3	59.47	16.04	0.00
4	54.24	15.93	0.00
5	51.05	15.85	0.00
6	52.37	15.81	0.00
7	59.72	15.79	0.00
8	82.85	15.81	2.50
9	118.69	16.00	20.35
10	125.64	16.42	49.57
11	123.54	16.95	82.90
12	112.61	17.52	124.40
13	100.35	18.16	175.63
14	97.93	18.64	225.59
15	88.45	19.03	250.48
16	81.59	19.09	238.01
17	82.44	18.64	162.37
18	86.97	17.96	78.14
19	94.63	17.23	18.65
20	96.36	16.74	0.00
21	101.31	16.59	0.00
22	99.38	16.51	0.00
23	96.38	16.46	0.00
24	95.10	16.36	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$NOX(MO1)_i = -56.73 + 8.72 \cdot T(SAT)_i - 0.04 \cdot RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.29
Coefficiente de determinación	0.08
R^2 ajustado	-0.01
Error típico	21.77
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	885.64	442.82	0.93	0.41	3.47
Residuos	21.00	9949.26	473.77			
Total	23.00	10834.90				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-56.73	189.39	-0.30	0.77	-450.59	337.13	-450.59	337.13
Variable X 1	8.72	11.68	0.75	0.46	-15.57	33.01	-15.57	33.01
Variable X 2	-0.04	0.15	-0.29	0.77	-0.35	0.26	-0.35	0.26

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 0.93 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 0.93 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación MO1 en invierno.

8. R2

-0.01

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación MO2 en verano

	Y	X1	X2
<i>i</i>	NOX MO2	T MO2	RS MO2
1	70.18	24.36	0.00
2	64.65	24.12	0.00
3	52.09	23.88	0.00
4	49.34	23.72	0.00
5	41.45	23.50	0.00
6	43.96	23.37	0.00
7	57.68	23.26	0.00
8	67.45	23.40	49.82
9	81.91	24.18	179.20
10	88.79	25.66	336.04
11	82.40	27.22	493.44
12	63.64	28.65	640.16
13	50.27	29.67	669.45
14	57.35	29.60	700.51
15	60.01	30.00	614.74
16	54.95	30.61	436.64
17	50.02	30.02	292.41
18	43.42	28.92	155.29
19	46.88	27.74	56.43
20	63.60	26.66	0.00
21	60.81	25.86	0.00
22	65.20	25.36	0.00
23	70.14	24.98	0.00
24	74.23	24.74	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$NOX(MO2)_i = 140.71 - 3.26 * T(MO2)_i + 0.03 * RS(MO2)_i$$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación m	0.41
Coefficiente de determinación	0.17
R^2 ajustado	0.09
Error típico	12.25
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	636.97	318.49	2.12	0.14	3.47
Residuos	21.00	3152.75	150.13			
Total	23.00	3789.72				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	140.71	40.21	3.50	0.00	57.09	224.33	57.09	224.33
Variable X 1	-3.26	1.62	-2.01	0.06	-6.63	0.11	-6.63	0.11
Variable X 2	0.03	0.02	1.85	0.08	0.00	0.06	0.00	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 2.12 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 2.12 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano.

8. R2

0.09

0. Evaluación de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Temperatura horaria en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación MO2 en invierno

	Y	X1	X2
i	NOX MO2	T MO2	RS MO2
1	64.40	16.22	0.00
2	57.89	16.08	0.00
3	47.19	15.81	0.00
4	42.35	15.62	0.00
5	40.68	15.47	0.00
6	44.04	15.36	0.00
7	48.80	15.28	0.00
8	54.35	15.32	1.51
9	59.60	15.45	20.83
10	62.40	15.84	48.56
11	66.25	16.34	85.08
12	63.64	16.87	117.16
13	59.69	17.37	165.95
14	55.92	17.76	212.02
15	52.45	18.09	225.17
16	50.55	18.20	149.21
17	54.26	18.06	96.05
18	51.61	17.64	67.25
19	56.36	17.21	18.58
20	60.90	16.69	0.00
21	59.27	16.45	0.00
22	62.58	16.34	0.00
23	66.64	16.28	0.00
24	65.31	16.29	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$NOX(MO2)_i = 18.41 + 2.34 * T(MO2)_i - 0.02 * RS(MO2)_i$

3. Hipotesis

H0: $\beta_1 = \beta_2 = 0$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.19
Coefficiente de determinación	0.04
R^2 ajustado	-0.06
Error típico	7.86
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	47.05	23.52	0.38	0.69	3.47
Residuos	21.00	1296.47	61.74			
Total	23.00	1343.52				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	18.41	44.05	0.42	0.68	-73.20	110.02	-73.20	110.02
Variable X 1	2.34	2.75	0.85	0.40	-3.38	8.07	-3.38	8.07
Variable X 2	-0.02	0.04	-0.54	0.59	-0.09	0.05	-0.09	0.05

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 0.38 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 0.38 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que ninguna de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno.

