

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVALUACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL MATERIAL
PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN LIMA METROPOLITANA PARA
EL PERIODO 2015-2017”**

Presentada por:

JOSÉ ABEL ESPINOZA GUILLEN

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EVALUACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL MATERIAL
PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN LIMA METROPOLITANA PARA
EL PERIODO 2015-2017”**

Presentada por:

JOSÉ ABEL ESPINOZA GUILLEN

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
PRESIDENTE

M. Sc. Armando Aramayo Bazzetti
MIEMBRO

Ing. Héctor Huisacaina Soto
MIEMBRO

Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia
ASESOR

*Este trabajo de investigación la dedico
a mis padres y hermanas que con su apoyo
constante me impulsan a seguir adelante.*

AGRADECIMIENTOS

Al Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia por sus enseñanzas y continuo asesoramiento sin los cuales este trabajo de investigación no se hubiera cumplido.

A los señores miembros del jurado por su orientación en los aspectos formales, conceptuales y metodológicos de este trabajo de investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú - SENAMHI por brindarme la data de las concentraciones de material particulado y variables meteorológicas de la red de monitoreo de Lima Metropolitana.

A la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria – DIGESA por brindarme la data de las concentraciones de material particulado y variables meteorológicas de la red de monitoreo de Lima Metropolitana.

Al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA por brindarme la data de las concentraciones de material particulado y variables meteorológicas de sus administrados en la Región de Lima Metropolitana.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1	Contaminación Atmosférica	5
2.2	Material Particulado (PM)	5
2.3	Clasificación y fuentes de material particulado.....	5
2.4	Efectos del tamaño y componentes del material particulado.....	8
2.5	Enfermedades humanas asociadas con la contaminación por Material Particulado.....	10
2.6	Mortalidad de la contaminación por material particulado.....	14
2.7	Escenario de la contaminación y guías para la regulación del material particulado.....	15
2.8	Estándar de Calidad Ambiental para Aire del PM ₁₀ y PM _{2,5}	18
2.9	Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta por contaminación del aire	19
2.10	Índice de Calidad del Aire – INCA.....	20
2.11	Relación entre el PM _{2,5} y el PM ₁₀	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Descripción del área de estudio	24
3.2	Materiales	27
3.3	Metodología	27
3.3.1	Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM ₁₀ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	27
3.3.2	Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM _{2,5} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	30

3.3.3	Cálculo y análisis de la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2,5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de Lima Metropolitana	32
3.3.4	Evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.....	33
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{10} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.....	36
4.1.1	Variación horaria y espacial del PM_{10} en Lima Metropolitana.....	37
4.1.2	Variación diaria del PM_{10} en Lima Metropolitana.....	42
4.1.3	Variación mensual del PM_{10} en Lima Metropolitana.....	46
4.1.4	Variación estacional y espacial del PM_{10} para distritos representativos de Lima Metropolitana.....	47
4.1.5	Variación multianual y tendencias del PM_{10} en Lima Metropolitana.....	55
4.2	Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.....	56
4.2.1	Variación horaria y espacial del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana.....	57
4.2.2	Variación diaria del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana.....	61
4.2.3	Variación mensual del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana.....	65
4.2.4	Variación estacional y espacial del $PM_{2,5}$ para distritos representativos de Lima Metropolitana.....	67
4.2.5	Variación multianual y tendencias del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana.....	74

4.3	Cálculo y análisis la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2,5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana.....	75
4.3.1	Variación horaria de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana.....	75
4.3.2	Variación diaria de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana	80
4.3.3	Variación mensual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana	84
4.3.4	Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para distritos representativos de Lima Metropolitana	85
4.3.5	Variación multianual y tendencias de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana	88
4.4	Evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	89
4.4.1	Relación horaria de temperatura del aire, velocidad del viento, PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana	90
4.4.2	Relación mensual de temperatura del aire, velocidad del viento, PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana	111
4.4.3	Variación espacial de la temperatura del aire y vientos en Lima Metropolitana	129
V.	CONCLUSIONES	136
5.1	De la evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{10} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	136
5.2	De la evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	137

5.3	Del cálculo y análisis de la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2,5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana	138
5.4	De la evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017	140
VI.	RECOMENDACIONES	142
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparación de las propiedades básicas del PM con respecto al tamaño de partícula: partículas finas (PM _{2,5}) versus partículas gruesas (PM ₁₀)	7
Tabla 2.	Estudios de caso sobre los efectos en la salud humana de la exposición al Material Particulado con respecto a la admisión hospitalaria aguda	13
Tabla 3.	Nivel medio anual de exposición ($\mu\text{g m}^{-3}$) de partículas entre países desarrollados y en desarrollo	16
Tabla 4.	Directrices de regulación del PM establecidas por varios gobiernos.	18
Tabla 5.	Estándares de Calidad Ambiental del Aire para para PM ₁₀ y PM _{2,5} ...	19
Tabla 6.	Guías de Calidad del Aire de la OMS para PM ₁₀ y PM _{2,5}	19
Tabla 7.	Niveles de Estados de Alerta Nacionales para PM ₁₀	20
Tabla 8.	Valores del Índice de Calidad del Aire	21
Tabla 9.	Cuidados y recomendaciones del Índice de Calidad del Aire	21
Tabla 10.	Relaciones PM _{2,5} /PM ₁₀ para Lima Metropolitana y otras ciudades...	23
Tabla 11.	Características generales de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana	25
Tabla 12.	Cálculo del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el PM ₁₀	29
Tabla 13.	Cálculo del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el PM _{2,5}	32
Tabla 14.	Estadísticas descriptivas de las concentraciones del material particulado PM ₁₀ en las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI	36
Tabla 15.	Estadísticas descriptivas de las concentraciones del material particulado PM _{2,5} en las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI	57
Tabla 16.	Correlación entre el PM ₁₀ y PM _{2,5} para las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI	79
Tabla 17.	Estadísticas descriptivas de la temperatura del aire y la velocidad del viento en las cinco estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI	90

Tabla 18.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte	92
Tabla 19.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Velocidad del Viento para a estación Campo de Marte	93
Tabla 20.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi)	95
Tabla 21.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi)	97
Tabla 22.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Temperatura del aire para a estación Carabayllo	98
Tabla 23.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Velocidad del Viento para la estación Carabayllo	100
Tabla 24.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Temperatura del aire para la estación San Borja	102
Tabla 25.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Velocidad del Viento para la estación San Borja	103
Tabla 26.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt)	105
Tabla 27.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt)	107
Tabla 28.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt)	108
Tabla 29.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt)	110
Tabla 30.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte	112
Tabla 31.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Campo de Marte	113
Tabla 32.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi)	115
Tabla 33.	Correlación entre el PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del viento (estación Antonio Raimondi)	117

Tabla 34.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ y la Temperatura del aire para la estación Carabayllo	118
Tabla 35.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ y la Velocidad del viento para la estación Carabayllo	120
Tabla 36.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ y la Temperatura del aire para la estación San Borja	121
Tabla 37.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt)	124
Tabla 38.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Santa Anita) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt)	125
Tabla 39.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Ate) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt)	127
Tabla 40.	Correlación entre el PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Ate) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt)	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Comparación de tamaños del $PM_{2,5}$ y PM_{10} con el diámetro medio de un cabello humano ($\sim 70 \mu m$) y arena de playa fina ($\sim 90 \mu m$)	6
Figura 2.	Potencial de deposición para partículas de diferentes tamaños	9
Figura 3.	Impactos de la exposición al material particulado en la salud	12
Figura 4.	Área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas y de calidad de aire de Lima Metropolitana	26
Figura 5.	Interfaz del ArcCatalog	28
Figura 6.	Interfaz del ArcMap	31
Figura 7.	Flujograma de resumen de datos y análisis de la variabilidad espacio-temporal de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$	33
Figura 8.	Variación horaria multianual del PM_{10} en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	37
Figura 9.	Variación horaria multianual del PM_{10} en la Zona Centro y Sur. Periodo 2015-2017	38
Figura 10.	Variación horaria multianual del PM_{10} en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	40
Figura 11.	Variación espacial multianual del PM_{10} en Lima Metropolitana. Periodo 2015-2017	41
Figura 12.	Variación diaria y semanal promedio del PM_{10} en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	42
Figura 13.	Variación diaria y semanal del PM_{10} en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	43
Figura 14.	Variación diaria y semanal del PM_{10} en la Zona Sur. Periodo 2015-2017	44
Figura 15.	Variación diaria y semanal del PM_{10} en la Zona Centro. Periodo 2015-2017	45
Figura 16.	Variación mensual multianual del PM_{10} para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017	46

Figura 17.	Variación estacional del PM ₁₀ para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017	48
Figura 18.	Variación estacional del PM ₁₀ para la estación Ate. Periodo 2015-2017	49
Figura 19.	Variación estacional del PM ₁₀ para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017	50
Figura 20.	Variación estacional del PM ₁₀ para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	51
Figura 21.	Distribución espacial del PM ₁₀ en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017	52
Figura 22.	Distribución espacial del PM ₁₀ en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017	54
Figura 23.	Variación del promedio anual del PM ₁₀ para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017	55
Figura 24.	Variación horaria multianual del PM _{2,5} en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	58
Figura 25.	Variación horaria multianual del PM _{2,5} en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	59
Figura 26.	Variación horaria multianual del PM _{2,5} en la Zona Centro y Sur. Periodo 2015-2017	60
Figura 27.	Variación espacial multianual del PM _{2,5} en Lima Metropolitana. Periodo 2015-2017	61
Figura 28.	Variación diaria y semanal promedio del PM _{2,5} en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	62
Figura 29.	Variación diaria y semanal promedio del PM _{2,5} en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	63
Figura 30.	Variación diaria y semanal del PM _{2,5} la Zona Sur. Periodo 2015-2017	64
Figura 31.	Variación diaria y semanal del PM _{2,5} en la Zona Centro. Periodo 2015-2017	65

Figura 32.	Variación mensual multianual del $PM_{2,5}$ para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017	66
Figura 33.	Variación estacional del $PM_{2,5}$ para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017	67
Figura 34.	Variación estacional del $PM_{2,5}$ para la estación Ate. Periodo 2015-2017	68
Figura 35.	Variación estacional del $PM_{2,5}$ para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	69
Figura 36.	Variación estacional del $PM_{2,5}$ para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017	70
Figura 37.	Distribución espacial del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017	71
Figura 38.	Distribución espacial del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017	73
Figura 39.	Variación del promedio anual del $PM_{2,5}$ para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017	74
Figura 40.	Variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	75
Figura 41.	Variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	76
Figura 42.	Variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Centro y Sur de Lima	77
Figura 43.	Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017	80
Figura 44.	Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017	81
Figura 45.	Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Sur de Lima. Periodo 2015-2017	82
Figura 46.	Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Centro de Lima. Periodo 2015-2017	83

Figura 47.	Variación mensual multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017	84
Figura 48.	Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017	85
Figura 49.	Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Ate. Periodo 2015-2017	86
Figura 50.	Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017	87
Figura 51.	Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	87
Figura 52.	Variación del promedio anual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017	88
Figura 53.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Temperatura del aire para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	91
Figura 54.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Velocidad del Viento para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	92
Figura 55.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Puente Piedra) y Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017	94
Figura 56.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ (estación Puente Piedra) y Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017	96
Figura 57.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Temperatura del aire para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017	97
Figura 58.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Velocidad del Viento para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017	99
Figura 59.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Temperatura del aire para la estación San Borja. Periodo 2015-2017	101
Figura 60.	Variación horaria multianual del PM_{10} , $PM_{2,5}$ y Velocidad de Viento para la estación San Borja. Periodo 2015-2017	102

Figura 61.	Variación horaria multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	104
Figura 62.	Variación horaria multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	105
Figura 63.	Variación horaria multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	107
Figura 64.	Variación horaria multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	109
Figura 65.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Temperatura del aire para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	111
Figura 66.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017	112
Figura 67.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017	114
Figura 68.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Puente Piedra) y Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017	116
Figura 69.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Temperatura del aire para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017	117
Figura 70.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017	119
Figura 71.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Temperatura del aire para la estación San Borja. Periodo 2015-2017	120
Figura 72.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} y Velocidad del Viento para la estación San Borja. Periodo 2015-2017	122
Figura 73.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	123

Figura 74.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Santa Anita) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	124
Figura 75.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	126
Figura 76.	Variación mensual multianual del PM ₁₀ , PM _{2,5} (estación Ate) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017	128
Figura 77.	Distribución espacial de la temperatura del aire en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017	130
Figura 78.	Distribución espacial de la temperatura del aire en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017	132
Figura 79.	Distribución espacial de los vientos en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017	133
Figura 80.	Distribución espacial de los vientos en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017	134

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis de la distribución espacial y temporal de la concentración del $PM_{2,5}$ y PM_{10} en Lima Metropolitana en el periodo 2015-2017 y las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la calidad del aire de Lima Metropolitana. Se utilizaron datos de concentración de $PM_{2,5}$, PM_{10} y variables meteorológicas medidos y analizados por la DIGESA y el SENAMHI, a través de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana. Se obtuvieron los parámetros estadísticos descriptivos de los datos, a través del software estadístico MINITAB, se generaron series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias, asimismo se elaboraron mapas temáticos con el software ArcGIS. Los resultados muestran que los promedios diarios de PM_{10} sobrepasan significativamente los Estándares de Calidad Ambiental para aire (ECA) del Perú; así como los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en casi todas las estaciones de monitoreo, superan significativamente el ECA y las guías de la OMS. La variación multianual del PM_{10} y $PM_{2,5}$ muestran una tendencia descendente moderada para el PM_{10} y alta para el $PM_{2,5}$ por lo tanto es necesario seguir aplicando medidas de control para evitar su incremento. Las zonas Norte, Sur y Este de Lima presentan los mayores valores de PM_{10} y $PM_{2,5}$. La variación temporal de la temperatura del aire y velocidad del viento se correlacionan de forma negativa con las concentraciones del PM_{10} y $PM_{2,5}$. La distribución espacial de las temperaturas del aire y dirección de vientos transportan el material particulado generado desde las Zonas Sur hacia las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana. Los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para Lima Metropolitana, se encuentran en el rango de 0.40 (Zona Este) y 0.20 (Zona Sur) con un promedio para la ciudad de 0.33.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, PM_{10} , $PM_{2,5}$, temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento y dispersión atmosférica.

ABSTRACT

This research was carried out to show an analysis was made of the spatial and temporal distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentration in Metropolitan Lima in the period 2015-2017 and the influences of meteorological variables, temperature and wind on the air quality of Metropolitan Lima. We used concentration data of $PM_{2.5}$, PM_{10} and meteorological variables measured and analyzed by DIGESA and SENAMHI, through the air quality monitoring network of Metropolitan Lima. The descriptive statistical parameters of the data were obtained, through the statistical software MINITAB, time series were generated to observe their behavior and trends, as well as thematic maps were developed with the ArcGIS software. The results show that the daily averages of PM_{10} significantly exceed the Environmental Quality Standards for air (ECA) of Peru; as well as the annual averages of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in almost all monitoring stations, significantly exceed the ECA and the WHO's guidelines. The multiannual variation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ show a moderate downward trend for PM_{10} and high for $PM_{2.5}$ therefore it is necessary to continue applying control measures to avoid its increase. The North, South and East of Lima have the highest values of PM_{10} and $PM_{2.5}$. The temporal variation of air temperature and wind speed correlate negatively with the concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$. The spatial distribution of air temperatures and direction of winds transport the particulate material generated from the Southern Zones to the North and East Zones of Metropolitan Lima. The values of the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio for Metropolitan Lima are in the range of 0.40 (East Zone) and 0.20 (South Zone) with an average for the city of 0.33.

Key words: Air pollution, PM_{10} , $PM_{2.5}$, environmental temperature, wind speed and direction and atmospheric dispersion.

I. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de las ciudades, el aumento de la quema de biomasa, el incremento del parque automotor y el crecimiento de las actividades industriales y comerciales, generan la degradación de la calidad del aire ambiental. A ello se suman las condiciones geográficas y meteorológicas particulares en las que se desarrollan estas ciudades, por ejemplo, las inversiones térmicas, que pueden hacer que la dispersión de contaminantes se vea obstruida y se produzcan condiciones de estancamiento que generan episodios de alta contaminación; la ciudad de Lima Metropolitana no es ajena a estos problemas (Alvarado, 2006; Keuken et al., 2013; OMS, 2016).

Existe una fuerte correlación entre la presencia de los contaminantes del aire con la salud de las personas, más aún de los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$. Entre los contaminantes del aire urbano, el material particulado es considerado uno de los más críticos, por sus posibles efectos sobre la salud de las personas. La mayor peligrosidad está relacionada con su capacidad de penetrar en los pulmones, alojándose allí y dañando los tejidos involucrados en el intercambio de gases (Beatriz, 2005; Janssen et al., 2013; MINAM, 2016).

La contaminación atmosférica causa al año 3 millones de muertes prematuras en las ciudades y zonas rurales del todo el mundo, según estimaciones del 2012, y un 88 por ciento de estas muertes prematuras se producen en países de ingresos bajos y medianos, además las mayores tasas de enfermedades se registran en las regiones del Pacífico Occidental y Asia Sudoriental de la OMS (OMS, 2016).

Se estima que aproximadamente el 3 por ciento de las muertes cardiopulmonares y el 5 por ciento de las muertes por cáncer de pulmón son responsabilidad de la exposición al material particulado (OMS, 2016). Se estima además que la exposición a $PM_{2.5}$ reduce la esperanza de vida de la población en 8.6 meses aproximadamente en promedio (Pascal et al., 2013).

Correia et al. (2013) sugirió un posible vínculo entre la disminución de la concentración de partículas finas y una mayor esperanza de vida basada en conjuntos de datos recolectados de 545 condados en los EEUU del 2000 al 2007. Sus investigaciones afirmaron que una disminución de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de $\text{PM}_{2.5}$ llevaría a un aumento de la esperanza de vida de 0.35 años en promedio.

Además de estos daños que causan el PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ hacia la salud de las personas, también se tiene efectos sobre la economía familiar y nacional. China sufrió una pérdida económica relacionada a la exposición por PM_{10} de \$ 106.5 mil millones lo que equivalgo a 2.1 por ciento de su PBI en el año 2009 (Hou et al., 2012). En otro estudio realizado anterior en China, Zhang et al. (2008) calcularon los efectos sobre la salud causada por la contaminación atmosférica en 111 ciudades en el 2004 estimándose un costo económico total de \$29000 millones.

Según la Organización Mundial de la Salud, más del 50 por ciento de la población mundial reside en ciudades con índices de contaminación 2.5 veces superiores de los niveles recomendados por esta organización. En un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud en el año 2014 donde se monitorearon 1600 ciudades en 91 países, identificó a Lima como una de las ciudades más contaminadas a nivel de América Latina por PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, donde sus pobladores están expuestos a valores de contaminación que exceden las Directrices de la OMS sobre Calidad del Aire (OMS, 2014).

La Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria, institución que se encarga de la vigilancia y control de las calidad del aire ambiental, hizo lo propio al realizar el estudio de saturación del año 2011 en la zonas de Lima Metropolitana y Callao donde concluyó que los principales contaminantes del aire siguen siendo el PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, los mismos que están influenciados por la acción de los vientos provenientes de sur-oeste, esto último podría contribuir al incremento de enfermedades respiratorias a las poblaciones que están ubicadas vientos abajo (DIGESA, 2012).

Es por todo lo expuesto anteriormente que se evaluó la distribución espacial y temporal de las concentraciones de estos contaminantes durante el periodo 2015-2017, con el fin de identificar aquellas zonas donde se superan los estándares de calidad ambiental y las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento sobre estas, para la elaboración de políticas eficaces de mitigación de la contaminación del aire, como pueden ser uso de combustibles renovables o limpios para la producción de electricidad, la mejora de la eficiencia del motores de vehículos y la pavimentación de sus avenidas y calles, para mejorar la situación de la calidad de aire en Lima Metropolitana.

El presente trabajo de investigación tiene un objetivo principal, el cual a su vez desencadena cuatro objetivos específicos.

Objetivo principal

- Evaluar y analizar la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana durante el periodo 2015-2017.

Objetivos específicos

- Evaluar y analizar la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{10} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.
- Evaluar y analizar la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.
- Calcular y analizar la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2,5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de Lima Metropolitana.
- Evaluar y analizar las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica es un proceso que introduce en la atmósfera diversos agentes que causan daño a los seres humanos, a otros organismos vivos y al medio ambiente (Kim et al., 2013). Wark y Warner (2007) lo definieron como la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que pueden afectar la vida de las personas, animales y plantas, e interferir en el goce de la vida, la propiedad y el ejercicio de las actividades.

2.2 Material Particulado (PM)

El material particulado es una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas en suspensión en el aire ambiental que varían continuamente su tamaño y composición en el espacio y tiempo (OMS, 2013). Entre sus constituyentes tenemos a: nitratos, sulfatos, carbono elemental y orgánico, compuestos orgánicos (por ejemplo, hidrocarburos aromáticos policíclicos), compuestos biológicos (por ejemplo, endotoxinas, fragmentos celulares) y metales (por ejemplo, hierro, cobre, níquel, zinc y vanadio) (Kim et al., 2013; OMS, 2013).

2.3 Clasificación y fuentes de material particulado

Existen diferentes maneras de clasificar al material particulado, sin embargo, el diámetro aerodinámico es uno de los principales criterios para describir su capacidad de transporte en la atmósfera y/o capacidad de inhalación a través del sistema respiratorio del organismo (Esworthy, 2013). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha estado regulando partículas principalmente en dos categorías de tamaño basadas en su capacidad de penetración en el pulmón tenemos así a las: partículas gruesas (PM₁₀) con un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 µm y las partículas finas (PM_{2,5}) con diámetro

aerodinámico menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ (Esworthy, 2013). Estas partículas provienen principalmente de diferentes fuentes, incluyendo polvo de caminos, polvo de agricultura, lechos de ríos, sitios de construcción, operaciones de minería y otras actividades similares (Juda-Rezler et al., 2011).

Una comparación de las propiedades generales que distinguen a las partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) y las gruesas (PM_{10}) se resume en el Tabla 1. Las partículas finas con un diámetro menor de $0.1 \mu\text{m}$ se clasifican como partículas ultrafinas ($\text{PM}_{0.1}$), que están aún en las primeras etapas de la investigación (Hasheminassab et al., 2013; Kumar et al., 2014). La Figura 1 muestra una comparación de tamaños entre el $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} frente al diámetro medio de un cabello humano ($\sim 70 \mu\text{m}$) y arena de playa fina ($\sim 90 \mu\text{m}$).

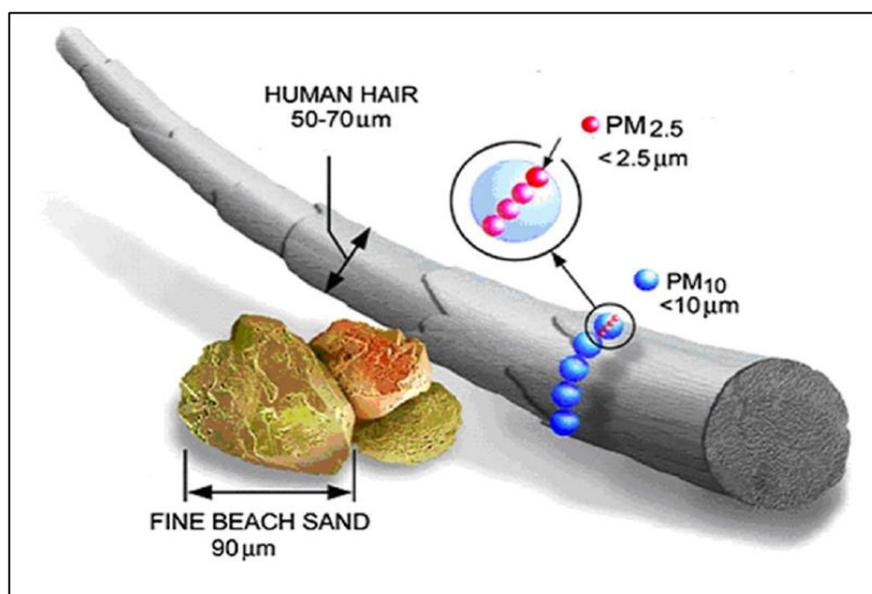


Figura 1. Comparación de tamaños del $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} con el diámetro medio de un cabello humano ($\sim 70 \mu\text{m}$) y arena de playa fina ($\sim 90 \mu\text{m}$).

FUENTE: Guaita et al., 2011.

Las fuentes de Material Particulado puede explicarse como la emisión directa al aire o como conversión de precursores de gases, tales como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles no metánicos, los cuales son liberados tanto de fuentes antropogénicas como naturales (Atkinson et al., 2010; OMS, 2011). Las fuentes antropogénicas son muy variables e incluyen la combustión de combustibles sólidos (carbón,

lignito, petróleo pesado y biomasa), las actividades industriales y agrícolas, la erosión del pavimento por el tráfico por carretera y la abrasión de frenos y neumáticos (Srimuruganandam y Nagendra, 2012). Por el contrario, los que ocurren naturalmente pueden ser explicados por fuentes como volcanes, tormentas de polvo, incendios forestales, vegetación viva y rocío (Misra et al., 2001; WHO, 2006).