8. R2

-0.06

Anexo 4: Inferencia estadística de modelos de regresión lineal múltiple que toman en cuenta únicamente al NO_x y la radiación solar

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2
i	O3 SBJ	NOX SAT	RS SAT
1	5.69	51.28	0.00
2	7.41	43.45	0.00
3	8.05	37.63	0.00
4	7.70	34.77	0.00
5	7.07	34.15	0.00
6	5.58	34.48	0.00
7	4.29	40.96	0.00
8	5.01	63.21	17.33
9	7.22	89.02	105.65
10	11.65	96.51	250.51
11	19.72	75.70	418.78
12	27.09	55.75	586.27
13	29.14	41.91	699.20
14	23.80	36.95	735.77
15	21.43	34.41	718.27
16	18.54	35.02	611.86
17	14.12	38.41	432.17
18	9.43	43.37	254.00
19	5.18	49.97	116.57
20	3.94	58.31	0.00
21	4.00	64.29	0.00
22	4.18	64.45	0.00
23	4.09	61.14	0.00
24	4.92	55.21	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O3(SBJ)_i = 5 + 0 \cdot NOX(SAT)_i + 0.03 \cdot RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α ,k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.95
Coefficiente de determinación	0.90
R^2 ajustado	0.89
Error típico	2.66
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α ,k, n-k-1)
Regresión	2.00	1320.70	660.35	93.07	0.00	3.47
Residuos	21.00	149.00	7.10			
Total	23.00	1469.70				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	5.00	1.88	2.66	0.01	1.09	8.91	1.09	8.91
Variable X 1	0.00	0.03	0.09	0.93	-0.06	0.07	-0.06	0.07
Variable X 2	0.03	0.00	13.42	0.00	0.02	0.03	0.02	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 93.07 > F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 93.07 \leq F(1- \alpha,k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en verano.

8. R2

0.89

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en verano

	Y	X1	X2
i	O3 CDM	NOX SAT	RS SAT
1	3.47	51.28	0.00
2	4.76	43.45	0.00
3	5.62	37.63	0.00
4	5.88	34.77	0.00
5	5.80	34.15	0.00
6	5.19	34.48	0.00
7	3.86	40.96	0.00
8	3.65	63.21	17.33
9	4.97	89.02	105.65
10	9.05	96.51	250.51
11	15.40	75.70	418.78
12	19.76	55.75	586.27
13	21.75	41.91	699.20
14	20.78	36.95	735.77
15	19.24	34.41	718.27
16	17.33	35.02	611.86
17	14.04	38.41	432.17
18	8.98	43.37	254.00
19	4.49	49.97	116.57
20	2.82	58.31	0.00
21	2.35	64.29	0.00
22	2.33	64.45	0.00
23	2.39	61.14	0.00
24	2.73	55.21	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(CDM)_i = 5.08 - 0.03 \cdot NOX(SAT)_i + 0.02 \cdot RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.98
Coefficiente de determinación	0.96
R^2 ajustado	0.96
Error típico	1,35
Observaciones	24,00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	1011.64	505.82	276.48	0.00	3.47
Residuos	21.00	38.42	1.83			
Total	23.00	1050.06				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	5.08	0.95	5.32	0.00	3.09	7.06	3.09	7.06
Variable X 1	-0.03	0.02	-1.57	0.13	-0.06	0.01	-0.06	0.01
Variable X 2	0.02	0.00	22.77	0.00	0.02	0.03	0.02	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 276.48 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 276.48 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en verano.

8. R2

0.96

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2
i	O3 SBJ	NOX SAT	RS SAT
1	15.41	55.66	0.00
2	19.90	45.93	0.00
3	22.77	39.28	0.00
4	25.66	34.79	0.00
5	26.43	31.74	0.00
6	24.44	31.70	0.00
7	15.71	36.08	0.00
8	9.11	49.99	2.50
9	7.39	69.28	20.35
10	9.69	81.15	49.57
11	13.69	78.48	82.90
12	18.40	71.27	124.40
13	22.25	62.30	175.63
14	25.09	55.46	225.59
15	25.64	50.11	250.48
16	23.74	46.41	238.01
17	18.95	48.02	162.37
18	14.28	50.63	78.14
19	10.49	58.33	18.65
20	8.59	64.73	0.00
21	7.85	68.25	0.00
22	8.14	71.16	0.00
23	8.66	69.42	0.00
24	12.13	63.43	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O3(SBJ)_i = 32.51 - 0.33*NOX(SAT)_i + 0.04*RS(SAT)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.86
Coefficiente de determinación	0.75
R^2 ajustado	0.72
Error típico	3.60
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	798.96	399.48	30.79	0.00	3.47
Residuos	21.00	272.48	12.98			
Total	23.00	1071.43				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	32.51	2.96	10.97	0.00	26.34	38.67	26.34	38.67
Variable X 1	-0.33	0.05	-6.49	0.00	-0.44	-0.23	-0.44	-0.23
Variable X 2	0.04	0.01	4.72	0.00	0.02	0.06	0.02	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 30.79 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 30.79 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SBJ en invierno.

8. R2

0.72

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación SAT en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SAT en invierno

	Y	X1	X2
i	O3 CDM	NOX SAT	RS SAT
1	28.26	55.66	0.00
2	31.70	45.93	0.00
3	34.52	39.28	0.00
4	35.77	34.79	0.00
5	36.01	31.74	0.00
6	34.27	31.70	0.00
7	25.58	36.08	0.00
8	14.64	49.99	2.50
9	14.51	69.28	20.35
10	20.49	81.15	49.57
11	26.85	78.48	82.90
12	32.74	71.27	124.40
13	37.79	62.30	175.63
14	39.32	55.46	225.59
15	39.39	50.11	250.48
16	36.98	46.41	238.01
17	32.17	48.02	162.37
18	24.39	50.63	78.14
19	18.25	58.33	18.65
20	15.27	64.73	0.00
21	14.59	68.25	0.00
22	16.49	71.16	0.00
23	17.74	69.42	0.00
24	22.73	63.43	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(CDM)_i = 42.58 - 0.35 \cdot NOX(SAT)_i + 0.06 \cdot RS(SAT)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.82
Coefficiente de determinación	0.68
R^2 ajustado	0.65
Error típico	5.26
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	1234.22	617.11	22.33	0.00	3.47
Residuos	21.00	580.29	27.63			
Total	23.00	1814.51				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	42.58	4.33	9.84	0.00	33.58	51.57	33.58	51.57
Variable X 1	-0.35	0.07	-4.63	0.00	-0.50	-0.19	-0.50	-0.19
Variable X 2	0.06	0.01	5.04	0.00	0.04	0.09	0.04	0.09

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 22.33 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 22.33 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CDM en invierno.

8. R2

0.65

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SMP en verano

	Y	X1	X2
i	O3 SMP	NOX MO2	RS SMP
1	6.45	70.18	0.00
2	7.69	64.65	0.00
3	8.34	52.09	0.00
4	8.84	49.34	0.00
5	8.46	41.45	0.00
6	7.64	43.96	0.00
7	6.92	57.68	0.00
8	6.97	67.45	68.48
9	8.86	81.91	231.81
10	13.80	88.79	442.81
11	22.42	82.40	673.78
12	30.77	63.64	797.83
13	33.97	50.27	895.93
14	30.90	57.35	873.49
15	27.89	60.01	851.98
16	25.80	54.95	657.46
17	21.57	50.02	421.76
18	16.63	43.42	212.79
19	10.84	46.88	65.02
20	7.11	63.60	0.00
21	5.84	60.81	0.00
22	5.72	65.20	0.00
23	5.53	70.14	0.00
24	5.78	74.23	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 16.18 - 0.15 \cdot NOX(MO2)_i + 0.03 \cdot RS(SMP)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.99
R ² ajustado	0.98
Error típico	1.21
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	2086.53	1043.26	712.07	0.00	3.47
Residuos	21.00	30.77	1.47			
Total	23.00	2117.29				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	16.18	1.23	13.21	0.00	13.63	18.73	13.63	18.73
Variable X 1	-0.15	0.02	-7.81	0.00	-0.20	-0.11	-0.20	-0.11
Variable X 2	0.03	0.00	37.43	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 712.07 > F(1 - \alpha, k, n - k - 1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 712.07 \leq F(1 - \alpha, k, n - k - 1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en verano.