Tabla 1. Comparación de las propiedades básicas del PM con respecto al tamaño de partícula: partículas finas (PM_{2,5}) versus partículas gruesas (PM₁₀).

Características	Partículas finas (PM _{2,5})	Partículas gruesas (PM ₁₀)
Diámetro	Menos de 2.5 µm	Menos de 10 µm
Compuesto de	Sulfato, SO ₄ ⁻² ; Nitrato, NO ₃ ⁻ ; Amonio, NH ₄ ⁺ ; Hidrógeno, H ⁺ ; Carbono elemental, C; compuestos orgánicos; PAH; Metales, Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn; Agua unida a partículas; y orgánicos biogénicos.	Polvo resuspendido, polvo del suelo, polvo de la calle; carbón y cenizas volantes; óxidos metálicos de Si, Al, Mg, Ti, Fe, CaCO ₃ , NaCl, sal marina; polen, esporas de moho y partes de plantas.
Fuentes	Combustión de carbón, petróleo, gasolina; Productos de transformación de NO _x , SO ₂ y compuestos orgánicos, incluyendo orgánicos biogénicos, por ejemplo, terpenos; Procesos de alta temperatura; Fundiciones y acerías.	Resuspensión del suelo rastreado en carreteras y calles; Suspensión de suelos perturbados, por ejemplo, agricultura, minería; Resuspensión de polvos industriales; Construcción, combustión del carbón y del petróleo, y rocío del océano.
Tiempo de vida	Días a semanas	Minutos a horas
Distancia de viaje (Kilómetros)	100 a 1000	1 a 10

FUENTE: Kim et al. 2015.

El tráfico es la principal fuente de material particulado, originada principalmente por el desgaste de componentes del vehículo, tales como frenos y neumáticos, así como la suspensión del polvo de la carretera (Kim et al., 2013). Las partículas inorgánicas de material cristal procedentes de la abrasión del pavimento son a menudo ricas en minerales que

contienen silicio (Si), aluminio (Al), potasio (K), sodio (Na) y calcio (Ca), mientras las partículas de desgaste de frenos y neumáticos pueden contener metales como cobre (Cu), antimonio (Sb), plomo (Pb), cadmio (Cd) y zinc (Zn) (Srimuruganandam y Nagendra, 2012).

Además de las fuentes y efectos que causan el material particulado en exteriores, no es extraño encontrar que los niveles de la concentración del material particulado en el ambiente de interior exceden los de afuera. Un número de actividades pueden generar partículas en el ambiente interior que van desde cocinar, las mascotas, caminar a través de la alfombra, los productos domésticos que generan aerosoles líquidos (por ejemplo, latas de aerosol) y equipo de oficina (por ejemplo, impresoras y fotocopiadoras); los procesos de origen del material particulado pueden incluso estar asociados con factores tales como el diseño de la casa (por ejemplo, los materiales de construcción de la casa, el tamaño y la disposición de las habitaciones y el número de ventanas para la ventilación) (Moreano y Palmisano, 2012; OMS, 2014).

2.4 Efectos del tamaño y componentes del material particulado

Se reconoce que la exposición al material particulado está muy influenciada por las condiciones locales como el clima, las estaciones, la topografía, las fuentes de partículas, las concentraciones que se emiten y los microambientes (Antonel y Chowdhury, 2014; Sánchez et al., 2015). Aunque el efecto de la exposición al material particulado depende de las características físicas (por ejemplo, el modo de respiración, la velocidad y el volumen de una persona), el tamaño de las partículas se ha relacionado directamente con la causa principal de los problemas a la salud humana (Esworthy, 2013). En general, cuanto más pequeña sea una partícula, más profundamente penetrará para depositarse en el tracto respiratorio a un ritmo creciente. En la respiración nasal, los cilios y el moco actúan como un filtro muy eficaz para la mayoría de las partículas que exceden 10 μm de diámetro (PM gruesa). Debido a que la fracción del PM gruesa se asienta rápidamente, tiende a alojarse en la tráquea (garganta superior) o en los bronquios (Atkinson et al., 2010). Si inhalamos este PM, será recogido inicialmente en nuestra nariz y garganta. Entonces, nuestro cuerpo reaccionará para eliminar estos intrusos del PM a través de procesos tales como estornudos y tos (OMS, 2016).

Hasta la fecha, se ha reconocido que las partículas que tienen el mayor impacto en los efectos sobre la salud humana son aquellas de diámetro inferior a 10 μm . Estas partículas pueden penetrar dentro del tracto respiratorio empezando por los conductos nasales hasta los alvéolos, profundamente dentro de los pulmones debido a su penetrabilidad excesiva (Londahl et al., 2006). Las partículas entre aproximadamente 5 y 10 μm se depositan más probablemente en el árbol traqueobronquial, mientras que aquellas entre 1 y 5 μm se depositan en los bronquiolos respiratorios y los alvéolos donde ocurre el intercambio gaseoso (Figura 2). Estas partículas pueden afectar el intercambio de gases dentro de los pulmones e incluso pueden penetrar en el pulmón. Eventualmente, estas partículas se escapan al torrente sanguíneo para causar problemas significativos a la salud. Las partículas más pequeñas de 1 μm en general se comportan de manera similar a las moléculas de gas y, por lo tanto, penetran hasta los alvéolos (deposición por fuerzas de difusión) y pueden trasladarse aún más al tejido celular y/o sistema de circulación (OMS, 2016).

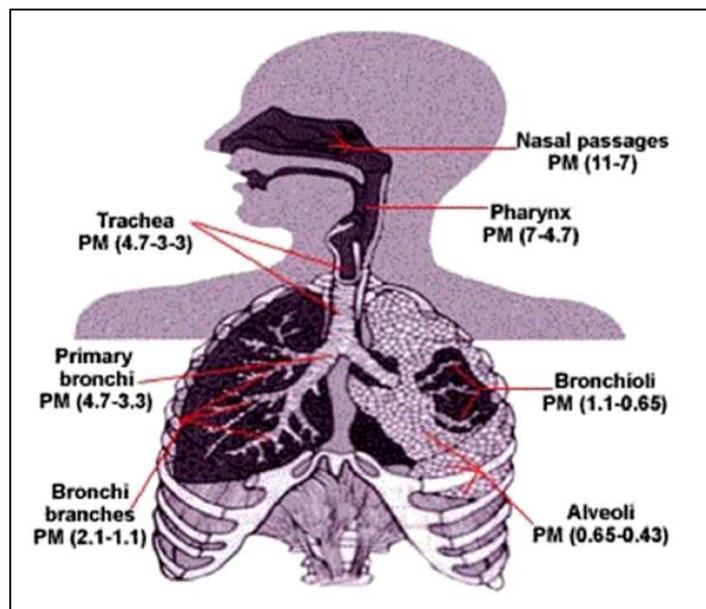


Figura 2. Potencial de deposición para partículas de diferentes tamaños.

FUENTE: Londahl et al., 2006.

Diferentes investigaciones informan que los metales presentes en el Material Particulado actúan como posibles mediadores de la lesión e inflamación de las vías respiratorias a través de la reacción de Fenton. Los metales de transición presentes en el Material Particulado, especialmente el hierro, aumentan la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) in

vivo. Como la liberación de ROS puede resultar en daño celular y de los tejidos, puede así iniciar o exacerbar la inflamación (OMS, 2016).

Además, efectos genotóxicos son atribuidos al PM los cuales pueden ser explicados por el contenido de metales de transición como el hierro. En un estudio de modelo animal se encontró una conexión directa para el papel in vivo de los metales de transición solubles en la lesión pulmonar inducida por el PM. Tenga en cuenta que las endotoxinas encontradas en el material particulado están correlacionadas con la contaminación bacteriana gram-negativa (Kim et al. 2015).

El Material Particulado también puede estar implicada en el estrés oxidativo y la inflamación, lo que posiblemente puede conducir a la apoptosis inducida por TNF α o mitocondrias. En un estudio realizado en Seúl, Corea se encontró que el extracto orgánico del metro PM₁₀ tenía efectos genotóxicos en células pulmonares humanas normales. Por consiguiente, se induce que el estrés oxidativo es uno de los principales mecanismos de estos efectos genotóxicos (Kim et al. 2015).

2.5 Enfermedades humanas asociadas con la contaminación por Material Particulado

La exposición al Material Particulado ha sido identificada como la causa de numerosos efectos sobre la salud humana, incluyendo el aumento de los ingresos hospitalarios, las visitas a las salas de emergencia, los síntomas respiratorios, la exacerbación de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas; así mismo la disminución de la función pulmonar y la mortalidad prematura (Beelen et al., 2014; Guaita et al., 2011; Pascal, 2014; Wu et al., 2014). Además, los científicos han sugerido que la exposición a altos niveles de partículas también puede conducir a diversos síntomas incluyendo el bajo peso al nacer en los bebés, los partos prematuros y posiblemente las muertes fetales e infantiles. Entre los problemas leves relacionados con la inhalación de PM_{2,5} tenemos: a la falta de aliento (disnea), malestar y dolor en el pecho, tos y sibilancias (Guaita et al., 2011).

Un estudio epidemiológico nacional en los Estados Unidos encontró una correlación fuerte y consistente entre la diabetes de adultos y la contaminación atmosférica por partículas que persisten después del ajuste para otros factores de riesgo como obesidad y origen étnico (Pearson et al., 2010). Los adultos mayores y los niños o las personas con enfermedad cardíaca (o pulmonar) están sujetos a un riesgo mucho mayor por parte de las partículas que otras personas. Se informó que la exposición al PM afecta al desarrollo pulmonar en los niños, incluyendo déficits reversibles en la función pulmonar, reducción crónica de la tasa de crecimiento pulmonar y un déficit en la función pulmonar a largo plazo (Miranda y Ortiz, 2008; Pope et al., 2002). El impacto en la salud de la exposición al PM se describe brevemente en un gráfico en la Figura 3.

Miranda y Ortiz (2008) observaron que un aumento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , generó un incremento de los casos de Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA) en niños menores a 14 años en un 1.45 por ciento diez días después, que acotado por un intervalo de confianza del 95 por ciento corresponde a un incremento entre 0.52 por ciento y 2.39 por ciento, es decir, que al haber un aumento de PM_{10} generaría un incremento en el número de consultas por ERA. Así mismo, Arciniegas y Rodríguez (2005) encontraron que un aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en los niveles de PM_{10} ocasionaría un incremento del 4 por ciento en las consultas por ERA en niños menores a cinco años, para un periodo de latencia de seis días.

Es bien sabido que la contaminación por Material Particulado está relacionada con un mayor riesgo de hospitalización por infarto de miocardio y la exacerbación de la insuficiencia cardíaca congestiva entre los ancianos (OMS, 2013). El Tabla 2 presenta una lista de estudios que se han centrado en el efecto de la exposición al PM y las admisiones hospitalarias.



Figura 3. Impactos de la exposición al material particulado en la salud.

FUENTE: Kim et al. 2015.

Tabla 2. Estudios de caso sobre los efectos en la salud humana de la exposición al Material Particulado con respecto a la admisión hospitalaria aguda.

Orden	Ubicación	Asignaturas	Contaminantes	Efecto en la salud
1	Ontario, Canadá	No específico	PM ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , CO	11% y 13% aumentaron las hospitalizaciones diarias por enfermedades respiratorias y cardíacas, respectivamente
2	204 condados de los Estados Unidos	>65 años	PM _{2,5}	Aumento de la admisión hospitalaria por enfermedades cardiovasculares y respiratorias
3	7 ciudades de los Estados Unidos	>65 años	PM ₁₀	Aumento de la admisión hospitalaria por insuficiencia cardíaca crónica
4	202 condados de los Estados Unidos	>65 años	PM _{2,5}	1.49% de aumento en las hospitalizaciones de enfermedades cardiovasculares por 10 ug m ⁻³ de aumento en las admisiones en el mismo día
5	Reino Unido	Todas las edades	PM ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , CO	Admisión hospitalaria de urgencia por enfermedad cardíaca y respiratoria
6	Taiwán	No específico	PM ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , CO	Aumento de los ingresos hospitalarios por enfermedad cardiovascular
7	Australia, Nueva Zelanda	Todas las edades	PM ₁₀ , PM _{2,5} , NO ₂ , CO	Admisiones hospitalarias cardiovasculares de adultos con cinco categorías de enfermedad cardiovascular
8	Australia	Todas las edades	PM ₁₀	Enfermedades respiratorias y cardiopatía isquémica
9	Estados Unidos	>65 años	PM _{2,5} , PM ₁₀ , PM _{10-2.5}	Aumento de 10 ug m ⁻³ en PM _{10-2.5} asociado con un aumento de 0,36% en las admisiones de enfermedades cardiovasculares en el mismo día

Continuación

10	Chipre	Todas las edades	PM ₁₀	Aumento de 10 ug m ⁻³ en el promedio diario PM ₁₀ asociado con un aumento del 0.9% en todas las causas y un aumento de 1.2% en las admisiones cardiovasculares
----	--------	------------------	------------------	--

FUENTE: Kim et al. 2015.

2.6 Mortalidad de la contaminación por material particulado.

De acuerdo con la mayoría de las investigaciones epidemiológicas actualmente difundidas, la mortalidad se ha utilizado como indicador de los efectos para la salud con respecto a la contaminación por material particulado. Además, la información sobre las admisiones diarias al hospital también se utiliza en estudios de series de tiempo. Sin embargo, esta aplicación está limitada por la falta de comparaciones entre países, pero se utiliza para las evaluaciones de impacto en la salud para reflejar diferencias en las prácticas nacionales o locales en los ingresos hospitalarios y en el uso de otras formas de atención médica en el caso de síntomas agudos. Se estima que aproximadamente el 3 por ciento de las muertes cardiopulmonares y el 5 por ciento de las muertes por cáncer de pulmón son atribuibles globalmente a la exposición al material particulado. Se estima que la exposición al PM_{2,5} reduce la esperanza de vida de la población en aproximadamente 8,6 meses en promedio (OMS, 2011). Correia et al. (2013) sugirió un posible vínculo entre la reducción de la concentración de partículas finas y una mejor esperanza de vida basada en conjuntos de datos recolectados de 545 condados en los EE.UU. de 2000 a 2007. Sus estudios afirmaron que una disminución de 10 µg m⁻³ de PM_{2,5} traería un aumento de la esperanza de vida de 0.35 años en promedio.

Varias investigaciones han aportado una fuerte evidencia de que la exposición al PM puede ejercer una influencia directa en las enfermedades cardiopulmonares y en la mortalidad por cardiopatía isquémica (OMS, 2013). Atkinson et al. (2010) informó que los aumentos de 10 µg m⁻³ en el PM₁₀ y PM_{2,5} en Londres, Inglaterra se asociaron con incrementos de 0.5 por ciento en la mortalidad por todas las causas y 2.1 por ciento en la mortalidad respiratoria, respectivamente. De forma similar, en otro estudio en los Países Bajos, los aumentos de 10 µg m⁻³ del PM₁₀ y PM_{2,5} se relacionaron con un aumento del 0,5 por ciento en todas las

causas y 1,6 por ciento en la mortalidad respiratoria, respectivamente (Janssen et al., 2013). Un aumento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ en el $\text{PM}_{2,5}$ aumentó todas las causas de mortalidad en 2,7 por ciento en Madrid, España (Guaita et al., 2011).

En contraste, varios estudios no fueron capaces de demostrar efectos significativos del $\text{PM}_{2,5}$ en todas las causas o causar mortalidad específica (Karanasiou et al., 2012). Las limitaciones de estos estudios se atribuyeron generalmente a un tamaño de población relativamente pequeño o a la corta duración del período de estudio (1 año) (Pope et al., 2002).

2.7 Escenario de la contaminación y guías para la regulación del material particulado.

La urbanización, junto con el aumento de la industrialización, de las emisiones de los vehículos, así como la suspensión de las carreteras no pavimentadas y las emisiones de la quema de los residuos y de la biomasa para las necesidades domésticas y comerciales pueden conducir a un aumento sustancial del PM en el aire ambiental (Kim et al. 2015).

El Tabla 3 enumera el nivel medio anual de exposición ($\mu\text{g m}^{-3}$) del material particulado (PM_{10}) en diferentes países del mundo. En la mayoría de los casos, las concentraciones del PM exceden las últimas directrices de calidad del aire establecidas por la OMS para la exposición anual media del PM_{10} ($20 \mu\text{g m}^{-3}$). También se observa que los niveles de concentración de partículas en los países en desarrollo son mucho más elevados que los de los países desarrollados. No hay duda de que las concentraciones crecientes de partículas deben causar o contribuir a la mortalidad prematura y los parámetros de salud relacionados con la morbilidad en esos países (Kim et al. 2015).

Tabla 3. Nivel medio anual de exposición ($\mu\text{g m}^{-3}$) de partículas entre países desarrollados y en desarrollo.

ORDEN	NOMBRE	AÑO		
		2009	2010	2011
PAÍSES DESARROLLADOS				
1	Australia	15	14	14
2	Canadá	15	14	14
3	Finlandia	16	16	16
4	Nueva Zelanda	18	17	16
5	Irlanda	18	17	18
6	Estados Unidos	20	19	18
7	Japón	20	19	19
8	Reino Unido	20	19	20
9	Francia	25	24	24
10	Alemania	25	24	24
11	noruega	25	23	24
12	Federación Rusa	30	28	27
13	Italia	36	34	34
14	Corea del Sur	50	48	46
15	Arabia Saudita	113	112	108
16	Emiratos Árabes Unidos	131	132	132
PAÍSES EN DESARROLLO				
17	Argentina	39	36	36
18	Brasil	41	38	36
19	South África	42	40	40
20	Filipinas	44	42	43
21	Tailandia	45	44	45
22	Indonesia	50	49	47

Continuación

23	Malasia	49	49	47
24	Sri Lanka	67	66	62
25	Afganistán	68	65	63
26	Turquía	70	66	65
27	Kenia	70	71	66
28	China	86	85	82
29	India	108	105	100
30	Zimbabue	101	104	105
31	Egipto	129	125	120
32	Bangladesh	118	127	121
33	Nigeria	153	145	150
34	Pakistán	207	184	171

FUENTE: Banco Mundial, 2013.

El aire limpio se considera un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Para proteger la salud pública, se han establecido normas de calidad del aire en muchos países y, como tales, han sido un componente importante de las políticas nacionales de gestión del riesgo y medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2014; OMS, 2006). Sin embargo, no hay evidencia que apoye un nivel seguro o umbral de exposición por debajo del cual no se produzcan efectos adversos para la salud o se perciban tales efectos. Como la exposición al PM es omnipresente e involuntaria, aumenta la importancia del Material Particulado como determinante de la salud humana. Deben establecerse directrices para la reglamentación para que el Material Particulado reduzca sus efectos perjudiciales potenciales en la salud pública y el medio ambiente y ofrecer orientación para proteger la salud pública en muchos otros contextos (Beatriz, 2005). En el Tabla 4 se enumeran las normas sobre partículas fijadas por diversos gobiernos de todo el mundo.

Tabla 4. Directrices de regulación del PM establecidas por varios gobiernos.

ORDEN	PAIS	PERIODO	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	PM _{2,5} (µg m ⁻³)
1	Estados Unidos	Promedio anual	-	12
		Promedio diario (24 horas)	150	35
2	Unión Europea	Promedio anual	40	25
		Promedio diario (24 horas)	50	-
3	China	Promedio anual	70	35
		Promedio diario (24 horas)	150	75
4	Hong Kong	Promedio anual	50	35
		Promedio diario (24 horas)	100	75
5	Japón	Promedio anual	-	15
		Promedio diario (24 horas)	100	35
6	Corea del Sur	Promedio anual	50	25
		Promedio diario (24 horas)	100	25
7	Australia	Promedio anual	-	8
		Promedio diario (24 horas)	50	25

FUENTE: Kim et al. 2015.

2.8 Estándar de Calidad Ambiental para Aire del PM₁₀ y PM_{2,5}.

Según la Ley General del Ambiente N° 28611, el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

Asimismo, el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias, establece los valores que no representen riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente para los contaminantes PM₁₀ y PM_{2,5} (Tabla 5); adicionalmente presentamos las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud(OMS) para el PM₁₀ y PM_{2,5} (Tabla 6) de acuerdo a:

Tabla 5. Estándares de Calidad Ambiental del Aire para PM₁₀ y PM_{2,5}.

PARÁMETRO	PERIODO	VALOR [µg/m ³]	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS ^[1]
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM ₁₀)	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2,5})	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	

NE: No Exceder. ^[1] o método equivalente aprobado.

FUENTE: Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM.

Tabla 6. Guías de Calidad del Aire de la OMS para PM₁₀ y PM_{2,5}.

PARÁMETRO	PERIODO	VALOR [µg/m ³]
PM ₁₀	media anual	20
	media de 24 horas	50
PM _{2,5}	media anual	10
	media de 24 horas	25

FUENTE: WHO, 2006.

2.9 Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta por contaminación del aire.

Según el Decreto Supremo N° 009-2003-SA, Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire y su modificatoria el Decreto Supremo N° 012-2005-SA, establecen los niveles de alerta para el contaminante PM₁₀. Este es un documento de gestión que tiene como fin la implementación de un conjunto de medidas

predeterminadas para la prevención de riesgos a la salud y la exposición aguda de la población a los contaminantes atmosféricos, los niveles de alerta para PM₁₀ son los siguientes:

Tabla 7. Niveles de Estados de Alerta Nacionales para PM₁₀.

TIPO DE ALERTA	MATERIAL PARTICULADO PM ₁₀	
CUIDADO	>250	Promedio de 24 horas
PELIGRO	>350	Promedio de 24 horas
EMERGENCIA	>420	Promedio de 24 horas

Todos los valores son concentraciones en microgramos por metro cúbico, NE significa no exceder.

FUENTE: Decreto Supremo N° 009-2003-SA; Decreto Supremo N° 012-2005-SA.

2.10 Índice de Calidad del Aire – INCA.

A partir de la promulgación de la Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM, se establece el Índice de Calidad del Aire – INCA, que tiene como fin dar a conocer a la población el estado actual de la calidad del aire, presentando la información de forma clara y amigable, a ello se suma la constitución del Sistema de Información de Calidad del Aire – INFO AIRE PERÚ, que forma parte del SINIA, con el objetivo de fomentar el interés por la preservación de un aire limpio, y sensibilizar a los tomadores de decisiones la implementación de las acciones pertinentes que conlleven a la mejora en sus respectivas ciudades.

El INCA se divide en 4 categorías o calificaciones de la calidad del aire. La banda de color verde comprende un rango de valores del INCA de 0 a 50 y significa que la calidad del aire es buena, la banda de color amarillo comprende un rango de valores de 51 a 100 e indica una calidad moderada del aire; la banda de color anaranjado se encuentra comprendida entre los valores 101 y el valor umbral del estado de cuidado (VUEC) de cada contaminante, lo que nos indica que la calidad del aire es mala; finalmente el color rojo de la cuarta banda nos indica que la calidad del aire es mayor al valor umbral del estado de cuidado del contaminante, a partir de este valor corresponde la aplicación de los Niveles de Estados de

Alerta Nacionales por parte de la autoridad de Salud, DIGESA. El Tabla 8 muestra los valores del INCA, con las 4 calificaciones y los colores utilizados para cada caso.

Tabla 8: Valores del índice de calidad del aire.

CALIFICACIÓN	VALORES DEL INCA	COLORES
Buena	0-50	Verde
Moderada	51-100	Amarillo
Mala	101-VUEC*	Anaranjado
VUEC*	>VUEC*	Rojo

*VUEC: Valor umbral del estado de cuidado

FUENTE: Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM.

De acuerdo a la calificación del INCA la población sensible (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) y población en general deberán tomar en cuenta los cuidados y recomendaciones que se muestran en el Tabla 9.

Tabla 9: Cuidados y recomendaciones del índice de calidad del aire.

CALIFICACIÓN	CUIDADOS	RECOMENDACIONES
Buena	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre.
Moderada	La población sensible podría experimentar algunos problemas de salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para la población sensible.

Continuación

Mala	La población sensible podría experimentar problemas de salud. La población en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
Umbral de cuidado	La concentración del contaminante puede causar efectos en la salud de cualquier persona y efectos serios en la población sensible.	Reportar a la Autoridad de Salud para que declare los Niveles de Estados de Alerta de acuerdo al Decreto Supremo N° 009-2003- SA y su modificatoria Decreto Supremo N° 012-2005-SA.

FUENTE: Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM.

2.11 Relación entre el $PM_{2,5}$ y el PM_{10}

La relación entre el $PM_{2,5}$ y el PM_{10} expresa la cantidad de material fino, casi todo de origen antrópico, y el total de partículas menores a diez micrómetros presentes en el aire ambiental. Esta relación permite estimar la concentración de un parámetro conociendo el otro. Si se conoce esta relación en una ciudad, se cuenta con parte de la información necesaria para tomar acciones más eficaces de control sobre las fuentes (Galvis et al, 2006; Pacsi, 2016).

La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ ha sido calculada por diversos estudios llevados a cabo en ciudades latinoamericanas y del mundo. Valores encontrados por varios autores para la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en diferentes ciudades y países del mundo se presentan en el Tabla 10. Una relación superior a 0.60 sería esperable bajo la influencia directa de fuentes de combustión, mientras que se esperaría una relación inferior a 0.30 bajo la influencia directa de polvo resuspendido o erosión (Querol et al. 2004).

Existen diferentes valores encontrados para la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ originada principalmente en las diferencias geológicas, climáticas, atmosféricas, y en las diversas fuentes de

contaminación, que aun dentro de una misma ciudad influyen cada sitio de monitoreo (Antonel y Chowdhury, 2014; Arciniegas y Rodríguez, 2005; OMS, 2006).

Tabla 10: Relaciones PM_{2,5}/PM₁₀ para Lima Metropolitana y otras ciudades.

País	Ciudad/zona	Estación	PM _{2,5} /PM ₁₀
Perú	Lima norte	Santa Luzmila	0.50
	Lima sur	María Auxiliadora	0.60
	Lima este	Hipólito Unanue	0.66
	Lima centro	Conaco	0.75
	Callao	Callao	0.72
Colombia	Bogotá		0.60
México	México DF		0.50-0.70
Chile	Santiago		0.40-0.60
Inglaterra	Birmingham		0.50-0.80
España	Barcelona		0.60
	País Vasco		0.74
Camerún	Bafoussam		0.65 ± 0.05
	Bamenda		0.75 ± 0.05
	Yaoundé		0.78 ± 0.09
Egipto	El Gran Cairo		0.51

FUENTE: Antonel y Chowdhury, 2014; Galvis et al, 2006; Pacsi, 2016; Safar y Labib, 2010; Viana, 2003.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó en la ciudad de Lima Metropolitana que abarca 50 distritos, que pertenecen a la Provincia de Lima con 43 distritos, sumada a la Provincia Constitucional del Callao con 7 distritos (Figura 4). Esta zona metropolitana se ubica geográficamente entre las Latitudes 11°45' y 12°24' Sur y las Longitudes 76°40' y 77°10' Oeste y para estudios atmosféricos se han zonificado tres cuencas atmosféricas, denominadas como la Cuenca del Río Chillón, Cuenca del Río Rímac y la cuenca del Río Lurín (DIGESA, 2012).

Actualmente el estado de la calidad del aire en Lima Metropolitana, es monitoreado a través de dos instituciones. La primera, la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA), perteneciente al Ministerio de Salud, que se encarga de la vigilancia de la calidad del aire en Lima Metropolitana a través de siete estaciones de monitoreo, donde se utiliza generalmente equipos manuales y semiautomáticos. Las características de estas estaciones se muestran en el Tabla 11. La instalación de todas las estaciones se ha realizado en los techos del primer piso de los Centros de salud y hospitales de la red asistencial del Ministerio de Salud (DIGESA, 2017).

La segunda institución es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), adscrita al Ministerio del Ambiente del Perú, que realiza la vigilancia de la meteorología y la calidad del aire en Lima Metropolitana a través de diez estaciones de monitoreo (Tabla 11). Las estaciones de la red operada por el SENAMHI se han instalado en edificios públicos, municipalidades y parques; y en todas las estaciones se utilizan equipos de monitoreo automáticos para gases y partículas (Sánchez-Ccoyllo et al., 2015).

Tabla 11. Características generales de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire y meteorológicas de Lima Metropolitana.

Zona de Lima	N°	Estación	Distrito	Operador	Norte	Este
Norte	1	Centro de Salud Santa Luzmila	Comas	DI	8679051	275253
	2	Puente Piedra ^[4]	Puente Piedra	SE	8687269	273704
	3	Carabayllo ^[1]	Carabayllo	SE	8683451	278498
	4	San Martín de Porres	San Martín de Porres	SE	8671536	272998
	5	Hospital Hipólito Unanue	El Agustino	DI	8668211	283190
Este	6	Ate ^[5]	Ate	SE	8669823	291097
	7	Santa Anita ^[5]	Santa Anita	SE	8667937	285325
	8	San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	SE	8674718	282272
	9	Huachipa	Huachipa	SE	8670779	287796
Sur	10	Hospital María Auxiliadora	San Juan de Miraflores	DI	8654774	286834
	11	Villa María del Triunfo	Villa María del Triunfo	SE	8654306	291077
	12	Almacén MINSA	Surco	DI	8656560	282579
	13	Congreso de la República	Cercado de Lima	DI	8667308	279377
Centro	14	Jesús María ^[2]	Jesús María	SE	8664893	277601
	15	San Borja ^[3]	San Borja	SE	8661900	283200
Callao	16	Centro de Salud Lince	Lince	DI	8663569	278837
	17	DIRESA Callao	Callao	DI	8665490	268606

DI: DIGESA SE: SENAMHI ^{[1][2][3]} Con Estación Meteorológica Automática(EMA) propia ^[4] Se correlacionó con la EMA Antonio Raimondi-Ancón ^[5] Se correlacionó con la EMA Alexander Von Humboldt-La Molina.

FUENTE: Elaboración propia.

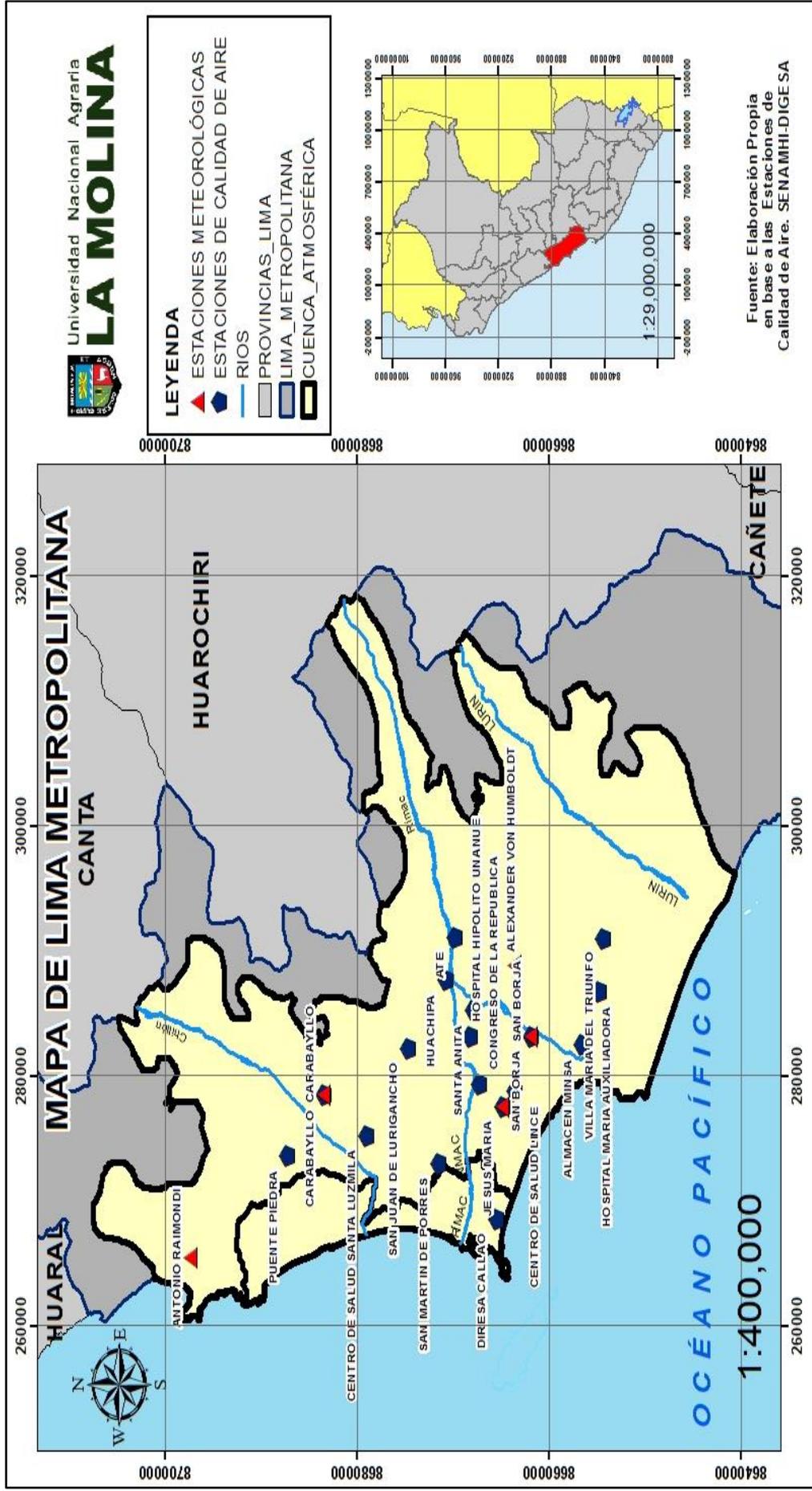


Figura 4. Área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas y de calidad de aire de Lima Metropolitana.

FUENTE: Elaboración propia.

3.2 Materiales

- Datos de concentraciones de PM₁₀, PM_{2,5} y variables meteorológicas proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú, periodo 2015-2017.
- Datos de concentraciones de PM₁₀, PM_{2,5} y variables meteorológicas proporcionados por la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA), periodo 2015-2016.
- Informes de monitoreo de variables meteorológicas en Lima Metropolitana proporcionadas por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), periodo 2015-2017.
- Laptop Core i5 con software ArcGis 10.1, Minitab 17 y WRPLOT View 8.0.0.

3.3 Metodología

3.3.1 Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM₁₀ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.

Se procesó los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú y de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria de la Red de monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana, en relación al PM₁₀ según estación de calidad de aire de procedencia.

Se obtuvieron los parámetros estadísticos descriptivos de los datos de concentración del PM₁₀, a través del programa estadístico MINITAB TM versión 17.0. Se calculó los promedios horario, diario, mensual, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual de los datos de concentración del PM₁₀ y se generó series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias. Todos los resultados se compararon con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del aire del Perú y las guías de calidad del aire de la OMS.

Para representar la distribución espacial del material particulado PM₁₀ se realizó mediante el Software ArcGis 10.1, el cual es un programa que permite representar gráficamente las concentraciones de los contaminantes sobre un espacio geográfico. En la Figura 5 se presenta la interfaz del ArcCatalog, la cual permite organizar y administrar varios tipos de información geográfica para ArcGIS for Desktop (ESRI, 2016).

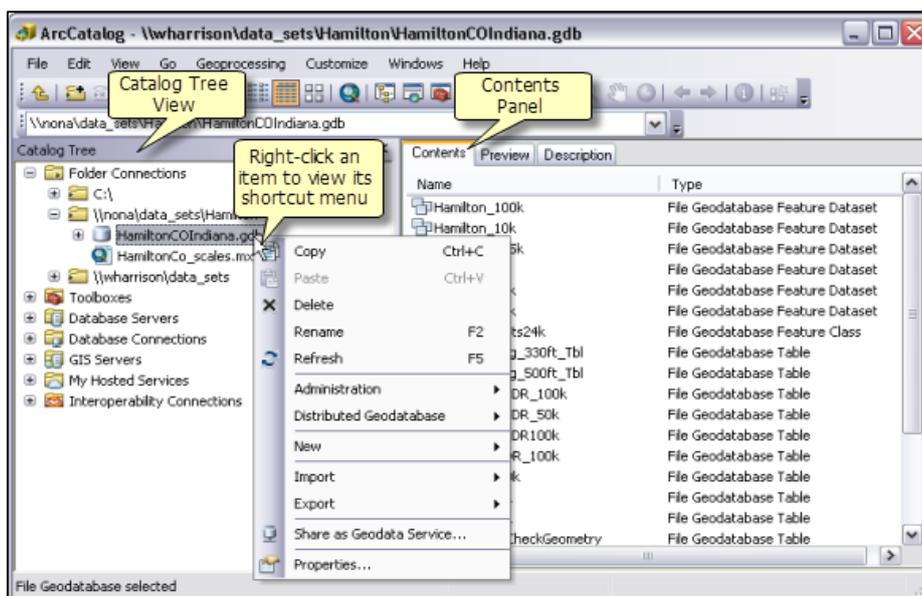


Figura 5. Interfaz del ArcCatalog.

FUENTE: Environmental Systems Research Institute, 2016.

Se procedió a la localización de las distintas estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Lima Metropolitana, mediante la digitalización de puntos a través de ArcGis 10.1, creando un shape en ArcCatalog. Este shape se importó en ArcGis y mediante la herramienta Editor, se procedió a anexar a estos puntos una tabla de atributos con los datos diarios promedios, máximos y mínimos y los picos horarios de contaminación.

Para la distribución espacial de la contaminación, se utilizó el método de interpolación Kriging ordinario, el cual es una extensión del método Kriging que ha sido utilizado anteriormente (Moral et al, 2003; Opazo, 2011), y que se sustenta en la distancia entre puntos, lo que significa que los lugares que disten menos entre sí, tendrán valores más

semejantes de sus atributos que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más alejados.

La herramienta Kriging se encuentra contenida en el Software ArcGis 10.1, en la barra de herramienta 3D Analyst, donde se procedió a elegir la opción “Interpolate to raster”.

Con ello se identificó las zonas con mayor contaminación por PM₁₀ y se evaluó su distribución espacial a lo largo de Lima Metropolitana. Así mismo se elaboró un mapa temático a partir del cálculo modificado del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el PM₁₀, el cual nos dio un mejor entendimiento del estado de la calidad de aire en Lima Metropolitana. La determinación matemática del INCA el cual se calculó para el PM₁₀ se basa en una relación entre el valor registrado de la concentración del contaminante y su correspondiente valor del estándar de calidad ambiental. Ver Tabla 12:

Tabla 12. Cálculo del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el PM₁₀.

Material particulado (PM ₁₀) promedio anual		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (ug/m ³)	Ecuación
0-50	0-25	I (PM ₁₀)= [PM ₁₀] * 100/50
51-100	26-50	
101-250	51-125	
>250	>125	

FUENTE: Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM.

3.3.2 Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{2,5} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.

Se procesó los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú y de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria de la Red de monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana, en relación al PM_{2,5} según estación de calidad de aire de procedencia.

Se obtuvo los parámetros estadísticos descriptivos de los datos de concentración del PM_{2,5}, a través del programa estadístico MINITAB TM versión 17.0. Se calculó los promedios horario, diario, mensual, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual de los datos de concentración del PM_{2,5} y se generó series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias. Todos los resultados se compararon con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del aire del Perú y las guías de calidad del aire de la OMS.

Para representar la distribución espacial del material particulado PM_{2,5} se realizó mediante el Software ArcGis 10.1, el cual es un programa que permite representar gráficamente las concentraciones de los contaminantes sobre un espacio geográfico. En la Figura 6 se presenta la interfaz del ArcMap el cual permite representar la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa. Los elementos de mapa comunes son el marco de datos, que contiene las capas de mapa para una extensión determinada, más la barra de escala, la flecha de norte, el título, texto descriptivo, una leyenda de símbolos, etc (ESRI, 2016).

Se procedió a la localización de las distintas estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Lima Metropolitana, mediante la digitalización de puntos a través de ArcGIS 10.1, creando un shape en ArcCatalog. Este shape se importó en ArcGIS y mediante la herramienta Editor, se procedió a anexar a estos puntos una tabla de atributos con los datos diarios promedios, máximos y mínimos y los picos horarios de contaminación.

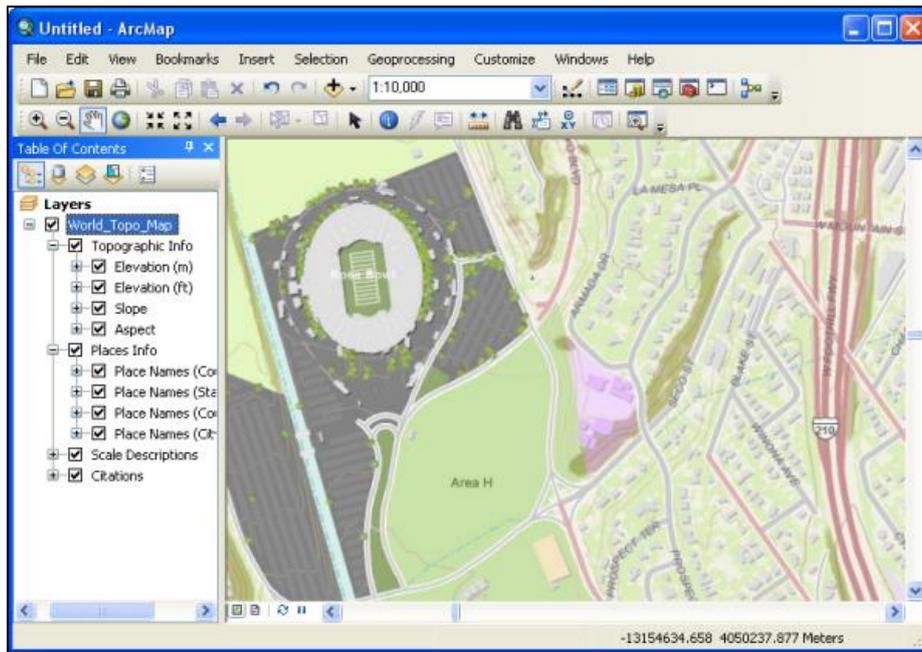


Figura 6. Interfaz del ArcMap.

FUENTE: Environmental Systems Research Institute, 2016.

Para la distribución espacial de la contaminación, se utilizó el método de interpolación Kriging ordinario, el cual es una extensión del método Kriging que ha sido utilizado anteriormente (Moral et al, 2003; Opazo, 2011), y que se sustenta en la distancia entre puntos, lo que significa que los lugares que disten menos entre sí, tendrán valores más semejantes de sus atributos que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más alejados. La herramienta Kriging se encuentra contenida en el Software ArcGIS 10.1, en la barra de herramienta 3D Analyst, donde se procedió a elegir la opción “Interpolate to raster”.

Con ello se identificó las zonas con mayor contaminación por $PM_{2.5}$ y se evaluó su distribución espacial a lo largo de Lima Metropolitana. Así mismo se elaboró un mapa temático a partir del cálculo modificado del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el $PM_{2.5}$, el cual nos dio un mejor entendimiento del estado de la calidad de aire en Lima Metropolitana. La determinación matemática del INCA el cual se calculó para el $PM_{2.5}$ se basa en una relación entre el valor registrado de la concentración del contaminante y su correspondiente valor del estándar de calidad ambiental. Ver Tabla 13:

Tabla 13. Cálculo del Índice de Calidad de Aire (INCA) para el PM_{2.5}.

Material particulado (PM _{2.5}) promedio anual		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (ug/m ³)	Ecuación
0-50	0-12.5	$I(\text{PM}_{2.5}) = \frac{[\text{PM}_{2.5}]}{100/25} *$
51-100	12.5-25	
101-250	25-62.5	
>250	>62.5	

FUENTE: Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM.

3.3.3 Cálculo y análisis de la relación de las concentraciones del material particulado (PM_{2.5}/PM₁₀) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad de Lima Metropolitana.

A partir de las concentraciones del PM_{2.5} y PM₁₀, se procedió a aplicar una división simple, de ambos contaminantes y por estación de monitoreo de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana, mediante el programa estadístico Minitab. Se procedió a comparar con otros índices calculados a nivel de Latinoamérica y el Mundo.

Se incluyó sólo los datos disponibles para las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ a la misma hora. Las proporciones promedio de PM_{2.5} a PM₁₀ entre diversas escalas temporales en cada sitio se resumió paso a paso. En cada sitio, los promedios diarios de las relaciones PM_{2.5}/PM₁₀ se resumió a partir de las relaciones horarias. Como resultado, las relaciones promedio diarias se utilizaron para calcular promedios mensuales. Posteriormente, se utilizaron para calcular las relaciones anuales y estacionales en cada sitio. La división de temporada en este objetivo fue la siguiente: verano (diciembre, enero, febrero), otoño (marzo, abril, mayo), invierno (junio, julio, agosto) y primavera (septiembre, octubre y noviembre).

Con el fin de comparar la variabilidad de razones PM_{2.5}/PM₁₀ con las concentraciones de PM, las concentraciones promedio de PM_{2.5} y PM₁₀ a diversas escalas temporales se resumen también. La variabilidad espacio-temporal de las proporciones PM_{2.5}/PM₁₀ en Lima Metropolitana se analizaron como el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 7. Dado

que el nivel de contaminación en la zona noreste y suroeste es aparentemente diferente (DIGESA, 2011) las razones $PM_{2,5}/PM_{10}$ en estas zonas también se compararán.

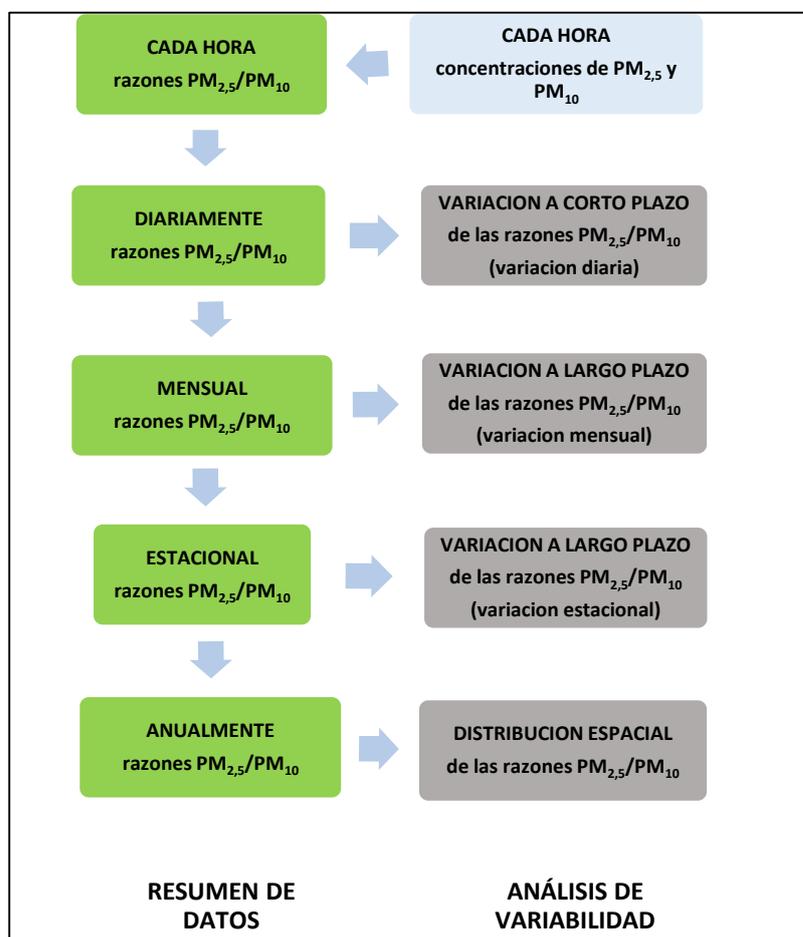


Figura 7. Flujograma de resumen de datos y análisis de la variabilidad espacio-temporal de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$.

FUENTE: adaptado de Xu et al., 2017.

3.3.4 Evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.

Para conocer la distribución de las temperaturas se procedió a la recopilación, tabulación y al análisis de los datos de temperaturas atmosféricas proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú y la Dirección General de Salud Ambiental e

Inocuidad Alimentaria a través de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana.

Se obtuvo los parámetros estadísticos descriptivos de los datos de temperatura del aire y velocidad del viento, a través del programa estadístico MINITAB TM versión 17.0. Se calculó los promedios horario, diario, mensual, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual de los datos de temperatura del aire y velocidad del viento y se generó series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias.

Se relacionó las variables meteorológicas temperatura del aire y velocidad del viento con las concentraciones del material particulado, a nivel horario y mensual. Se superpusieron los resultados obtenidos con las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Se procedió a correlacionarlos mediante el coeficiente de determinación.

Para establecer el grado de correlación entre las temperaturas atmosféricas, velocidad del viento y el material particulado, se procedió a la utilización del coeficiente de determinación, el cual reporta valores que fluctúan entre 0 y 1. Los valores cercanos a cero indicaron que no existe relación entre los elementos analizados, mientras que los valores cercanos a uno dan cuenta de una relación alta entre las variables estudiadas (Baccini et al., 2007; Opazo, 2011).

Se procedió a la digitalización de los datos de temperaturas de las diferentes estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana a través del ArcGIS 10.1, creando un shape de puntos mediante ArcCatalog. Este shape se importó en ArcGIS y mediante la herramienta Editor, se procedió a anexarlos a una tabla de atributos con los datos diarios promedios, máximos y mínimos y los datos horarios.

Para lograr una adecuada representación espacial de la distribución de la temperatura atmosférica se utilizó el método de interpolación Kriging (ordinario), a través del mismo proceso llevado a cabo para los datos de contaminación. En “Deutsch and Journal” (1992),

se ha descrito al kriging ordinario como el algoritmo geoestadístico más completo (Goovaerts, 1997; Moral, 2003; Opazo, 2011). Así mismo, Villatoro et al (2008), mencionaron como argumento a favor del uso del método ordinario la tendencia del Kriging a la anisotropía, la cual establece que una variable tiene dependencia espacial hacia una o varias direcciones, pudiendo establecer áreas menos heterogéneas, en contraste con los resultados que pueden ser obtenidos mediante el método de interpolación de Inverso a la distancia o IDW, el cual tiende a reproducir patrones poco reales conocidos como tipo “ojo de buey” alrededor de los puntos muestreados. La herramienta Kriging se encuentra contenida en el Software ArcGIS 10.1, en la barra de herramienta 3D Analyst, donde se procedió a elegir la opción “Interpolate to raster” seleccionando Kriging.