8. R2

0.98

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación CRB en verano

	Y	X1	X2
i	O3 CRB	NOX MO2	RS CRB
1	3.58	70.18	0.00
2	3.49	64.65	0.00
3	3.49	52.09	0.00
4	3.58	49.34	0.00
5	3.63	41.45	0.00
6	3.72	43.96	0.00
7	3.64	57.68	0.00
8	4.16	67.45	57.68
9	7.19	81.91	224.28
10	15.29	88.79	388.33
11	28.99	82.40	553.84
12	43.57	63.64	710.08
13	53.53	50.27	791.88
14	56.63	57.35	739.17
15	50.11	60.01	721.29
16	40.24	54.95	524.14
17	29.73	50.02	345.83
18	19.76	43.42	163.43
19	9.78	46.88	47.91
20	4.32	63.60	0.00
21	3.83	60.81	0.00
22	3.81	65.20	0.00
23	3.84	70.14	0.00
24	3.68	74.23	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = 19.9 - 0.28 \cdot NOX(MO2)_i + 0.06 \cdot RS(CRB)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.97
R^2 ajustado	0.97
Error típico	3.20
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	7776.68	3888.34	378.88	0.00	3.47
Residuos	21.00	215.52	10.26			
Total	23.00	7992.20				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	19.90	3.24	6.14	0.00	13.17	26.64	13.17	26.64
Variable X 1	-0.28	0.05	-5.30	0.00	-0.39	-0.17	-0.39	-0.17
Variable X 2	0.06	0.00	27.39	0.00	0.06	0.07	0.06	0.07

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 378.88 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 378.88 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en verano.

8. R2

0.97

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en verano
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación PPD en verano

	Y	X1	X2
<i>i</i>	O3 PPD	NOX MO2	RS PPD
1	2.48	70.18	0.00
2	2.53	64.65	0.00
3	2.54	52.09	0.00
4	2.72	49.34	0.00
5	2.74	41.45	0.00
6	2.90	43.96	0.00
7	2.94	57.68	0.00
8	3.57	67.45	64.18
9	5.49	81.91	218.84
10	10.57	88.79	434.99
11	21.34	82.40	599.01
12	28.88	63.64	746.11
13	31.71	50.27	809.50
14	34.01	57.35	800.65
15	29.38	60.01	661.72
16	23.20	54.95	529.64
17	18.05	50.02	331.34
18	12.52	43.42	171.02
19	6.81	46.88	42.60
20	3.74	63.60	0.00
21	3.06	60.81	0.00
22	3.54	65.20	0.00
23	2.72	70.14	0.00
24	2.57	74.23	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 11.61 - 0.15 \cdot NOX(MO2)_i + 0.04 \cdot RS(PPD)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación m	0.99
Coefficiente de determinación	0.98
R ² ajustado	0.97
Error típico	1.77
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	<i>F(1- α, k, n-k-1)</i>
Regresión	2.00	2754.51	1377.26	438.26	0.00	3.47
Residuos	21.00	65.99	3.14			
Total	23.00	2820.50				

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	11.61	1.79	6.48	0.00	7.89	15.34	7.89	15.34
Variable X 1	-0.15	0.03	-5.10	0.00	-0.21	-0.09	-0.21	-0.09
Variable X 2	0.04	0.00	29.55	0.00	0.03	0.04	0.03	0.04

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 438.26 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 438.26 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en verano.

8. R2

0.97

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación SMP en invierno

	Y	X1	X2
i	O3 SMP	NOX MO2	RS SMP
1	17.57	64.40	0.00
2	20.33	57.89	0.00
3	22.18	47.19	0.00
4	24.26	42.35	0.00
5	23.85	40.68	0.00
6	22.08	44.04	0.00
7	17.05	48.80	0.00
8	12.73	54.35	12.83
9	12.59	59.60	47.36
10	16.33	62.40	93.32
11	21.51	66.25	147.11
12	26.37	63.64	219.33
13	30.48	59.69	283.52
14	33.22	55.92	309.58
15	33.85	52.45	293.42
16	32.72	50.55	234.44
17	29.79	54.26	144.33
18	25.37	51.61	60.56
19	19.26	56.36	2.14
20	15.64	60.90	0.00
21	13.40	59.27	0.00
22	13.33	62.58	0.00
23	13.91	66.64	0.00
24	15.20	65.31	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(SMP)_i = 40.5 - 0.41 \cdot NOX(MO2)_i + 0.05 \cdot RS(SMP)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.92
Coefficiente de determinación	0.85
R^2 ajustado	0.84
Error típico	2.81
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	940.93	470.47	59.72	0.00	3.47
Residuos	21.00	165.43	7.88			
Total	23.00	1106.37				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	40.50	4.34	9.34	0.00	31.48	49.52	31.48	49.52
Variable X 1	-0.41	0.08	-5.38	0.00	-0.57	-0.25	-0.57	-0.25
Variable X 2	0.05	0.01	9.99	0.00	0.04	0.06	0.04	0.06

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 59.72 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 59.72 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación SMP en invierno.