Se identificó y clasificó las posibles relaciones espaciales existentes entre los valores de temperatura del aire observados y las concentraciones de los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$, en su distribución sobre Lima Metropolitana, para ello se procedió a la superposición de ambas cartografías. Asimismo, para la representación de los vientos se elaboró las rosas de viento correspondiente para cada estación meteorológica automática mediante el software WRPLOT View. Y mediante el software ArcGIS 10.1 se exportó las rosas de viento sobre Lima Metropolitana.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM₁₀ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017

Para el estudio se utilizó una base de datos de promedios horarios de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀) medidos en la red de calidad del aire del SENAMHI del Perú, para el periodo 2015-2017.

Tabla 14. Estadísticas descriptivas de las concentraciones del material particulado PM₁₀ en las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI.

Zona	Estación de monitoreo	PM ₁₀ (ug/m ³)				ECA Anual (ug/m ³)
		Media	Desviación Estándar	Min	Max	
Norte	Puente Piedra	115.6	51.6	2.3	557.2	50
	Carabaylo	80.9	35.5	7.4	607.3	
	San Martín de Porres	45.8	24.7	4.6	405.8	
Este	San Juan de Lurigancho	87.4	38.7	4.0	564.4	
	Huachipa	95.1	46.8	4.3	621.0	
	Santa Anita	73.8	34.4	6.1	529.2	
Sur	Ate	106.8	51.1	6.1	661.3	
	Villa María del Triunfo	127.1	84.4	3.5	974.0	
Centro	Campo de Marte	38.1	18.4	4.0	259.0	
	San Borja	52.7	27.5	4.3	405.2	

Las estadísticas descriptivas de las concentraciones del PM₁₀ se presentan en el Tabla 14. Se observa respecto a las medias que, en la Zona Norte, el mayor valor lo obtiene la estación

Puente Piedra y el menor valor la estación San Martín de Porres. En la Zona Este, el mayor valor la estación Ate y el menor valor la estación Santa Anita. En la Zona Sur, la estación Villa María del Triunfo obtiene un valor de 127.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras en la Zona Centro, el mayor valor lo obtiene la estación San Borja y el menor la estación Campo de Marte.

4.1.1 Variación horaria y espacial del PM₁₀ en Lima Metropolitana

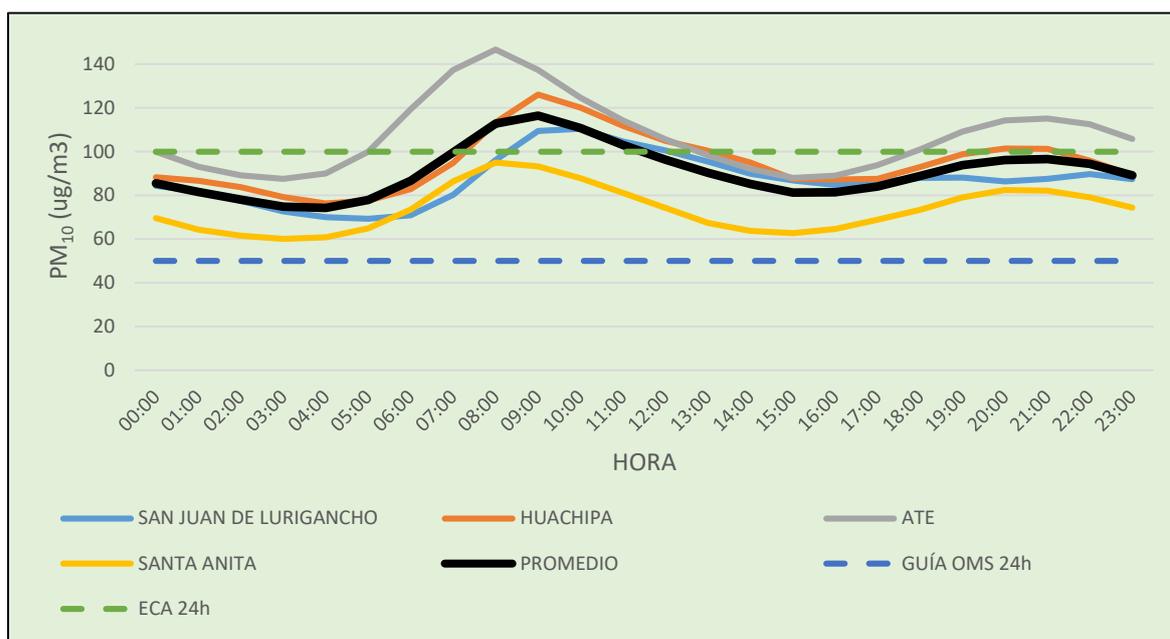


Figura 8. Variación horaria multianual del PM₁₀ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 8 la variación horaria multianual del PM₁₀ para las estaciones de la Zona Este de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 08:00 a.m. (112.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el segundo a las 09:00 p.m. (96.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am (74.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 03:00 pm (81.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mayores valores de concentración de PM₁₀ se registraron en la estación de Ate observándose un pico máximo de 146.6 µg/m³ y los mínimos valores se registran en la estación Santa Anita, el cual tiene un pico máximo de 95.0 µg/m³. Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (50 µg/m³), se observa que todas las horas y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente la norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM₁₀ (100 µg/m³) se evidencia que en promedio desde las 00:00 hasta las 07:00 y desde las 12:00 hasta las 23:00 no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

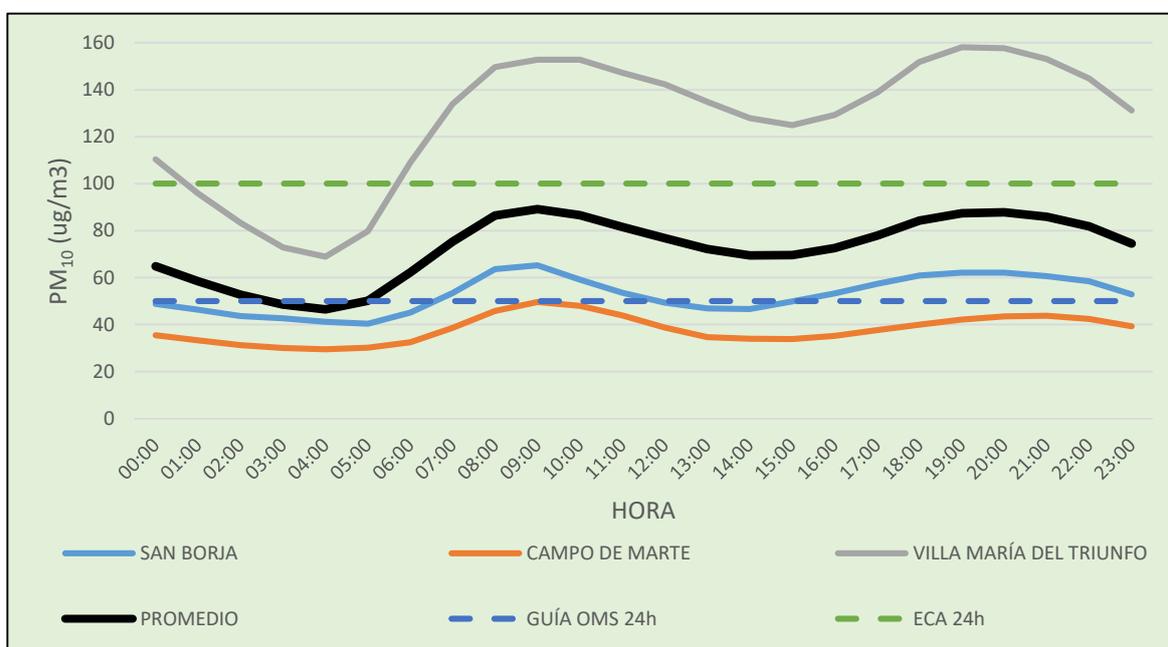


Figura 9. Variación horaria multianual del PM₁₀ en la Zona Centro y Sur. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 9 la variación horaria multianual del PM₁₀ para las estaciones de las Zonas Centro y Sur de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 09:00 a.m. (89.2 µg/m³) y el segundo a las 08:00 p.m. (87.8 µg/m³), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am (46.5 µg/m³) y 02:00 pm (69.5 µg/m³) respectivamente y tienen

probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mayores valores de concentración de PM_{10} se registraron en la estación de Villa María del Triunfo observándose un pico máximo de $158.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los mínimos valores se registran en la estación Campo de Marte, el cual tiene un pico máximo de $49.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que en promedio casi la totalidad de las horas y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente la norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM_{10} ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se evidencia que en promedio no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Se observa en la Figura 10 la variación horaria multianual del PM_{10} para las estaciones de la Zona Norte de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 10:00 a.m. ($96.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el segundo a las 08:00 p.m. ($89.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am ($56.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 04:00 pm ($83.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mayores valores de concentración de PM_{10} se registraron en la estación Puente Piedra observándose un pico máximo de $139.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los mínimos valores se registran en la estación San Martín de Porres, el cual tiene un pico máximo de $49.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que en promedio todas las horas sobrepasan significativamente la norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM_{10} ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se evidencia que en promedio no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

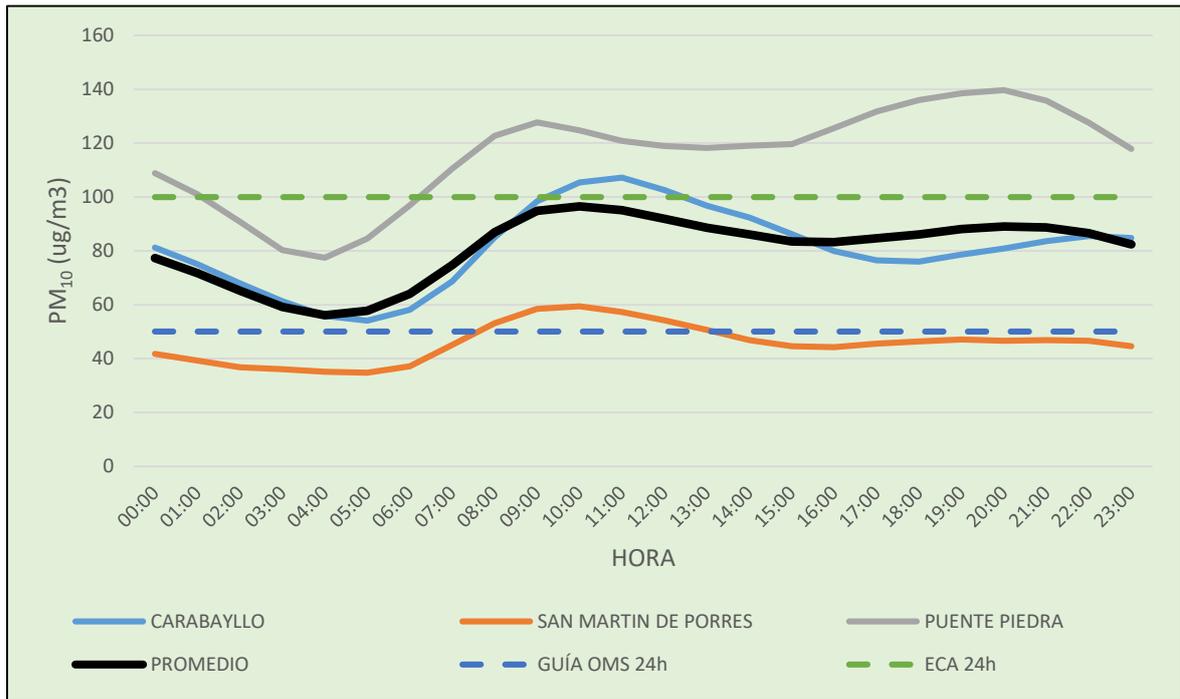


Figura 10. Variación horaria multianual del PM₁₀ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 11 la variación espacial multianual del PM₁₀ para las estaciones de Lima Metropolitana operadas por el SENAMHI para el periodo 2015-2017. Los mayores niveles de concentraciones de material particulado grueso se encuentran en la Zona Sur de Lima Metropolitana y los menores niveles se encuentran en la Zona Centro, esta variación se explica por emisiones tanto del parque automotor e industrial, junto con las características urbanísticas propias de cada zona, como la falta de una pavimentación en las calles de la Zona Sur comparado con las vías en buen estado y mayores áreas verdes en la Zona Centro.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (50 ug/m³), se observa que en promedio todas las horas sobrepasan significativamente la norma en mención, salvo las estaciones en la Zona Centro, que están por debajo y solo lo supera en las horas de mayor tráfico vehicular. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM₁₀ (100 µg/m³) se evidencia que en promedio las Zonas Centro y Norte no sobrepasan la norma en mención, pero las estaciones en las Zonas Sur y Este si lo superan

principalmente en las horas picos. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

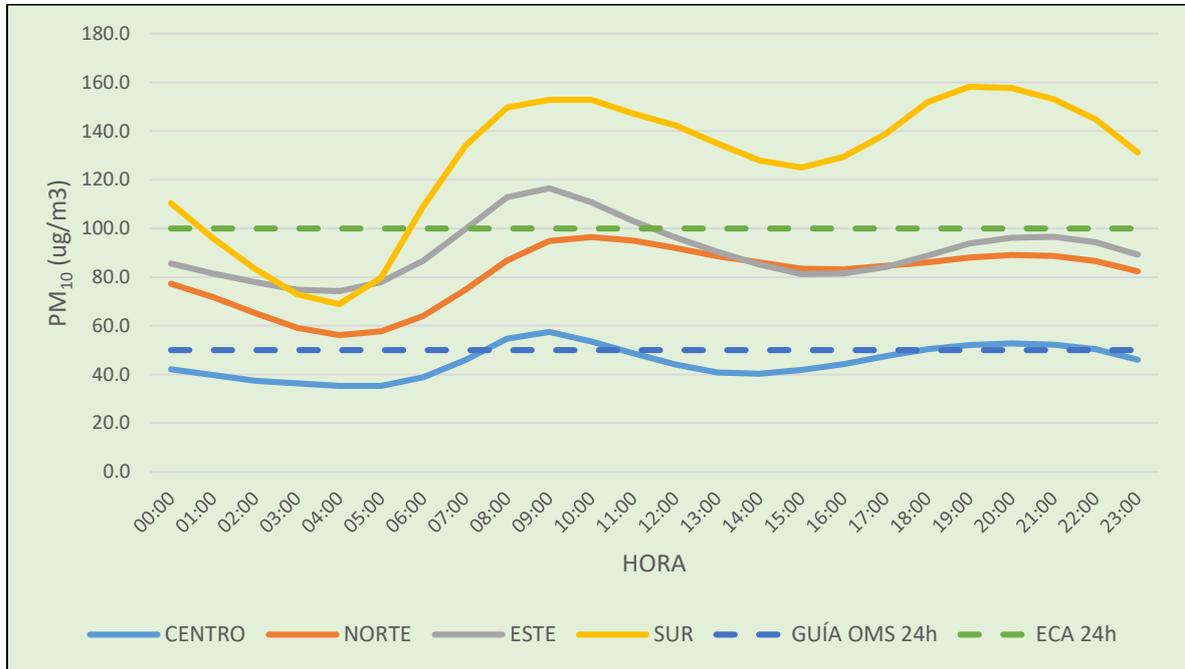


Figura 11. Variación espacial multianual del PM₁₀ en Lima Metropolitana. Periodo 2015-2017.

4.1.2 Variación diaria del PM₁₀ en Lima Metropolitana

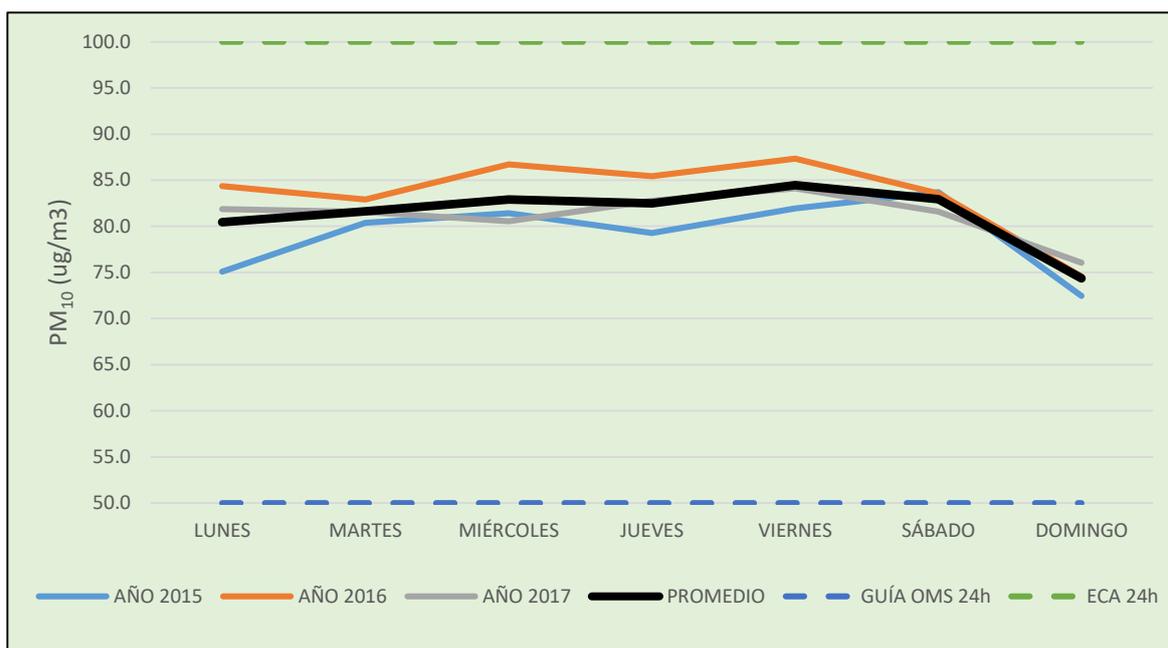


Figura 12. Variación diaria y semanal promedio del PM₁₀ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 12 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Norte de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de PM₁₀ del año 2016 son mayores que del promedio.

Se observa que los mayores valores de concentración de PM₁₀ en promedio se dan los días viernes y sábado. Además, los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Norte que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y flujo el transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

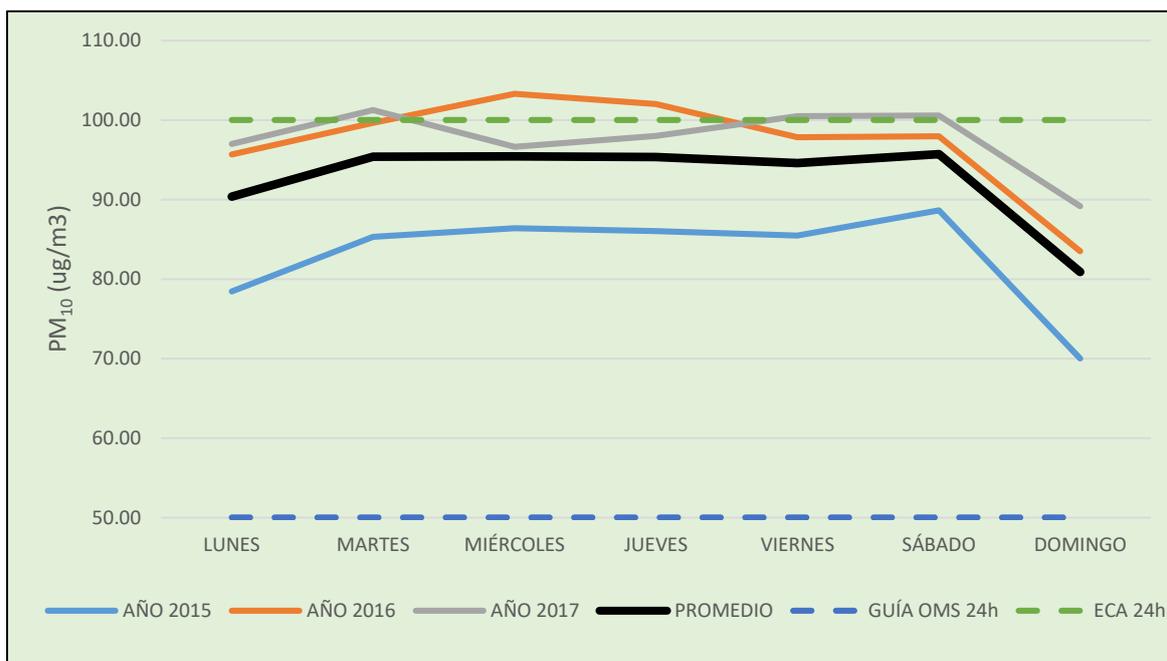


Figura 13. Variación diaria y semanal del PM_{10} en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 13 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Este de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de PM_{10} de los años 2016 y 2017 son mayores que del promedio.

Se observa que los mayores valores de concentración de PM_{10} en promedio se dan los días miércoles y sábado. Además, los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Este que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y flujo el transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

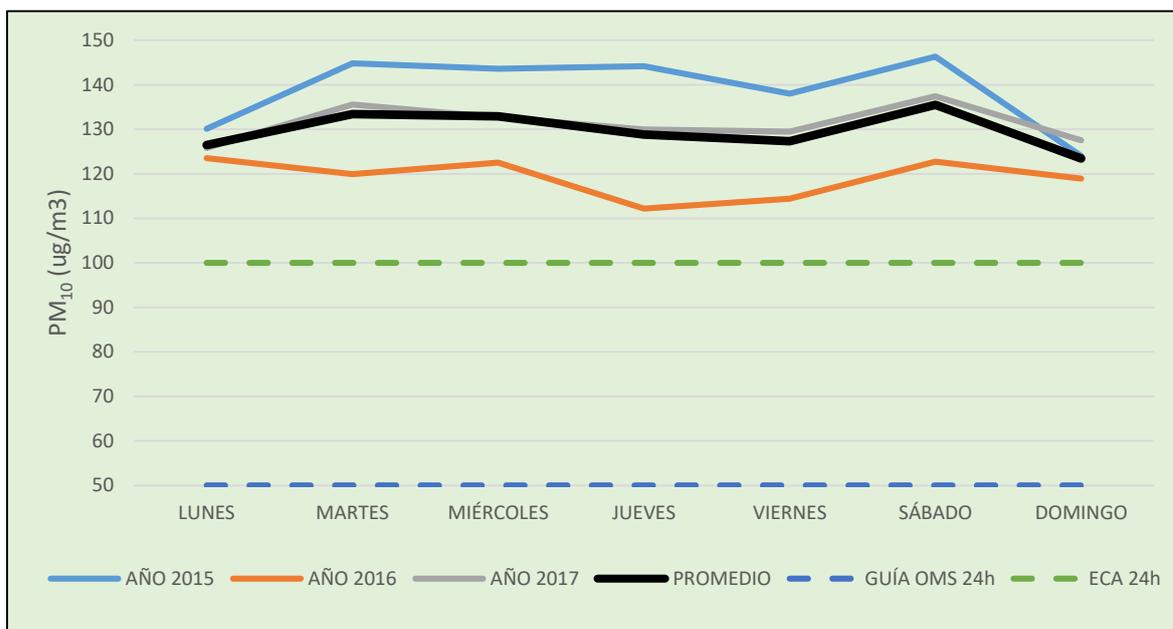


Figura 14. Variación diaria y semanal del PM_{10} en la Zona Sur. Periodo 2015-2017.

En la Figura 14 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Sur de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de PM_{10} de los años 2015 y 2017 son mayores que del promedio.

Se observa que los mayores valores de concentración de PM_{10} en promedio se dan los días martes y sábado. Además, los valores del año 2016 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Sur que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y flujo el transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

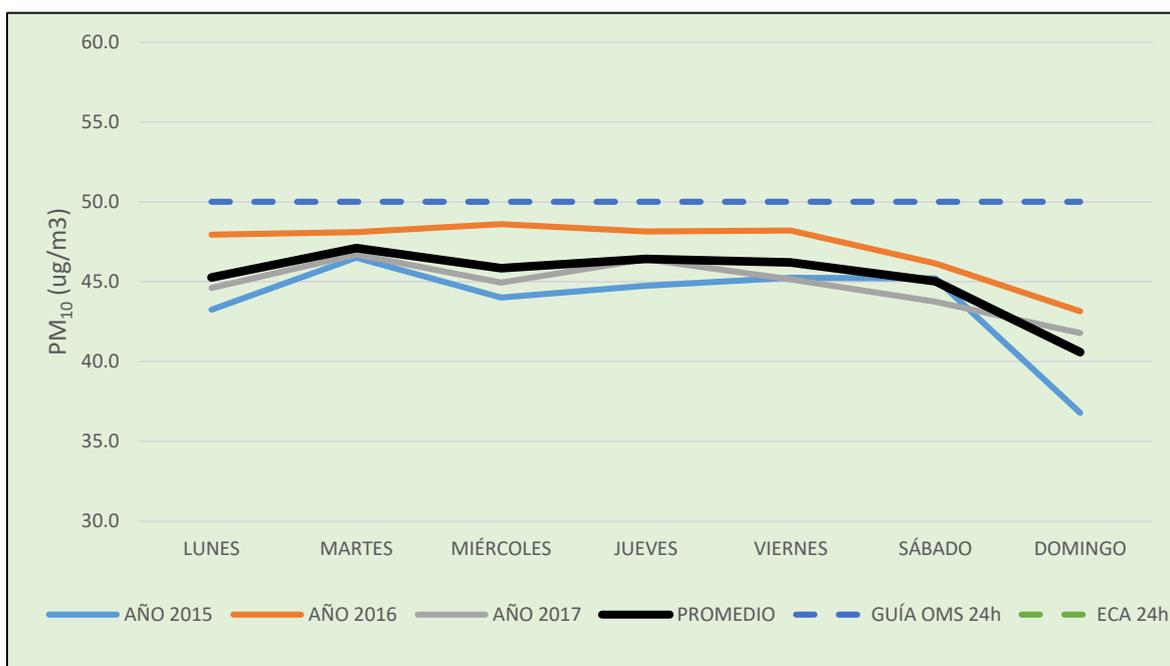


Figura 15. Variación diaria y semanal del PM₁₀ en la Zona Centro. Periodo 2015-2017.

En la Figura 15 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Centro de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de PM₁₀ del año 2016 son mayores que del promedio.

Se observa que los mayores valores de concentración de PM₁₀ en promedio se dan los días martes y jueves. Además, los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Centro que ha ido incrementándose respecto este año de estudio; sin embargo, hay una ligera disminución para el año 2017, respecto el promedio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y flujo el transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

4.1.3 Variación mensual del PM₁₀ en Lima Metropolitana

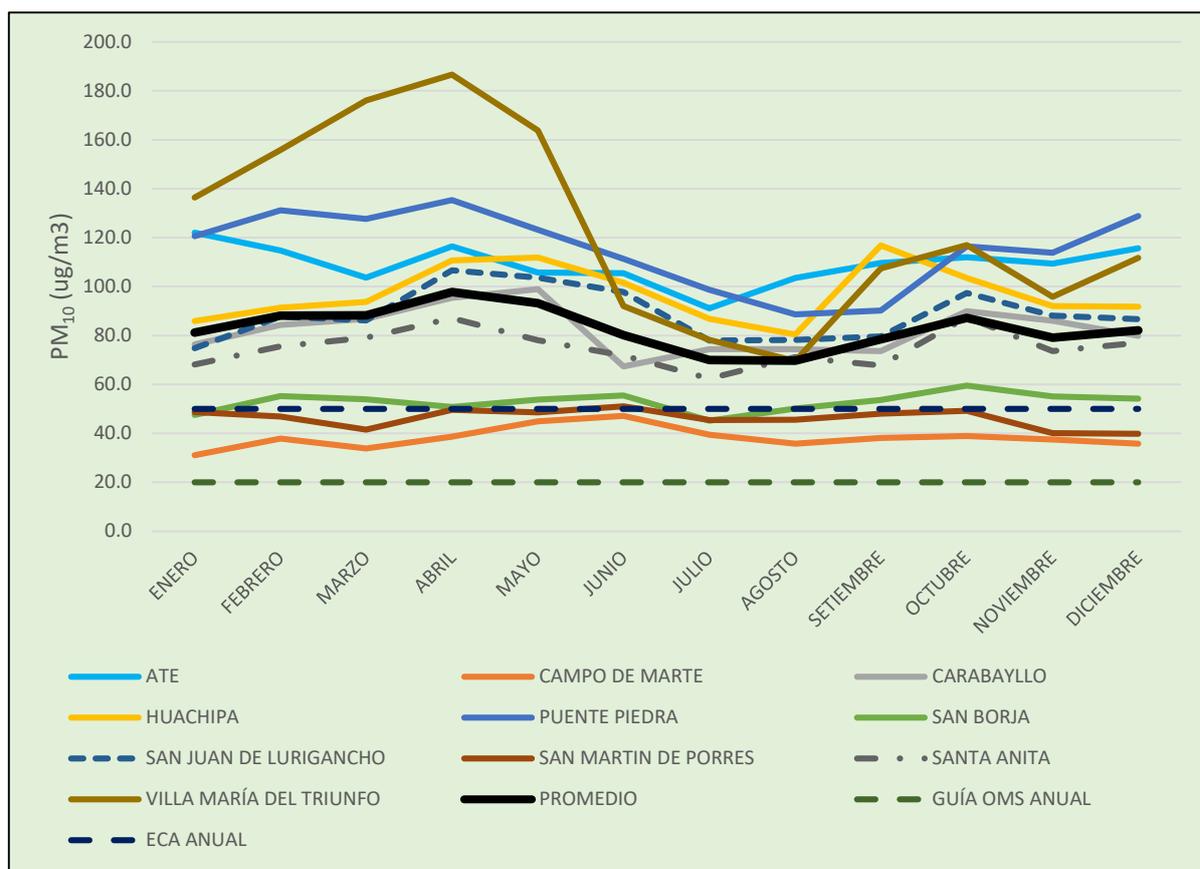


Figura 16. Variación mensual multianual del PM₁₀ para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017.

En la Figura 16 se muestra la variación mensual multianual del PM₁₀ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo 2015-2017). Las evaluaciones se han realizado en base a datos promedios mensuales generados a partir de la información proporcionada por el SENAMHI.

Se observa que las estaciones Villa María del Triunfo (Zona Sur de Lima Metropolitana), Puente Piedra (Zona Norte de Lima Metropolitana) y Ate (Zona Este de Lima Metropolitana) presentan los mayores valores de concentración de PM₁₀ durante los meses de verano, con valores que oscilan entre 103.6 - 176 µg/m³. Estos resultados se asocian a la cercanía de vías de alto tránsito vehicular, las calles sin pavimentar y las condiciones meteorológicas de la zona (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mínimos valores se registran durante los meses del verano austral en las estaciones Campo de Marte (distrito de Jesús María, Zona Centro de Lima Metropolitana) y San Martín de Porres (Zona Norte de Lima Metropolitana), con valores que oscilan entre los 31.1 - 48.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En general en estas dos estaciones se registran los mínimos valores durante todo el año, que podrían estar asociados a las características urbanísticas y meteorológicas del lugar (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Se observa un rango de concentración de PM_{10} en promedio de 85.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre la estación Villa María del Triunfo y Campo de Marte durante todo el año, evidenciando esto que las características geomorfológicas, urbanísticas y meteorológicas asociados a las fuentes de emisiones de material particulado de cada zona, determinan la variación temporal de la concentración de PM_{10} . Las estaciones de Villa María del Triunfo, Ate y Puente Piedra superan los estándares de calidad ambiental del aire del Perú (ECA) para promedios de 24 horas que equivale a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual ocurre en los meses del verano austral principalmente.

4.1.4 Variación estacional y espacial del PM_{10} para distritos representativos de Lima Metropolitana

En la Figura 17 se muestra la variación estacional del PM_{10} para la estación de calidad del aire Puente Piedra. Se observa que las concentraciones de PM_{10} son mayores en los meses de verano y otoño, disminuyendo sus valores hasta los meses de invierno donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y las condiciones de terrenos y calles sin pavimentarse o con poca cobertura vegetal, factores que favorecen la dispersión de polvo grueso de los suelos y su incorporación al aire ambiental (Pacsi, 2016).

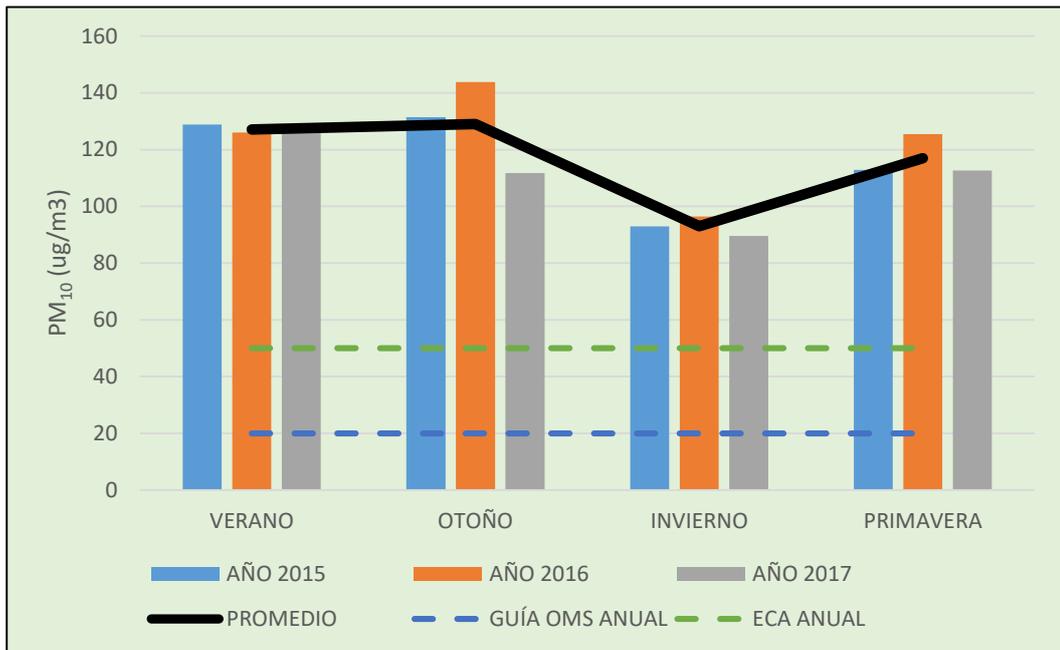


Figura 17. Variación estacional del PM₁₀ para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores calculados con lo que establece el ECA Anual para PM₁₀ (50 µg/m³) y la Guía de la OMS Anual (20 µg/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente las normas en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 18 se muestra la variación estacional del PM₁₀ para la estación de calidad del aire Ate. Se observa que las concentraciones de PM₁₀ son mayores en los meses de verano y otoño, disminuyendo sus valores hasta los meses de invierno donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y las condiciones de terrenos y calles sin pavimentar o con poca cobertura vegetal, factores que favorecen la dispersión de polvo grueso de los suelos y su incorporación al aire ambiental (Pacsi, 2016).

Comparando los valores calculados con lo que establece el ECA Anual para PM₁₀ (50 µg/m³) y la Guía de la OMS Anual (20 µg/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el

promedio sobrepasan significativamente las normas en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

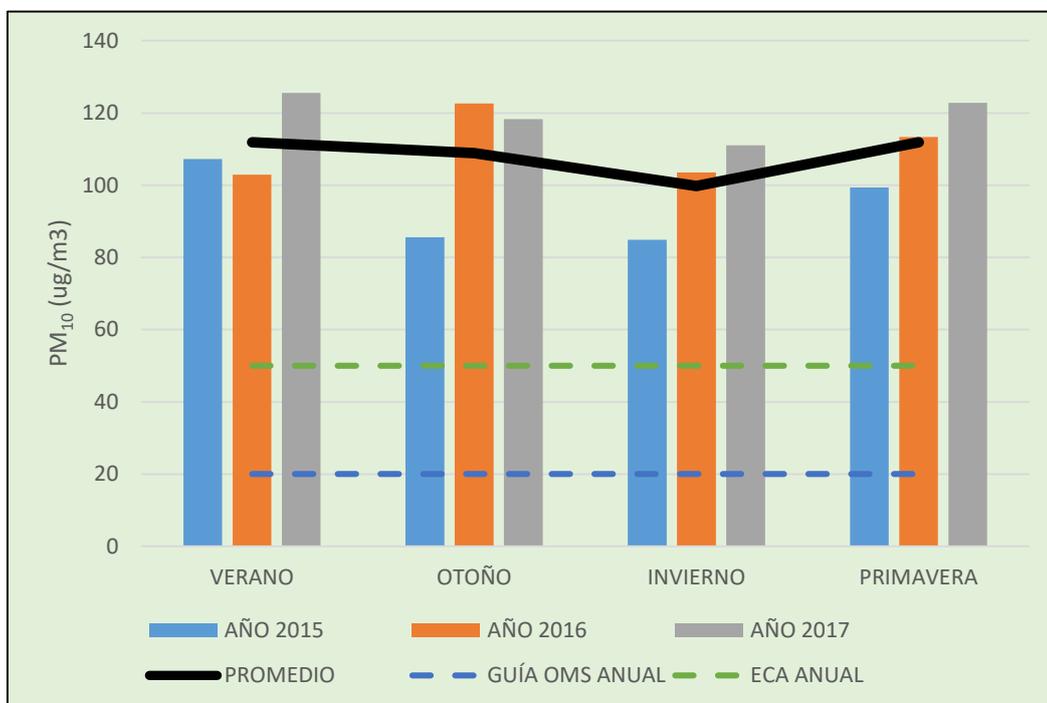


Figura 18. Variación estacional del PM₁₀ para la estación Ate. Periodo 2015-2017.

En la Figura 19 se muestra la variación estacional del PM₁₀ para la estación de calidad del aire Villa María del Triunfo. Se observa que las concentraciones de PM₁₀ son mayores en los meses de verano y otoño, disminuyendo sus valores hasta los meses de invierno donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y las condiciones de terrenos y calles sin pavimentar o con poca cobertura vegetal, factores que favorecen la dispersión de polvo grueso de los suelos y su incorporación al aire ambiental (Pacsi, 2016).

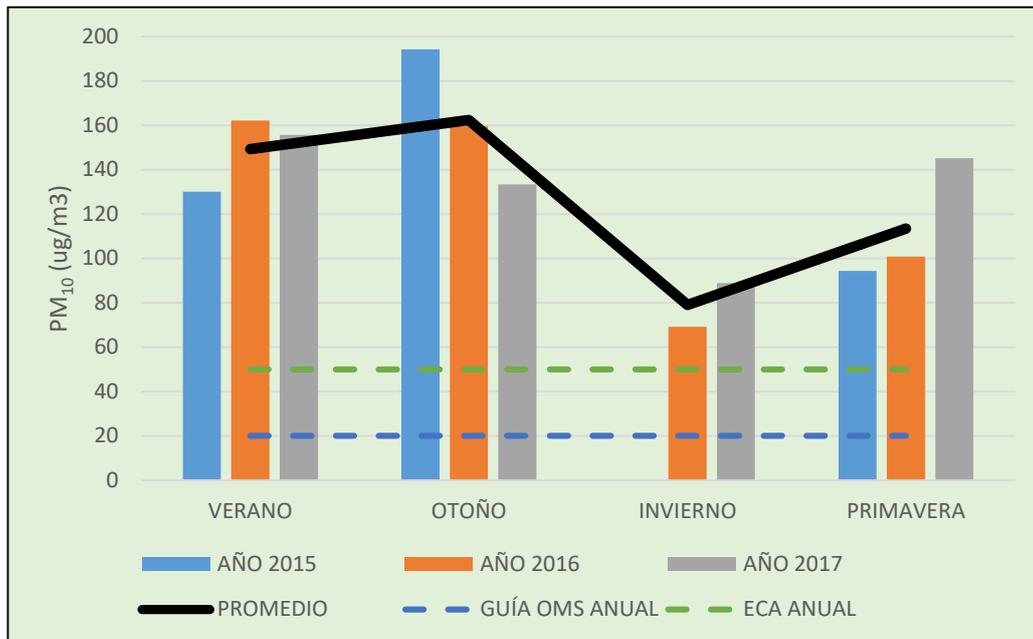


Figura 19. Variación estacional del PM₁₀ para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores calculados con lo que establece el ECA Anual para PM₁₀ (50 µg/m³) y la Guía de la OMS Anual (20 µg/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente las normas en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 20 se observa una variación diferente y opuesta, en la estación de Campo de Marte (Jesús María), en la cual los máximos valores de concentración de PM₁₀ se registran durante los meses de otoño e invierno y los mínimos valores de concentración de PM₁₀ en el verano o primavera. Esta condición refuerza las conclusiones de Sánchez-Ccoyllo et al., 2016, en lo referido a la existencia de microclimas en los diferentes distritos de Lima Metropolitana, que influyen directamente en las condiciones de dispersión de los contaminantes atmosféricos y el nivel de la calidad del aire en Lima Metropolitana.

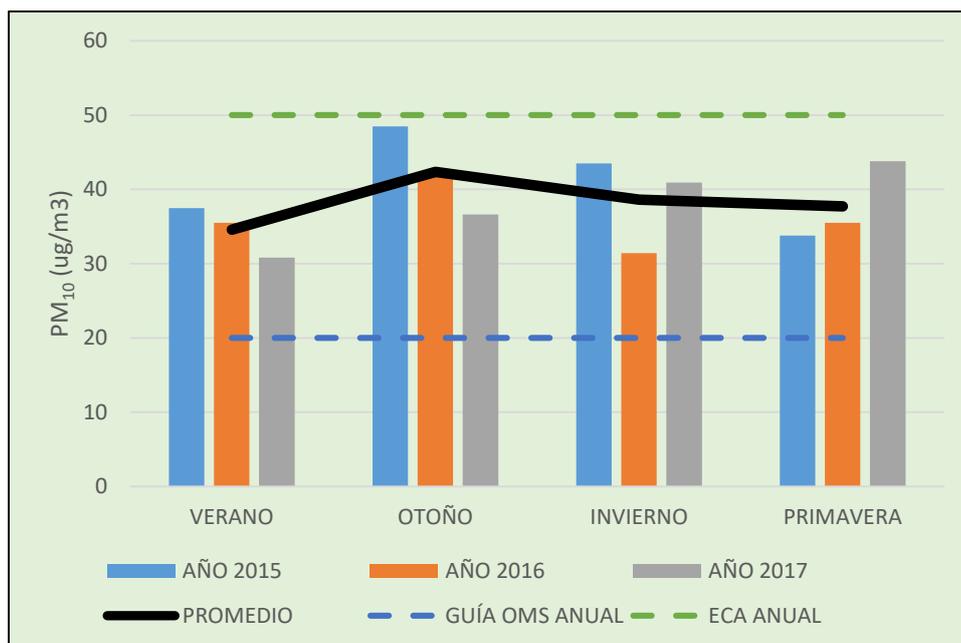


Figura 20. Variación estacional del PM₁₀ para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Anual (20 ug/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente las norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Anual para PM₁₀ (50 µg/m³) se evidencia que todos los años y por lo tanto el promedio están por debajo de la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

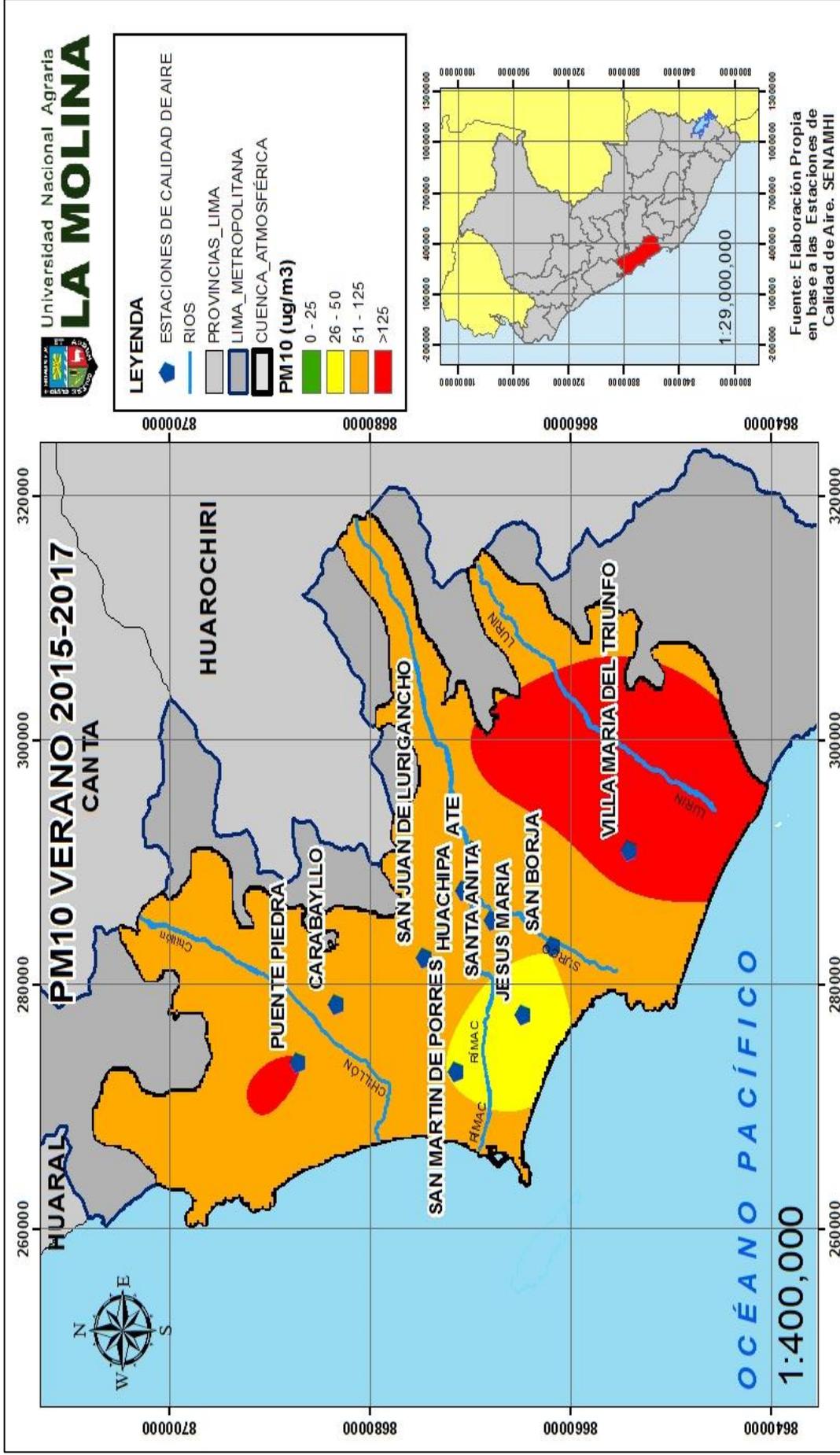


Figura 21. Distribución espacial del PM₁₀ en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017.

En la Figura 21 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración de PM_{10} para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo verano 2015-2017). Se observa que en casi la totalidad de las zonas de Lima Metropolitana se superan el ECA anual para PM_{10} y específicamente las zonas de Lima Sur (Villa María del Triunfo), Lima Norte (Puente Piedra) y Lima Este (Ate), son las áreas donde se registran los mayores valores de PM_{10} durante todo el verano, con concentraciones superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, toda la zona cercana al centro de Lima (Campo de Marte) y San Martín de Porres son las áreas donde se registran los menores valores de PM_{10} y en ningún mes del verano se superan el ECA correspondiente para PM_{10} . Las emisiones del parque automotor y del parque industrial, junto con los terrenos y calles sin pavimentar, afectan directamente a las Zonas Norte, Este y Sur de Lima Metropolitana; mientras las menores concentraciones en la Zona Centro posiblemente tengan relación con la velocidad y dirección del viento (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 22 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración de PM_{10} para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo invierno 2015-2017). Se observa que en casi la totalidad de las zonas de Lima Metropolitana se superan el ECA anual para PM_{10} y específicamente las zonas de Lima Este (Ate, Huachipa) y Lima Norte (Puente Piedra), son las áreas donde se registran los mayores valores de PM_{10} durante todo el invierno, con concentraciones cercanas a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, toda la zona cercana al Centro de Lima (Campo de Marte, San Borja) y San Martín de Porres son las áreas donde se registran los menores valores de PM_{10} y en ningún mes del invierno se superan el ECA correspondiente para PM_{10} . Las emisiones del parque automotor y del parque industrial siguen afectando directamente a las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana; mientras las menores concentraciones en la Zona Centro posiblemente tengan relación con la velocidad y dirección del viento. Además, los niveles de contaminación en la Zona Sur disminuyen respecto el periodo anterior por un efecto del aumento de la humedad relativa en el invierno (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

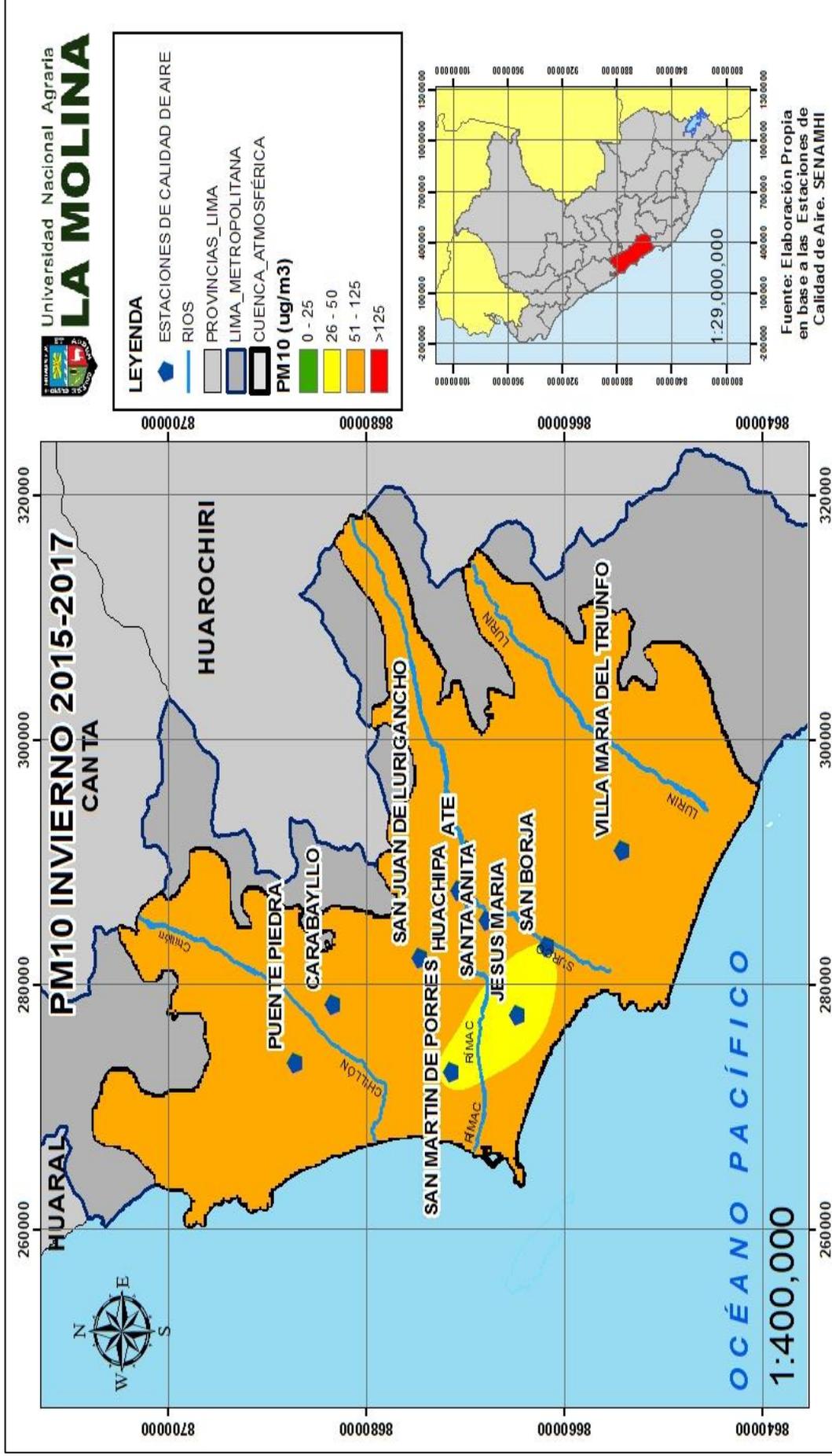


Figura 22. Distribución espacial del PM₁₀ en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017.