8. R2

0.84

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación CRB en invierno

	Y	X1	X2
i	O3 CRB	NOX MO2	RS CRB
1	5.46	64.40	0.00
2	6.52	57.89	0.00
3	8.99	47.19	0.00
4	11.50	42.35	0.00
5	11.99	40.68	0.00
6	9.83	44.04	0.00
7	8.06	48.80	0.00
8	7.77	54.35	10.64
9	9.01	59.60	41.84
10	11.88	62.40	82.09
11	15.41	66.25	126.92
12	21.28	63.64	185.02
13	27.99	59.69	253.95
14	34.23	55.92	307.79
15	39.10	52.45	323.07
16	39.17	50.55	292.55
17	32.92	54.26	196.43
18	21.19	51.61	75.98
19	11.11	56.36	2.01
20	6.43	60.90	0.00
21	5.35	59.27	0.00
22	5.20	62.58	0.00
23	4.88	66.64	0.00
24	5.13	65.31	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$$O_3(CRB)_i = 25.95 - 0.33 \cdot NOX(MO2)_i + 0.1 \cdot RS(CRB)_i$$

3. Hipotesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Ha: Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.98
Coefficiente de determinación	0.96
R^2 ajustado	0.96
Error típico	2.31
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	2861.88	1430.94	269.02	0.00	3.47
Residuos	21.00	111.70	5.32			
Total	23.00	2973.59				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	25.95	3.57	7.27	0.00	18.53	33.38	18.53	33.38
Variable X 1	-0.33	0.06	-5.23	0.00	-0.46	-0.20	-0.46	-0.20
Variable X 2	0.10	0.00	22.75	0.00	0.09	0.10	0.09	0.10

6. Regla de decisión

Se rechaza H0 si $F = 269.02 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H0 si $F = 269.02 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación CRB en invierno.

8. R2

0.96

0. Evaluación de la influencia de los niveles de NOX sobre la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno

1. Definición de variables

Variable dependiente (Y): Concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno
 Variable independiente 1 (X1): Concentración horaria de NOX en la estación MO2 en invierno
 Variable independiente 2 (X2): Radiación solar horaria en la estación PPD en invierno

	Y	X1	X2
i	O3 PPD	NOX MO2	RS PPD
1	2.82	64.40	0.00
2	3.57	57.89	0.00
3	4.95	47.19	0.00
4	5.93	42.35	0.00
5	5.51	40.68	0.00
6	4.62	44.04	0.00
7	4.31	48.80	0.00
8	3.98	54.35	10.06
9	4.85	59.60	39.03
10	6.40	62.40	73.17
11	9.04	66.25	130.73
12	12.63	63.64	191.54
13	16.22	59.69	249.49
14	19.69	55.92	284.40
15	22.46	52.45	303.91
16	22.65	50.55	263.24
17	19.47	54.26	170.54
18	13.28	51.61	62.63
19	7.75	56.36	1.30
20	4.45	60.90	0.00
21	3.30	59.27	0.00
22	2.64	62.58	0.00
23	2.56	66.64	0.00
24	2.60	65.31	0.00

2. Modelo de regresión lineal múltiple estimado

$O_3(PPD)_i = 14.26 - 0.18 \cdot NOX(MO2)_i + 0.06 \cdot RS(PPD)_i$

3. Hipotesis

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : Al menos un β_i es diferente a 0

4. Nivel de significación

$\alpha = 0,05$

5. Calculo de F y determinación del F(1- α , k, n-k-1)

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación m	0.96
Coefficiente de determinación	0.92
R^2 ajustado	0.91
Error típico	1.99
Observaciones	24.00

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	F(1- α , k, n-k-1)
Regresión	2.00	961.00	480.50	121.36	0.00	3.47
Residuos	21.00	83.15	3.96			
Total	23.00	1044.15				

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.26	3.08	4.64	0.00	7.86	20.66	7.86	20.66
Variable X 1	-0.18	0.05	-3.31	0.00	-0.29	-0.07	-0.29	-0.07
Variable X 2	0.06	0.00	15.37	0.00	0.05	0.07	0.05	0.07

6. Regla de decisión

Se rechaza H_0 si $F = 121.36 > F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

Se acepta H_0 si $F = 121.36 \leq F(1- \alpha, k, n-k-1) = F(0,95,3,20) = 3.47$

7. Conclusión

Con un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que por lo menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo lineal con la concentración horaria de O3 en la estación PPD en invierno.

8. R2

0.91