4.1.5 Variación multianual y tendencias del PM₁₀ en Lima Metropolitana

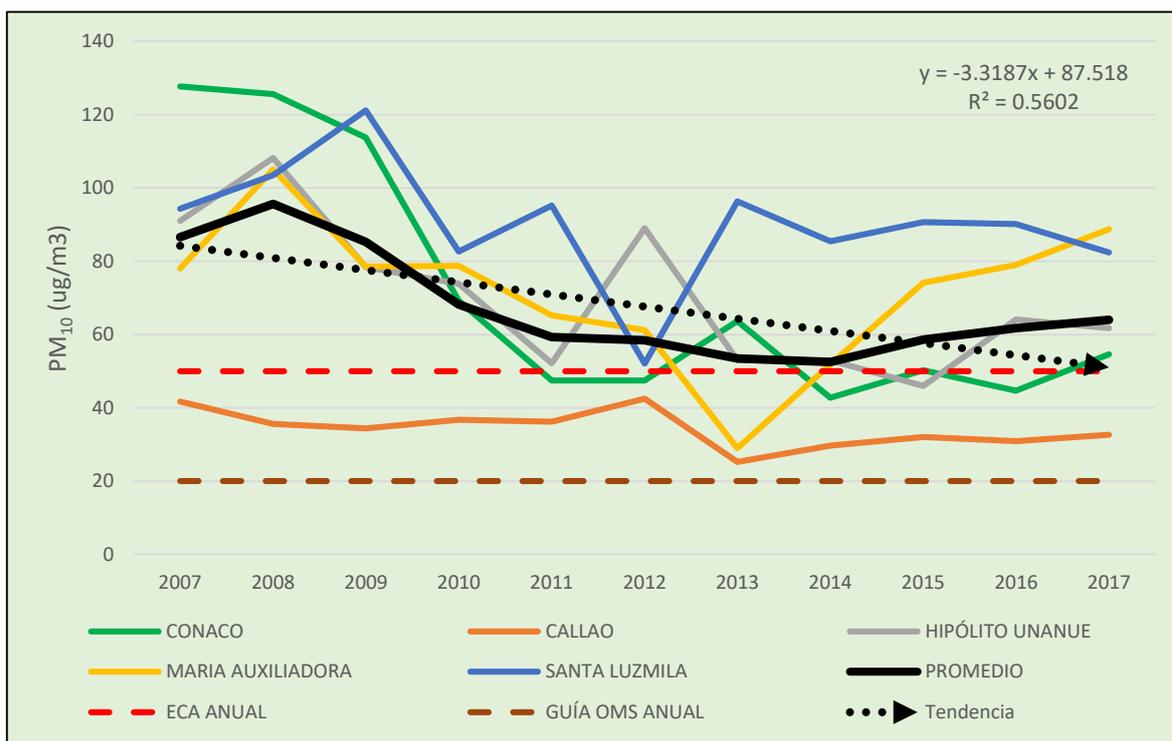


Figura 23. Variación del promedio anual del PM₁₀ para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017.

En la Figura 23 se muestra la variación temporal del promedio multianual de la concentración de PM₁₀ para cinco estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por la DIGESA (periodo 2007-2017). Se incluye además la evaluación de la tendencia de la serie histórica promedio de PM₁₀ de toda la red de monitoreo. Se observa que los valores del PM₁₀ promedio anual de todas las estaciones de monitoreo, a excepción del Callao, superan significativamente los valores límites del ECA anual para PM₁₀ (50 µg/m³) y si tomamos en cuenta las guías de la OMS para PM₁₀ (20 µg/m³) todas las estaciones superan la normativa internacional. Este resultado confirma el anuncio de la OMS que indica que Lima es la ciudad con los peores niveles de calidad del aire por PM₁₀ en la región sudamericana (OMS, 2014).

Las estaciones con mayores valores de PM₁₀ son Santa Luzmila (Zona Norte) y María Auxiliadora (Zona Sur). Esta condición se asocia a las altas emisiones vehiculares y polvo atmosférico natural del entorno de las estaciones de monitoreo. La estación Callao presenta

los mínimos valores de PM_{10} durante todos los años y nunca supera el ECA nacional, debido a que se asocia a una mayor dispersión de los contaminantes por el viento en la zona (Pacsi, 2016).

El análisis de tendencias de la serie histórica muestra que existe una disminución moderada (coeficiente de determinación de 0.560) de los niveles de PM_{10} en casi todas las estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio. Sin embargo, los niveles siguen siendo superiores al ECA de PM_{10} . Esta disminución progresiva parcial se explica por la implementación progresiva de medidas de control y gestión de calidad del aire por las distintas entidades gubernamentales en los últimos ocho años: fomento al cambio de matriz energética a GNV y GLP del parque automotor de Lima, la implementación del Gasohol y la implementación de corredores viales y el tren eléctrico (Pacsi, 2016). A pesar de estos esfuerzos se observa un aumento progresivo en las concentraciones de PM_{10} a partir del año 2014 para adelante, lo cual está relacionado con el ingreso de nuevos vehículos en circulación y a la falta de medidas complementarias.

4.2 Evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017

Para el estudio se utilizó una base de datos de promedios horarios de material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2,5}$) medidos en la red de calidad del aire del SENAMHI del Perú, para el periodo 2015-2017.

Las estadísticas descriptivas de las concentraciones del $PM_{2,5}$ se presentan en el Tabla 15. Se observa respecto a las medias que, en la Zona Norte, el mayor valor lo obtiene la estación Puente Piedra y el menor la estación San Martín de Porres. En la Zona Este, el mayor valor lo obtiene la estación Ate y el menor valor la estación Huachipa. En la Zona Sur, la estación Villa María del Triunfo obtiene un valor de 24.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Y finalmente, en la Zona Centro, el mayor valor lo obtiene la estación San Borja y el menor la estación Campo de Marte.

Tabla 15. Estadísticas descriptivas de las concentraciones del material particulado PM_{2,5} en las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI.

Zona	Estación de monitoreo	PM _{2,5} (ug/m3)				ECA Anual (ug/m3)
		Media	Desviación Estándar	Min	Max	
Norte	Puente Piedra	31.3	13.6	3.0	279.2	25
	Carabayllo	26.1	15.8	1.1	250.6	
	San Martín de Porres	16.7	9.4	1.6	178.5	
	San Juan de Lurigancho	30.4	16.8	2.0	372.0	
Este	Huachipa	27.5	19.8	1.3	233.4	
	Santa Anita	29.6	15.8	1.4	207.0	
	Ate	38.0	22.4	2.0	215.5	
Sur	Villa María del Triunfo	24.7	14.2	1.2	191.7	
Centro	Campo de Marte	14.2	8.4	1.0	96.4	
	San Borja	18.2	11.7	1.2	137.9	

4.2.1 Variación horaria y espacial del PM_{2,5} en Lima Metropolitana

Se observa en la Figura 24 la variación horaria multianual del PM_{2,5} para las estaciones de la Zona Norte de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 10:00 a.m. (32.0 µg/m³) y el segundo a las 11:00 p.m. (24.1 µg/m³), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am (22.5 µg/m³) y 06:00 pm (20.7 µg/m³) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mayores valores de concentración de PM_{2,5} se registraron en la estación Puente Piedra observándose un pico máximo de 41.1 µg/m³ y los mínimos valores se registran en la estación San Martín de Porres, el cual tiene un pico máximo de 22.0 µg/m³. Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (25 ug/m³), se observa que en promedio desde la 07:00 a.m. hasta las 01:00 p.m. sobrepasan significativamente la

norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para $PM_{2.5}$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se evidencia que todas las horas y por lo tanto el promedio para todas las estaciones no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

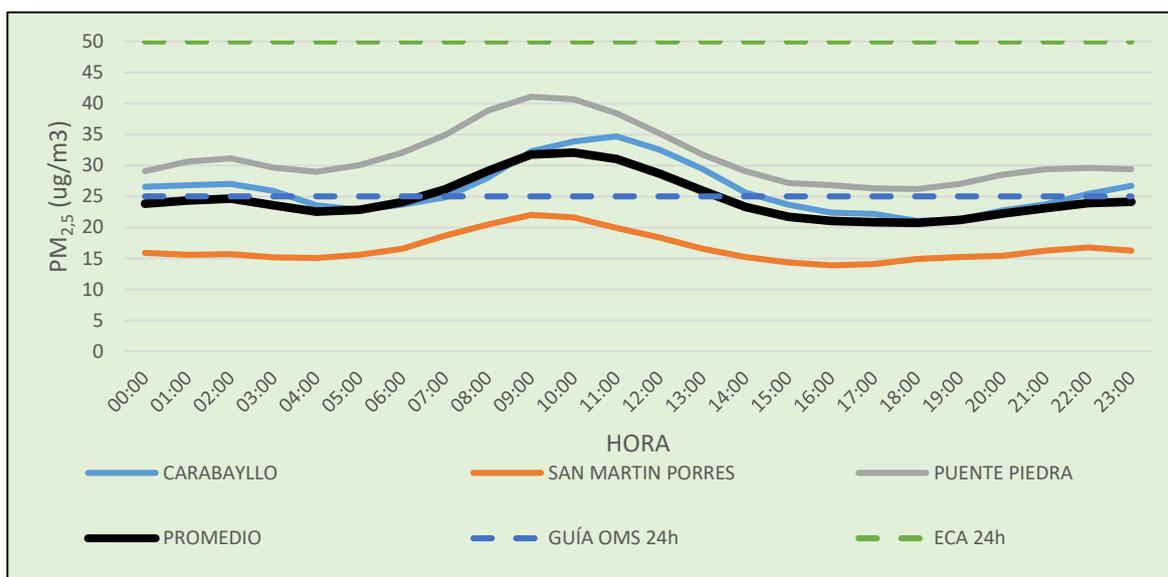


Figura 24. Variación horaria multianual del $PM_{2.5}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 25 la variación horaria multianual del $PM_{2.5}$ para las estaciones de la Zona Este de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 09:00 a.m. ($45.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el segundo a las 11:00 p.m. ($29.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am ($31.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 05:00 pm ($23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mayores valores de concentración de $PM_{2.5}$ se registraron en la estación Ate observándose un pico máximo de $55.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los mínimos valores se registran en la estación Huachipa, el cual tiene un pico máximo de $43.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando los valores

medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que todas las horas y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente la norma en mención, salvo en el periodo comprendido entre las 03:00 p.m. y 06:00 p.m. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para $\text{PM}_{2,5}$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se evidencia que en promedio no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

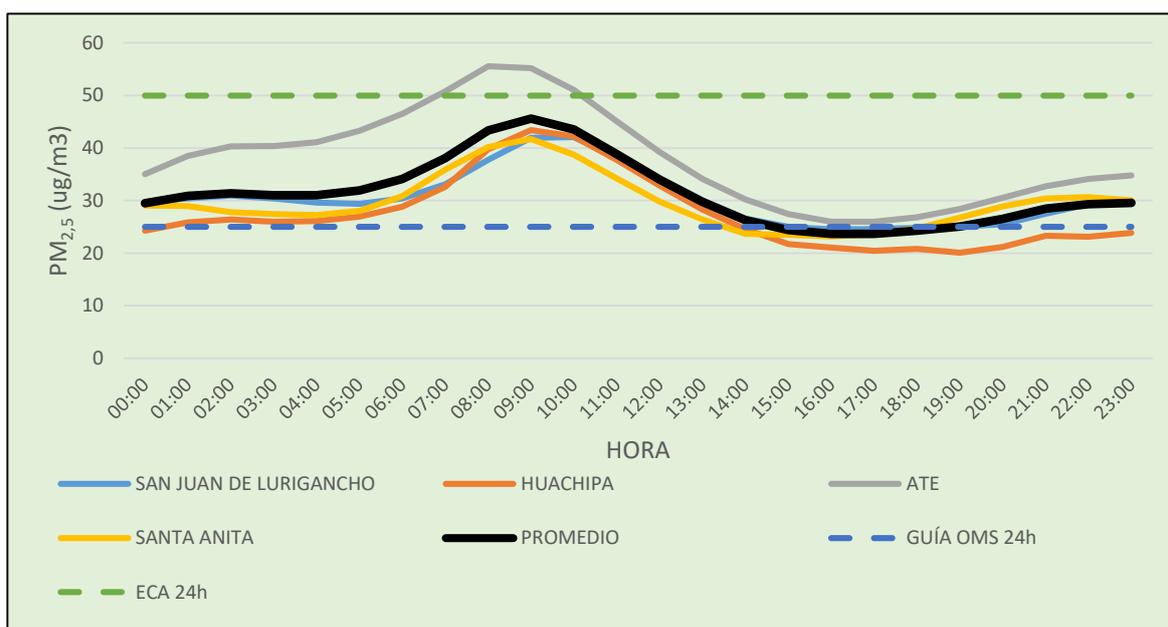


Figura 25. Variación horaria multianual del $\text{PM}_{2,5}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 26 la variación horaria multianual del $\text{PM}_{2,5}$ para las estaciones de las Zonas Centro y Sur de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 09:00 a.m. ($26.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el segundo a las 10:00 p.m. ($18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 04:00 am ($16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 05:00 pm ($15.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

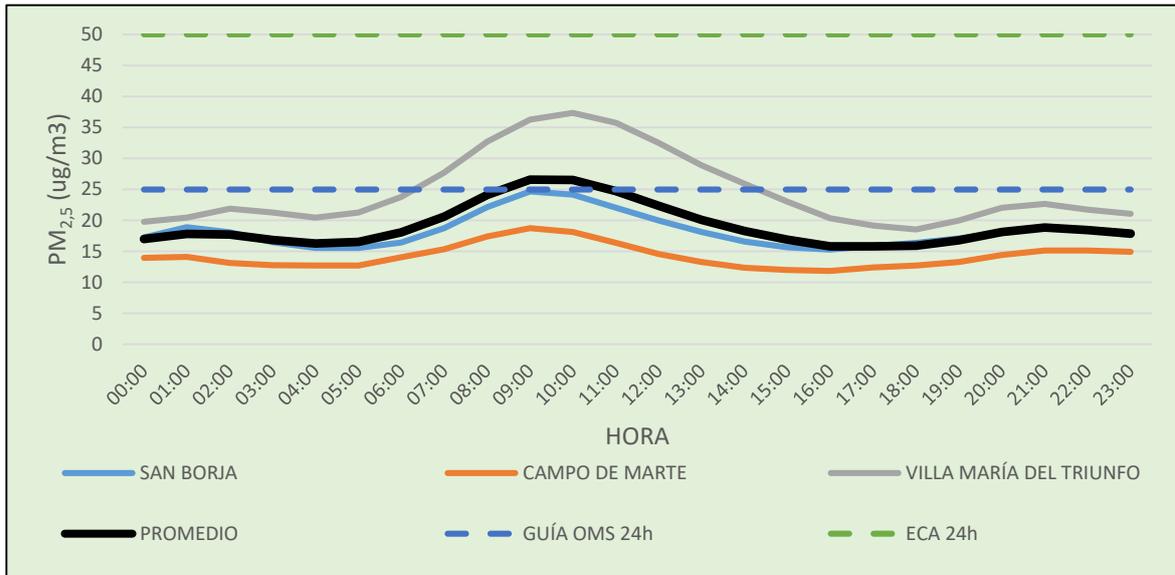


Figura 26. Variación horaria multianual del PM_{2,5} en la Zona Centro y Sur. Periodo 2015-2017.

Los mayores valores de concentración de PM_{2,5} se registraron en la estación Villa María del Triunfo observándose un pico máximo de 37.3 µg/m³ y los mínimos valores se registran en la estación Campo de Marte, el cual tiene un pico máximo de 18.7 µg/m³. Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (25 ug/m³), se observa que en promedio casi la totalidad de las horas y por lo tanto el promedio no sobrepasan significativamente la norma en mención, salvo en el periodo comprendido entre las 09:00 a.m. y 10 a.m. Además, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM_{2,5} (50 µg/m³) se evidencia que en promedio no sobrepasan significativamente la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Se observa en la Figura 27 la variación espacial multianual del PM_{2,5} para las estaciones de Lima Metropolitana operadas por el SENAMHI para el periodo 2015-2017. Los mayores niveles de concentraciones de material particulado fino se encuentran en la Zona Este de Lima Metropolitana y los menores niveles se encuentran en la Zona Centro, esta variación se explica por emisiones tanto del parque automotor e industrial, junto con las características urbanísticas propias de cada zona, como la falta de una pavimentación en las calles de la Zona Este comparado con las vías en buen estado y mayores áreas verdes en la Zona Centro.

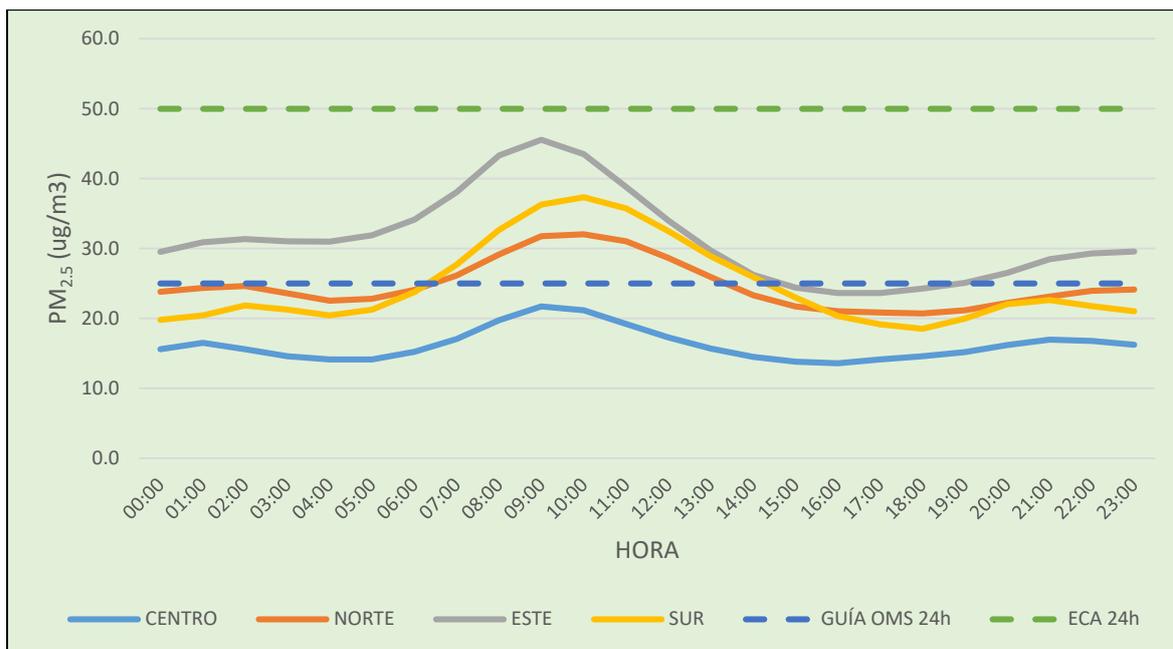


Figura 27. Variación espacial multianual del PM_{2.5} en Lima Metropolitana. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Diario (25 ug/m³), se observa que en promedio todas las zonas sobrepasan significativamente la norma en mención, principalmente en las horas picos; salvo las estaciones en la Zona Centro, que en ningún momento supera la norma. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Diario para PM_{2.5} (50 µg/m³) se evidencia que en promedio no sobrepasan la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

4.2.2 Variación diaria del PM_{2.5} en Lima Metropolitana

En la Figura 28 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Norte de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de PM_{2.5} del año 2017 son mayores que del promedio.

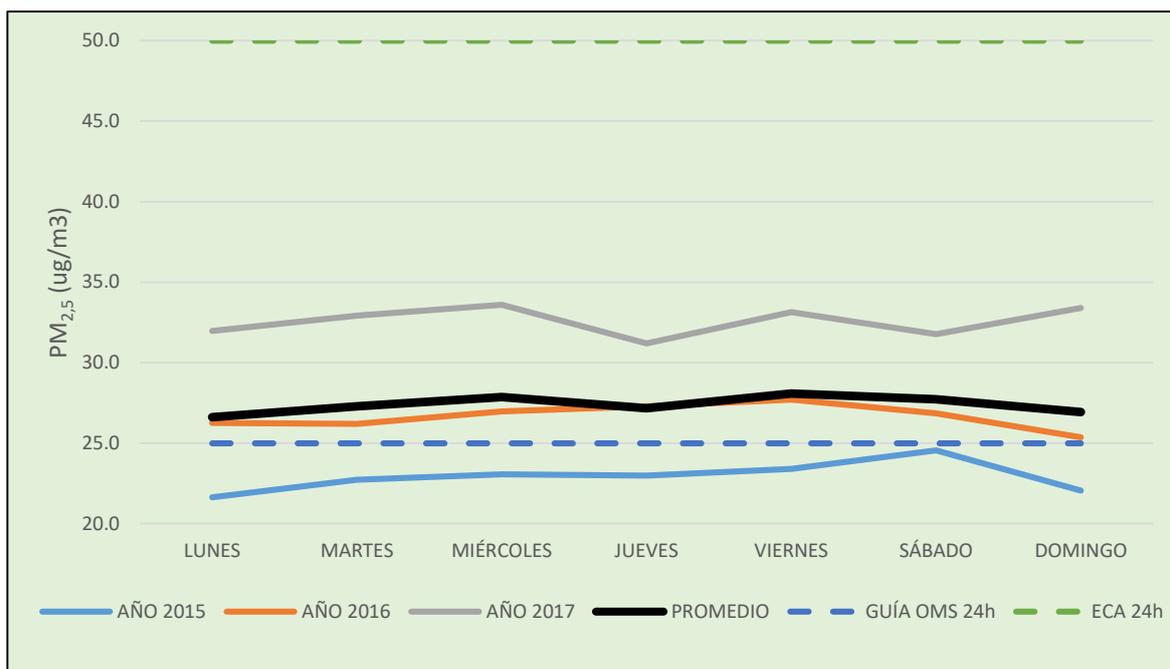


Figura 28. Variación diaria y semanal promedio del $PM_{2.5}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa que los mayores valores de concentración de $PM_{2.5}$ en promedio se dan los días miércoles y viernes. Además, los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Norte que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, salvo en el año 2017. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 29 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Este de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de $PM_{2.5}$ de los años 2016 y 2017 son mayores que del promedio.

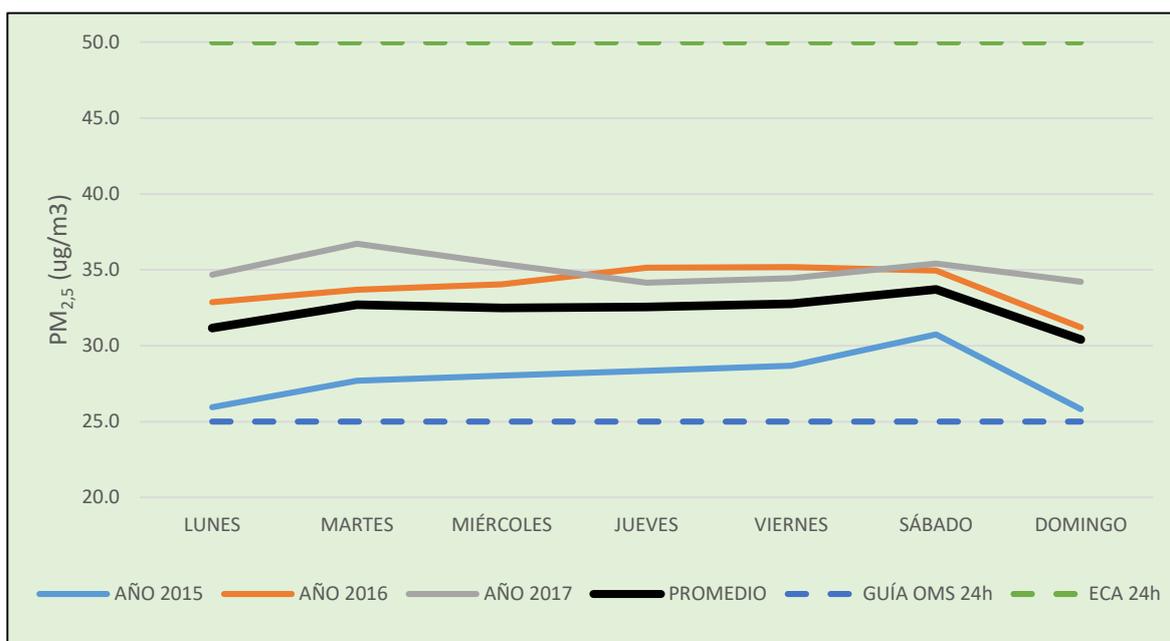


Figura 29. Variación diaria y semanal promedio del $PM_{2.5}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa que los mayores valores de concentración de $PM_{2.5}$ en promedio se dan los días viernes y sábado. Además, los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Este que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 30 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Sur de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de $PM_{2.5}$ del año 2017 son mayores que del promedio.

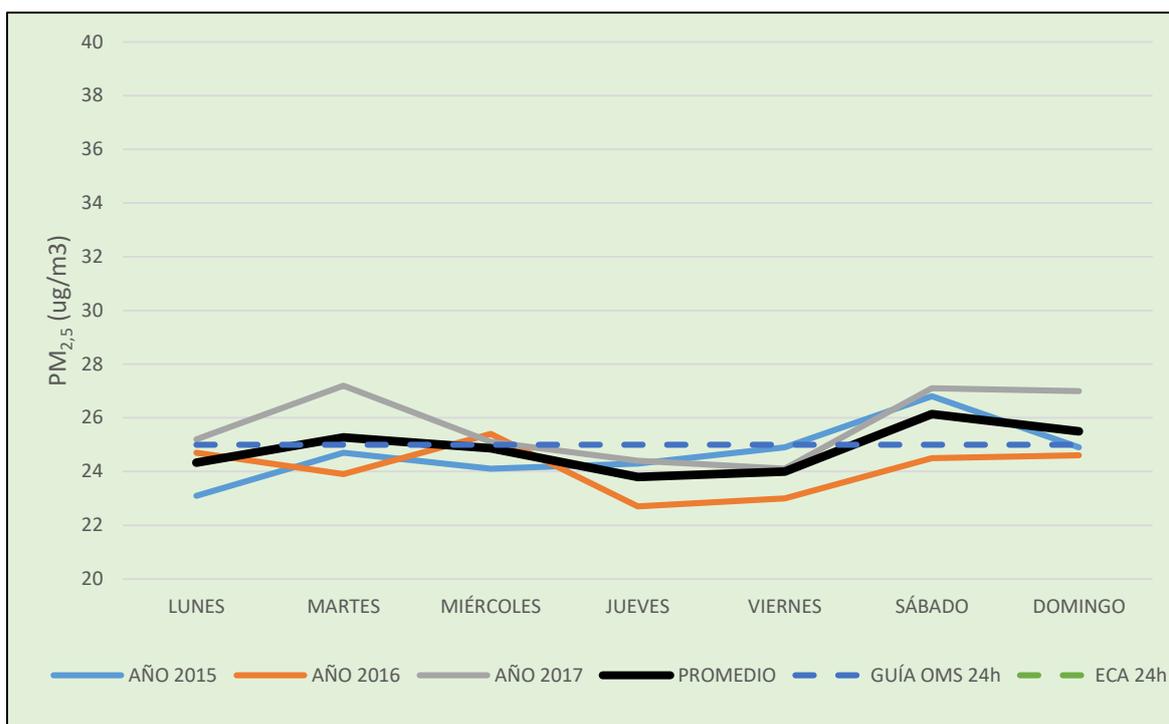


Figura 30. Variación diaria y semanal del $PM_{2.5}$ la Zona Sur. Periodo 2015-2017.

Se observa que los mayores valores de concentración de $PM_{2.5}$ en promedio se dan los días martes y sábado. Además, los valores del año 2016 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Sur que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016). Sin embargo, en todos los años los mínimos valores no se registraron los días domingos, lo cual es incoherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular.

En la Figura 31 se muestra la variación diaria semanal para la Zona Centro de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de concentración de $PM_{2.5}$ de los años 2015 y 2016 son mayores que del promedio.

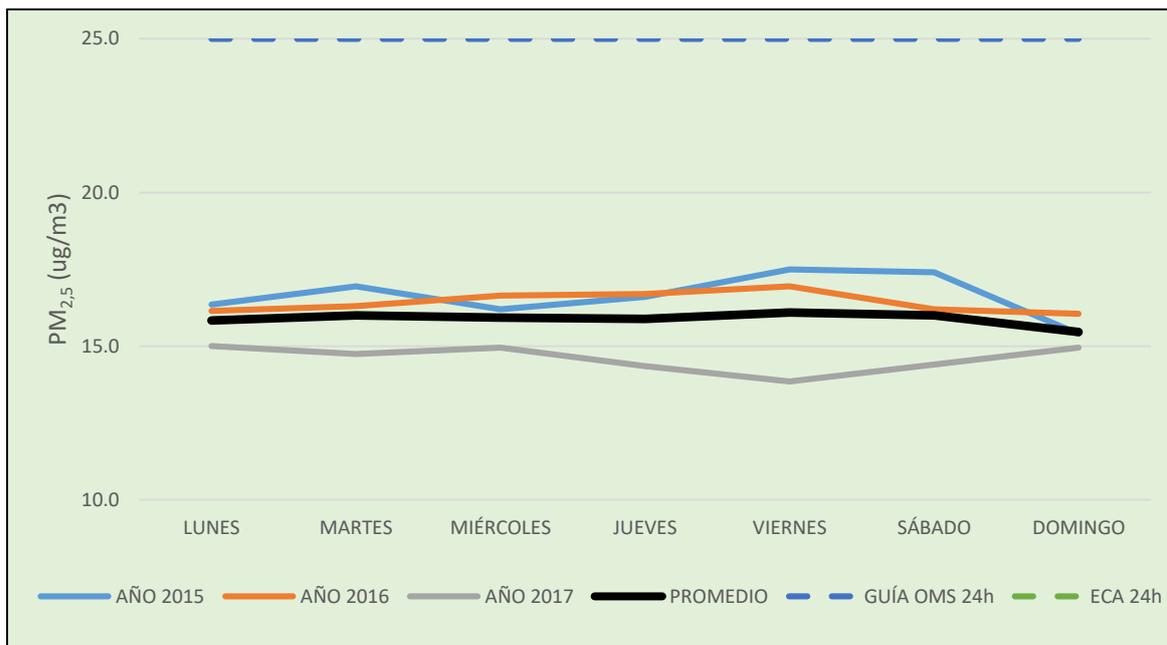


Figura 31. Variación diaria y semanal del $PM_{2.5}$ en la Zona Centro. Periodo 2015-2017.

Se observa que los mayores valores de concentración de $PM_{2.5}$ en promedio se dan los días viernes y sábado. Además, los valores del año 2017 son menores al promedio del periodo 2015-2017. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Centro que ha ido disminuyendo respecto este año de estudio. En todos los años los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, con excepción de año 2017. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

4.2.3 Variación mensual del $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana

En la Figura 32 se muestra la variación mensual multianual del $PM_{2.5}$ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana, operadas por el SENAMHI para el periodo 2015-2017.

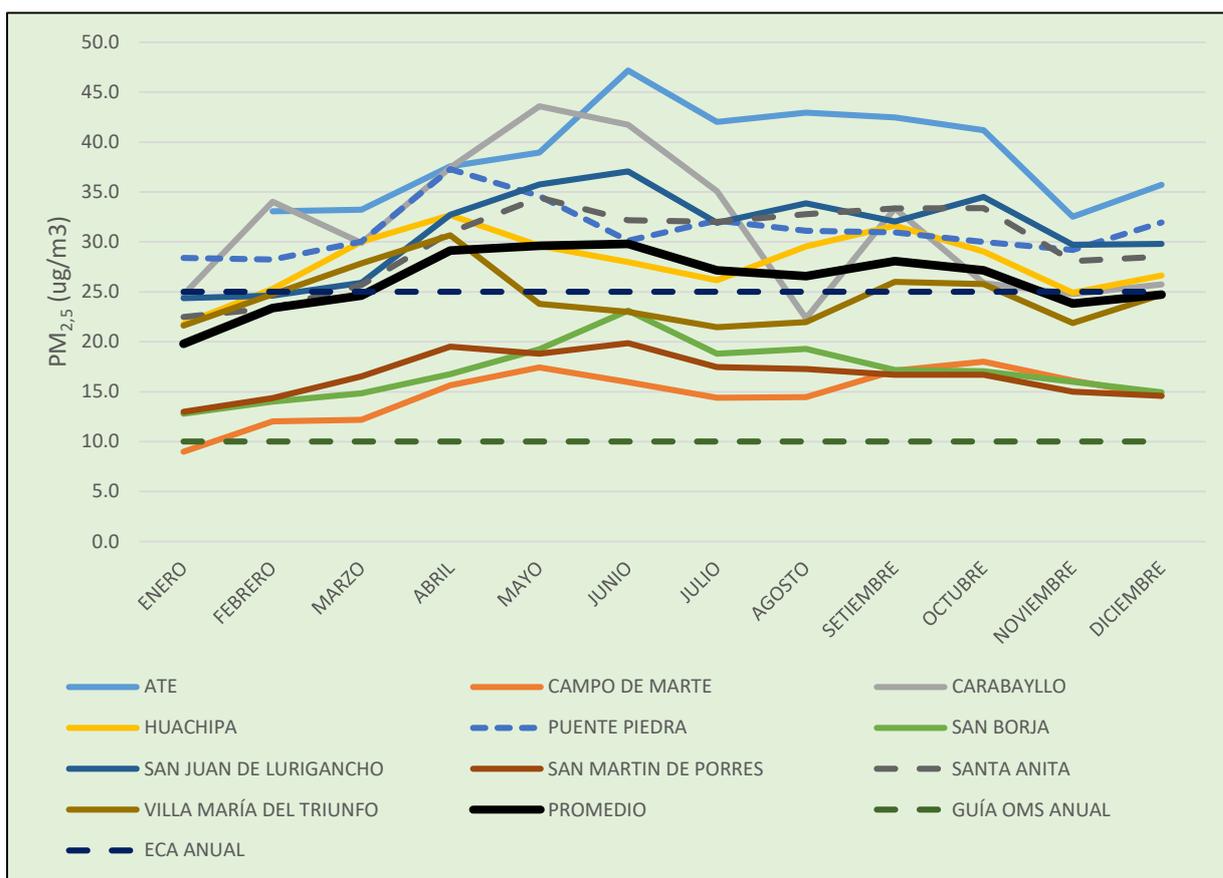


Figura 32. Variación mensual multianual del PM_{2.5} para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 32, que la estación Ate (Zona Este) es la que presenta los mayores valores de PM_{2.5} durante todo el año, con un pico máximo durante el mes de junio, y un pico mínimo durante el mes de noviembre. La variación mensual es similar en el resto de estaciones de calidad del aire y se explica por las condiciones meteorológicas predominantes de estabilidad atmosférica (mayo y junio) e inestabilidad atmosférica y turbulencia en los meses de verano (Sánchez-Ccoyllo et al., 2015). Sin embargo, la experiencia internacional muestra que los altos niveles de PM_{2.5} están asociados básicamente a las emisiones vehiculares (Alvarado, 2006; Keuken et al., 2013; OMS, 2016).

La estación Campo de Marte es la que presenta los menores valores de PM_{2.5} en relación al resto de estaciones y presenta sus máximos valores en otoño y primavera, mientras que los mínimos en verano, condiciones que se asocian dada su ubicación en una zona comercial

/urbana a 100 metros de la Av. Salaverry, cuenta con vías en buen estado y presenta un flujo regular de vehículos. Además, posee diversas áreas verdes las cuales amortiguan el impacto de las obras de construcción llevadas a cabo en el distrito (Sánchez-Ccoyllo et al., 2015).

4.2.4 Variación estacional y espacial del PM_{2,5} para distritos representativos de Lima Metropolitana

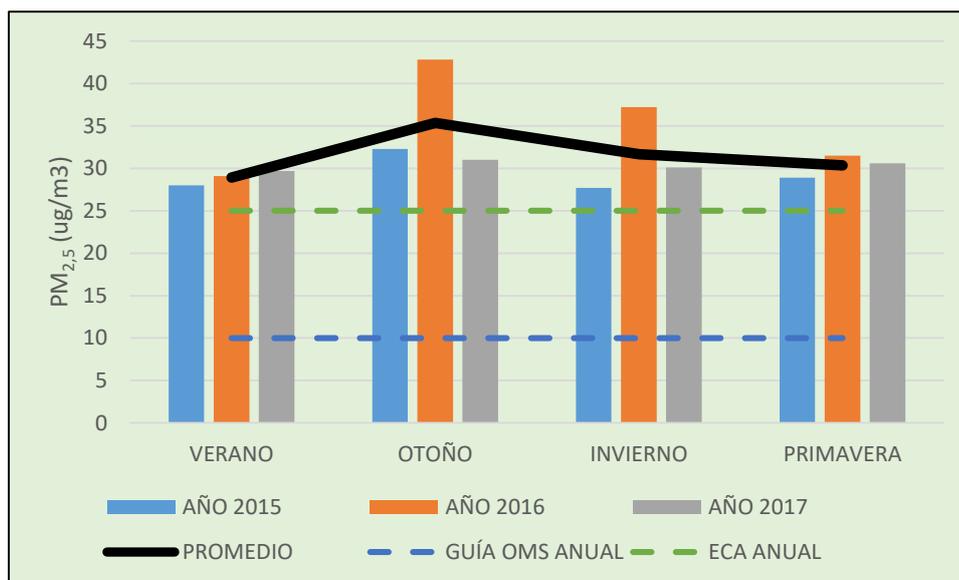


Figura 33. Variación estacional del PM_{2,5} para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017.

En la Figura 33 se muestra la variación estacional del PM_{2,5} para la estación de calidad del aire Puente Piedra, operada por el SENAMHI, para el periodo 2015-2017. Se evidencia que la estación de monitoreo presenta sus máximos valores en la época de otoño y los mínimos en el verano.

Comparando los valores medidos con lo que establece el ECA Anual para PM_{2,5} (25 µg/m³) y la Guía de la OMS Anual (10 ug/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente las normas en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

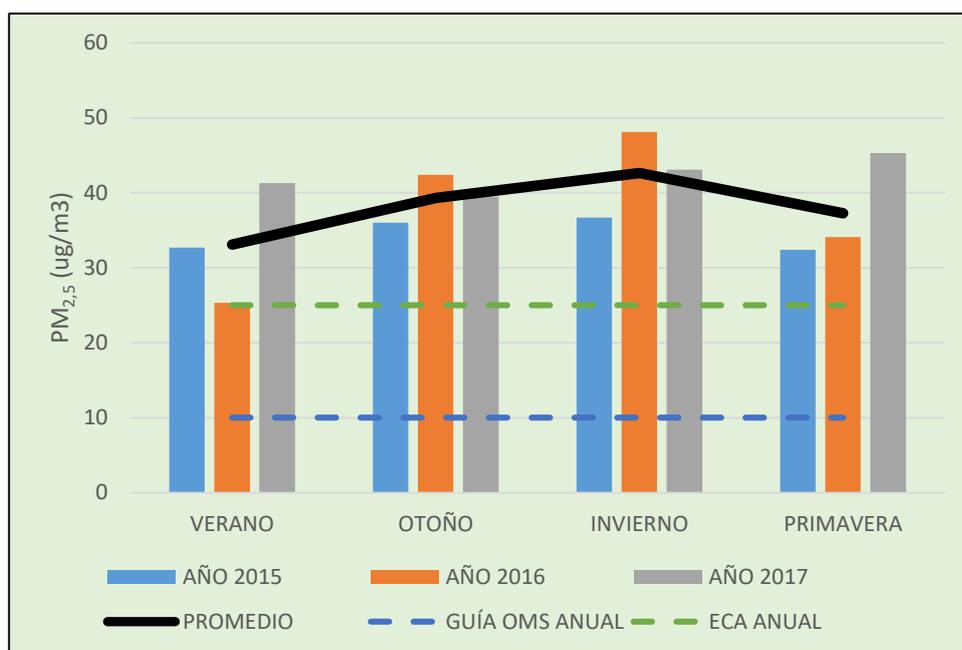


Figura 34. Variación estacional del PM_{2,5} para la estación Ate. Periodo 2015-2017.

En la Figura 34 se muestra la variación estacional del PM_{2,5} para la estación de calidad del aire Ate, operada por el SENAMHI, para el periodo 2015-2017. Se evidencia que la estación de monitoreo presenta sus máximos valores en la época de invierno y los mínimos en el verano.

Comparando los valores medidos con lo que establece el ECA Anual para PM_{2,5} (25 µg/m³) y la Guía de la OMS (10 ug/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente las normas en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 35 se muestra la variación estacional del PM_{2,5} para la estación de calidad del aire Campo de Marte, operada por el SENAMHI, para el periodo 2015-2017. Se evidencia que la estación de monitoreo presenta sus máximos valores en la época de primavera y los mínimos en el verano.

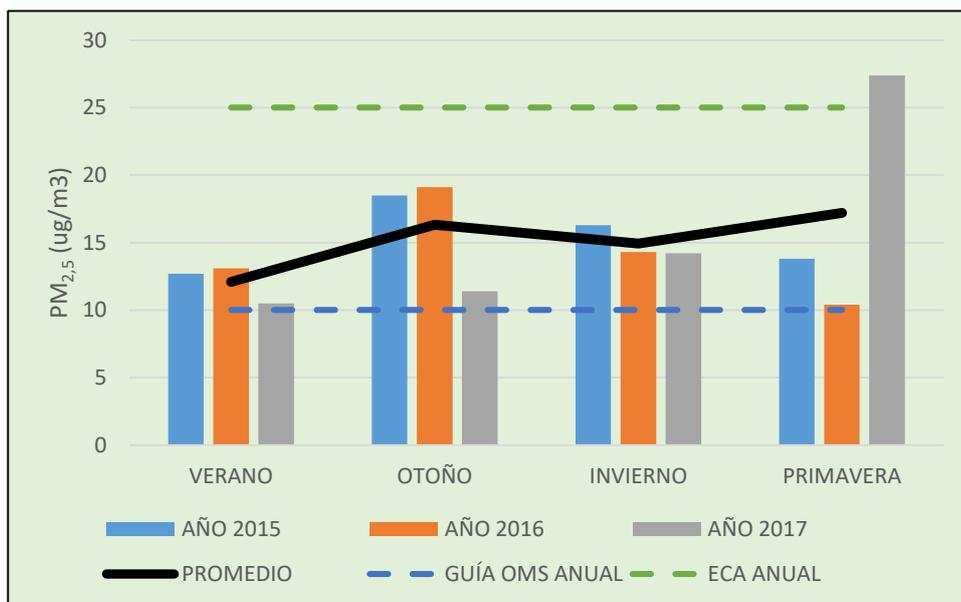


Figura 35. Variación estacional del PM_{2,5} para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Anual (10 ug/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente la norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Anual para PM_{2,5} (25 µg/m³) se evidencia que todos los años y por lo tanto el promedio están por debajo de la norma en mención, salvo en la primavera del 2017 donde se supera el ECA Anual. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 36 se muestra la variación estacional del PM_{2,5} para la estación de calidad del aire Villa María del Triunfo, operada por el SENAMHI, para el periodo 2015-2017. Se evidencia que la estación de monitoreo presenta sus máximos valores en la época de otoño y los mínimos en el invierno.

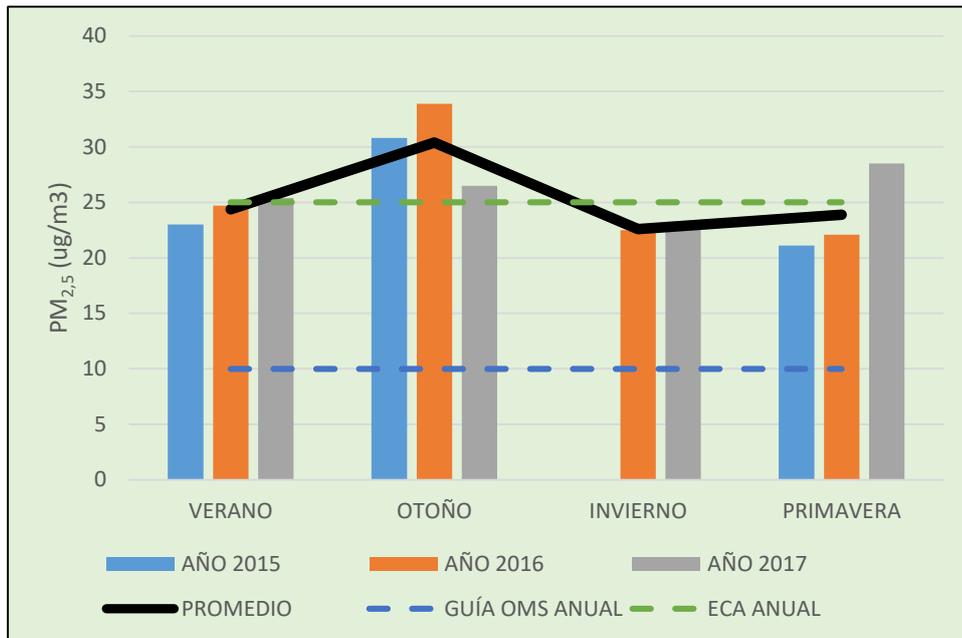


Figura 36. Variación estacional del PM_{2,5} para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017.

Comparando los valores medidos con lo que establece la Guía de la OMS Anual (10 ug/m³), se observa que todos los años y por lo tanto el promedio sobrepasan significativamente la norma en mención. Sin embargo, al comparar con lo que establece el ECA Anual para PM_{2,5} (25 µg/m³) se evidencia que todas las estaciones en promedio están por debajo de la norma en mención, salvo en la estación Otoño donde se supera significativamente la norma en mención. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

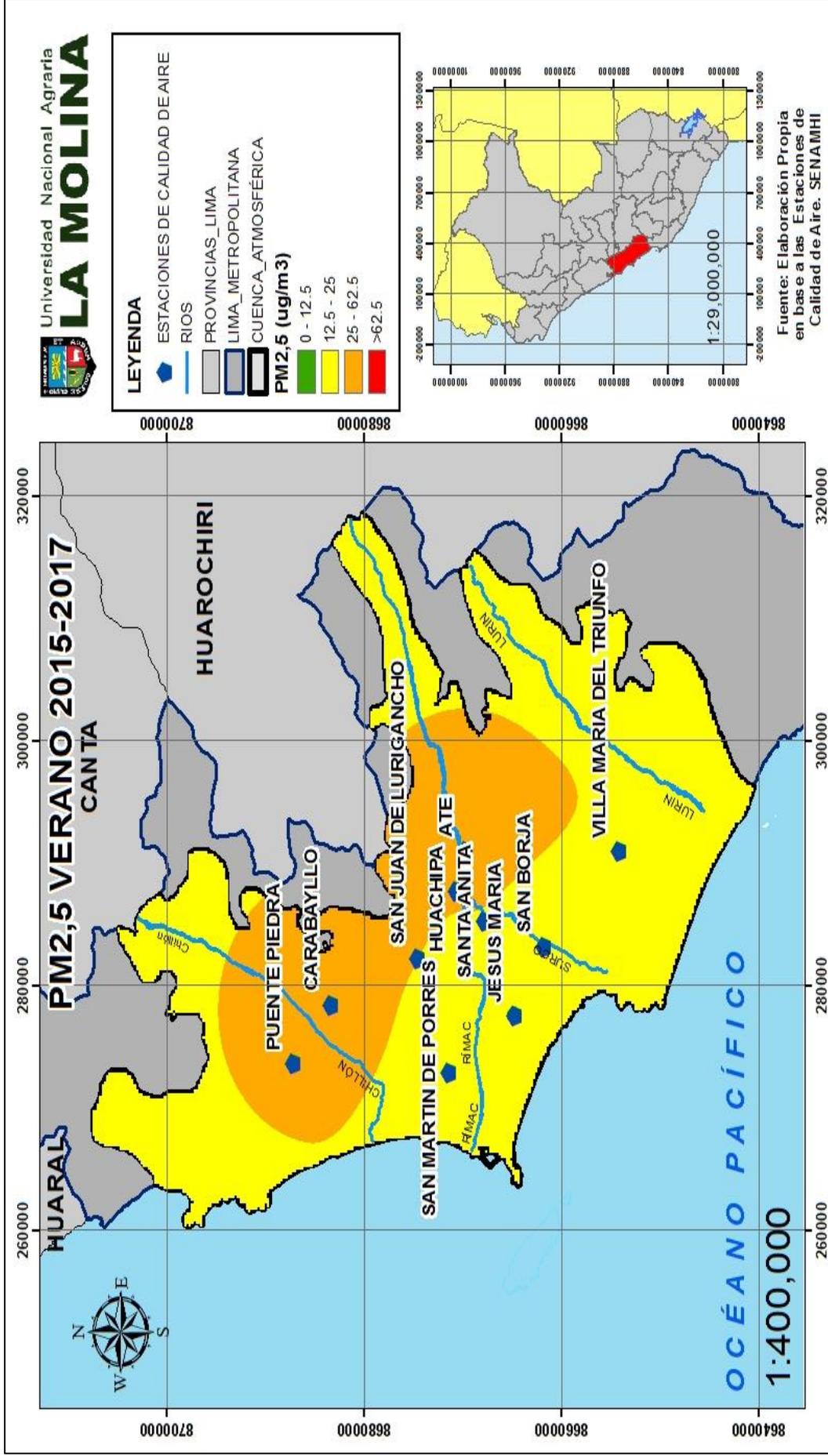


Figura 37. Distribución espacial del PM_{2,5} en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017.

En la Figura 37 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración del $PM_{2,5}$ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo verano 2015-2017). Se observa que todas las zonas de Lima Metropolitana superan la guía de la OMS que es de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, las zonas de Lima Norte (Carabayllo, Puente Piedra) y Lima Este (Ate, Huachipa) presentan los mayores valores de concentración durante todo el verano. Las zonas con menores valores de concentración de $PM_{2,5}$ se encuentran cercanas al Centro de Lima (Campo de Marte, San Borja) y San Martín de Porres, estas áreas en ningún mes del verano superan el ECA correspondiente para $PM_{2,5}$ de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las emisiones del parque automotor e industrial alteran la calidad del aire en las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana; mientras los menores niveles de contaminación en la Zona Centro probablemente está relacionado con la dirección y velocidad de los vientos, junto con la mayor extensión de áreas verdes existentes en la Zona (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

En la Figura 38 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración del $PM_{2,5}$ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo invierno 2015-2017). Se observa que todas las zonas de Lima Metropolitana superan la guía de la OMS que es de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, las zonas de Lima Este (Ate, San Juan de Lurigancho, Santa Anita, Huachipa) y Lima Norte (Puente Piedra, Carabayllo) presentan los mayores valores de concentración durante todo el invierno. Las zonas con menores valores de concentración de $PM_{2,5}$ se encuentran cercanas al Centro de Lima (Campo de Marte, San Borja) y San Martín de Porres, estas áreas en ningún mes del invierno superan el ECA correspondiente para $PM_{2,5}$ de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las emisiones del parque automotor e industrial nuevamente afectan la calidad del aire en las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana, sin embargo en este periodo abarca una mayor extensión respecto el verano, posiblemente relacionado a la estabilidad atmosférica que gobierna en este periodo; mientras los menores niveles de contaminación en la Zona Centro probablemente está relacionado con la dirección y velocidad de los vientos, junto con la mayor extensión de áreas verdes existentes en la Zona (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

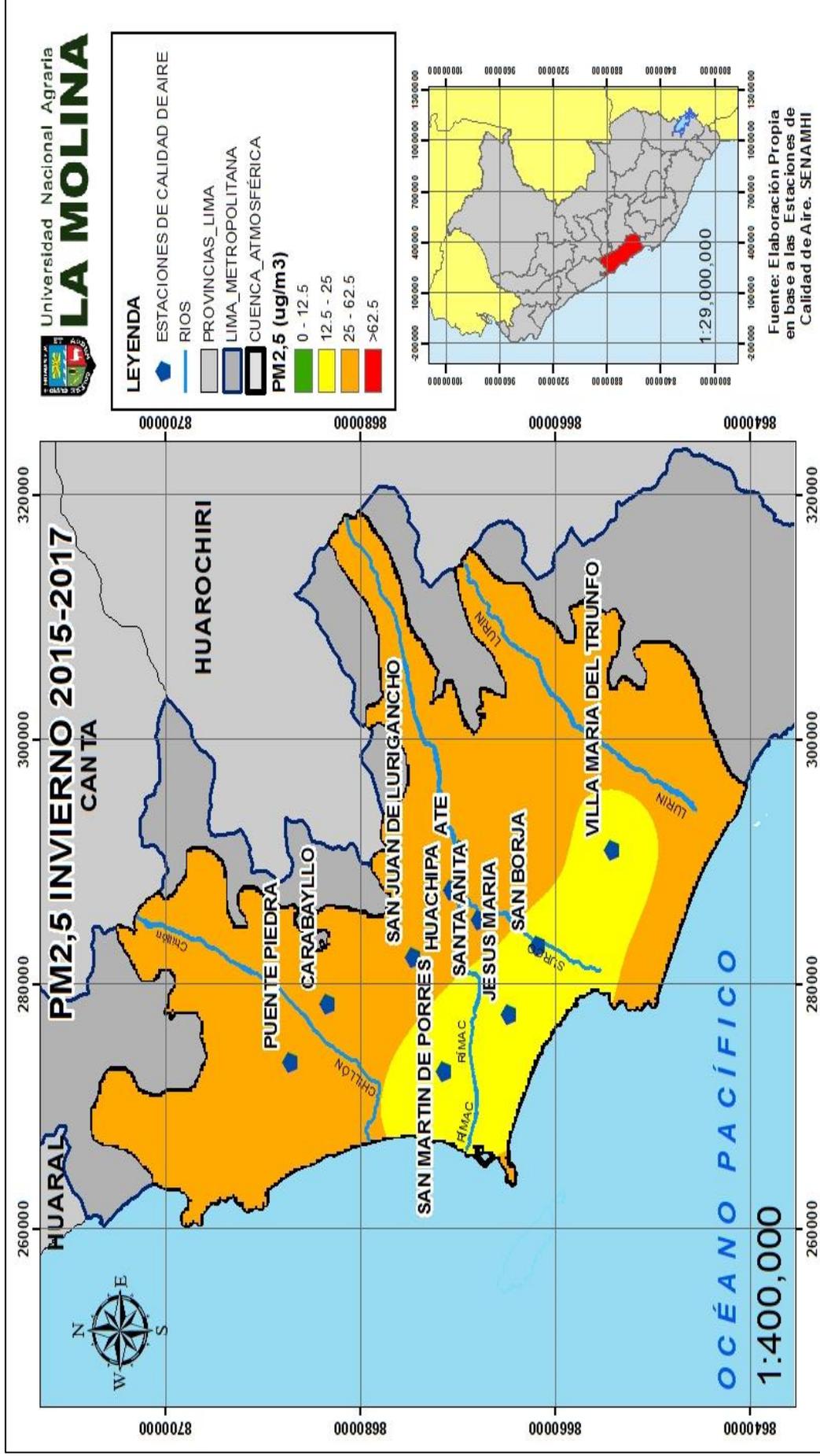


Figura 38. Distribución espacial del PM_{2,5} en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017.

4.2.5 Variación multianual y tendencias del PM_{2,5} en Lima Metropolitana

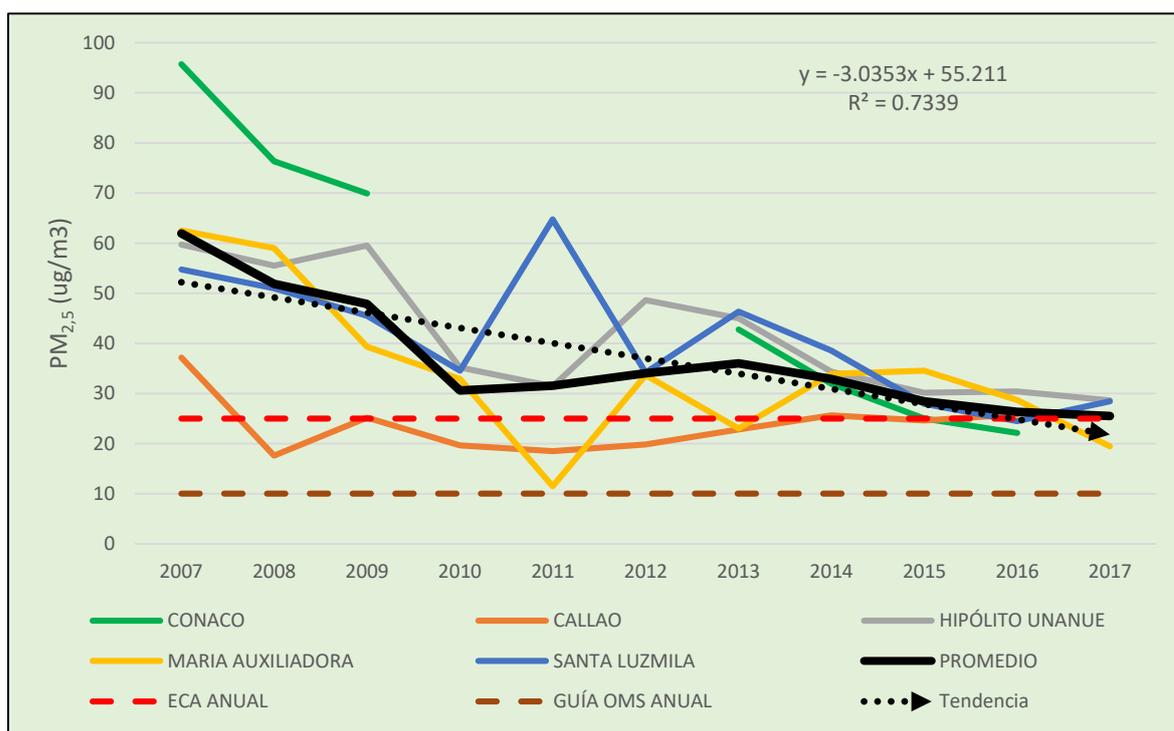


Figura 39. Variación del promedio anual del PM_{2,5} para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017.

En la Figura 39 se muestra la variación temporal del promedio multianual de la concentración de PM_{2,5} para las cinco estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por la DIGESA (periodo 2007-2017). Se incluye además la evaluación de la tendencia de la serie histórica promedio de PM_{2,5} de toda la red de monitoreo. Se observa en la misma Figura 39, que los valores del PM_{2,5} promedio anual de todas las estaciones de monitoreo, superan significativamente los valores límites de la guía de la OMS para PM_{2,5} (10 µg/m³) y el estándar de la EPA para PM_{2,5} (15 µg/m³), con excepción de la estación María Auxiliadora que cumple el estándar de la EPA para el año 2011. Este resultado confirma el anuncio de la OMS que indica que Lima es la ciudad con los peores niveles de calidad del aire por PM_{2,5} en la región sudamericana (OMS, 2014).

Los niveles de PM_{2,5} se han ido incrementando en las diferentes estaciones, como es el caso de la estación Santa Luzmila (Zona Norte) y Callao (Zona Oeste). Esta condición indica que las acciones adoptadas, como lo fueron la implementación de medidas de control y gestión

de calidad del aire por las distintas entidades gubernamentales, tales como la implementación de los estándares de calidad ambiental del aire (ECAS) para los contaminantes criterio y la aprobación de los límites máximos permisibles para las emisiones vehiculares en el año 2001, el retiro del plomo de la gasolina de 84 octanos, la disminución del contenido de azufre del diésel, entre otras medidas a inicios de los años 2000 fueron muy importantes, sin embargo existe una tasa de ingreso de vehículos nuevos y usados a partir del 2010 que han hecho que el parque automotor se incremente significativamente y con ello se han intensificado también las emisiones vehiculares y el deterioro de la calidad del aire (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016). El análisis de tendencias de la serie histórica muestra que existe en general una disminución alta de los niveles de $PM_{2.5}$ en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.734.

4.3 Cálculo y análisis de la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2.5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana.

4.3.1 Variación horaria de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana

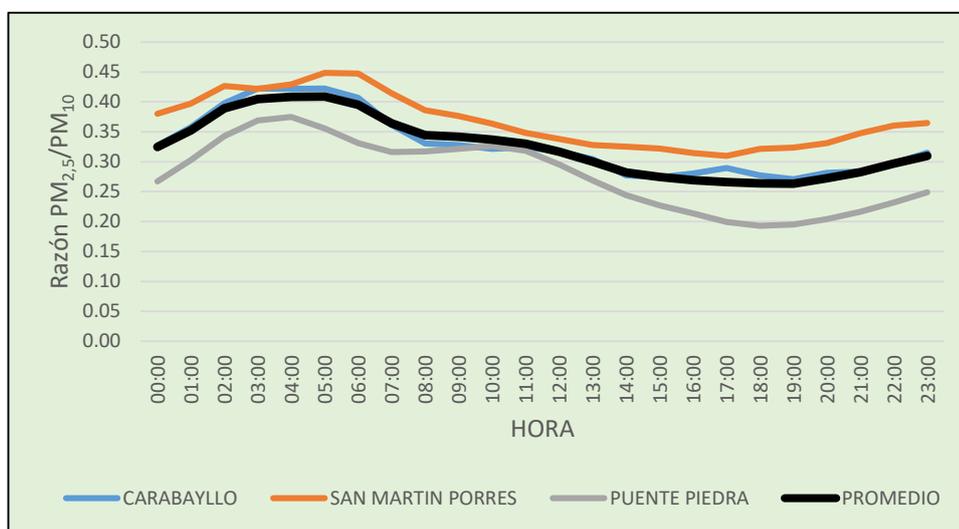


Figura 40. Variación horaria multianual de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 40 la variación horaria multianual de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ para las estaciones de la Zona Norte de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar una cresta a las 04:00 a.m. (0.41) y un valle a las 07:00

p.m. (0.26). Los mayores valores se registraron en la estación San Martín de Porres y los menores valores se registraron en la estación Puente Piedra. Además, se evidencia que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye durante el día y aumenta en las noches y madrugadas.

Durante el día existe una predominancia del material particulado grueso respecto al fino por lo que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye; durante la noche y madrugadas existe una predominancia del material particulado fino respecto al grueso por lo que la relación aumenta. Esto es debido posiblemente a la mayor influencia de las fuentes de combustión industriales a estas horas y un posible efecto de las condiciones atmosféricas como la temperatura del aire y la velocidad de viento. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

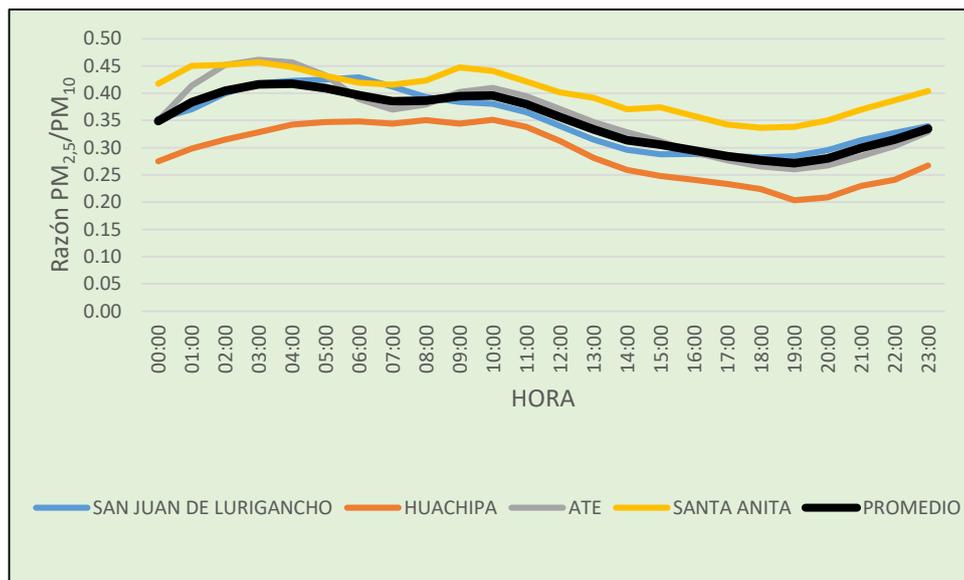


Figura 41. Variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 41 la variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de la Zona Este de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar una cresta a las 04:00 a.m. (0.42) y un valle a las 07:00 p.m. (0.27). Los mayores valores se registraron en la estación Santa Anita y los menores

valores se registraron en la estación Huachipa. Además, se evidencia que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye durante el día y aumenta en las noches y madrugadas.

Durante el día existe una predominancia del material particulado grueso respecto el fino por lo que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye; durante la noche y madrugadas existe una predominancia del material particulado fino respecto el grueso por lo que la relación aumenta. Esto es debido posiblemente a la mayor influencia de las fuentes de combustión industriales a estas horas y un posible efecto de las condiciones atmosféricas como la temperatura del aire y la velocidad de viento. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

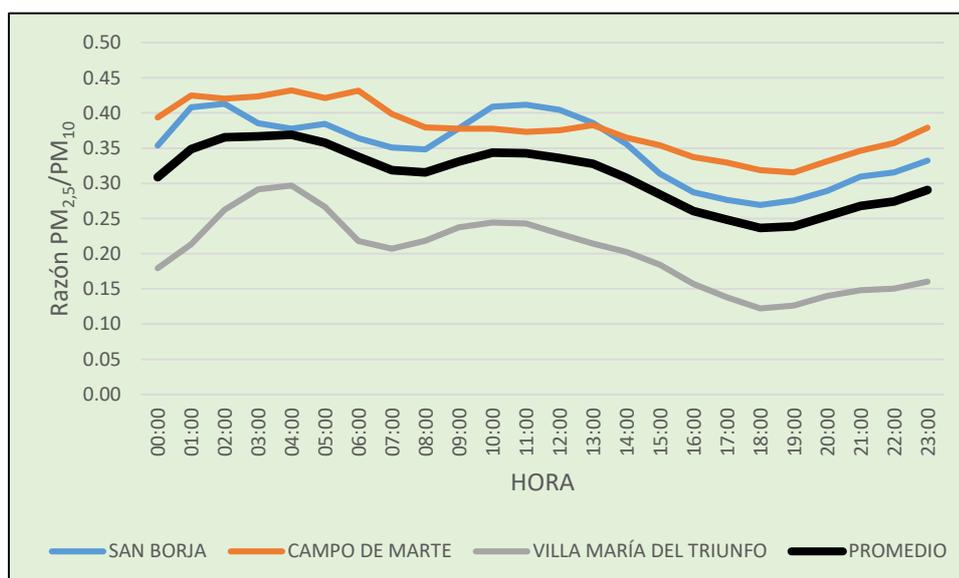


Figura 42. Variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Centro y Sur de Lima. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 42 la variación horaria multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de la Zona Centro y Sur de Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017. La variación horaria se caracteriza por presentar una cresta a las 04:00 a.m. (0.37) y un valle a las 06:00 p.m. (0.24). Los mayores valores se registraron en la estación Campo de Marte y los menores valores se registraron en la estación Villa María del Triunfo. Además, se

evidencia que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye durante el día y aumenta en las noches y madrugadas.

Durante el día existe una predominancia del material particulado grueso respecto al fino por lo que la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye; durante la noche y madrugadas existe una predominancia del material particulado fino respecto al grueso por lo que la relación aumenta. Esto es debido posiblemente a la mayor influencia de las fuentes de combustión industriales a estas horas y un posible efecto de las condiciones atmosféricas como la temperatura del aire y la velocidad de viento. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

El análisis de regresión y el análisis de correlación entre el PM_{10} y $PM_{2,5}$ de los datos horarios muestran una moderada, significativa y positiva correlación lineal entre PM_{10} y $PM_{2,5}$ en las estaciones estudiadas, aunque en las estaciones Villa María del Triunfo, San Borja y Puente Piedra la correlación es más débil que del resto.

El coeficiente de Pearson obtenido para las estaciones Santa Anita y Campo de Marte fue mayor a 0.80; San Martín de Porres, Carabayllo, Huachipa y Ate mayor a 0.7; mientras que San Juan de Lurigancho, Villa María del Triunfo, San Borja y Puente Piedra mayor a 0.5. La covarianza fue positiva en todos los casos. El intervalo de confianza observado en la correlación entre el PM_{10} y $PM_{2,5}$ nunca fue menor al 99 por ciento en ninguna estación, todo lo cual nos lleva a confirmar la existencia de una correlación lineal. En todos los análisis se tomó como variable dependiente $PM_{2,5}$ y variable independiente PM_{10} . Los resultados se muestran en el Tabla 16.

Los valores obtenidos para la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en las diferentes estaciones concuerdan adecuadamente con lo encontrado por otros investigadores en otras ciudades como se muestra en el Tabla 10, excepto en las estaciones Villa María del Triunfo, Puente Piedra y Huachipa donde la relación es muy baja. Es decir, el material particulado fino (menor a 2.5 micras) se encuentra en menor proporción en la fracción menor a 10 micras. Una relación superior a 0.60 sería esperable bajo la influencia directa de fuentes de combustión, mientras

que se esperaría una relación inferior a 0.30 bajo la influencia directa de polvo resuspendido o erosión. (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

Tabla 16. Correlación entre el PM₁₀ y PM_{2,5} para las diez estaciones de monitoreo del SENAMHI.

Zona	Estación de monitoreo	Ecuación de regresión	Coefficiente de determinación	Relación PM _{2,5} /PM ₁₀	Coefficiente de Pearson	Intervalo de confianza
	Puente Piedra	$y = 0.1318x + 15.87$	$R^2 = 0.257$	0.278	0.507	99%
Norte	Carabayllo	$y = 0.1862x + 11.059$	$R^2 = 0.504$	0.329	0.710	99%
	San Martín de Porres	$y = 0.2347x + 5.9145$	$R^2 = 0.533$	0.368	0.730	99%
	San Juan de Lurigancho	$y = 0.3047x + 3.694$	$R^2 = 0.487$	0.350	0.698	99%
	Huachipa	$y = 0.3787x - 8.469$	$R^2 = 0.502$	0.289	0.708	99%
Este	Santa Anita	$y = 0.4138x - 0.8804$	$R^2 = 0.695$	0.402	0.834	99%
	Ate	$y = 0.3796x - 2.5143$	$R^2 = 0.491$	0.356	0.700	99%
Sur	Villa María del Triunfo	$y = 0.09151x + 13.01$	$R^2 = 0.299$	0.202	0.547	99%
	Campo de Marte	$y = 0.2622x + 4.2597$	$R^2 = 0.653$	0.377	0.808	99%
Centro	San Borja	$y = 0.1769x + 8.9315$	$R^2 = 0.262$	0.350	0.512	99%

4.3.2 Variación diaria de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana

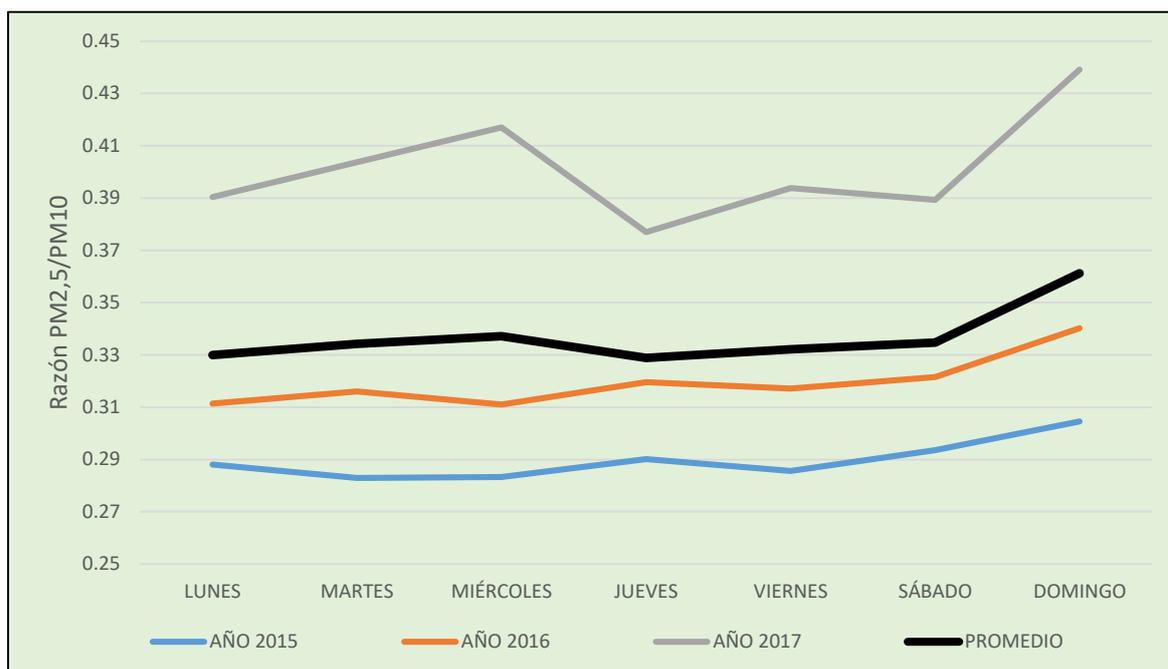


Figura 43. Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Norte de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 43 se muestra la variación diaria semanal de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la Zona Norte de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ del año 2017 son mayores que del promedio; los mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ se dan los días domingo y los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017.

Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Norte que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mayores valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, permitiendo el aumento del material particulado fino respecto el grueso. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

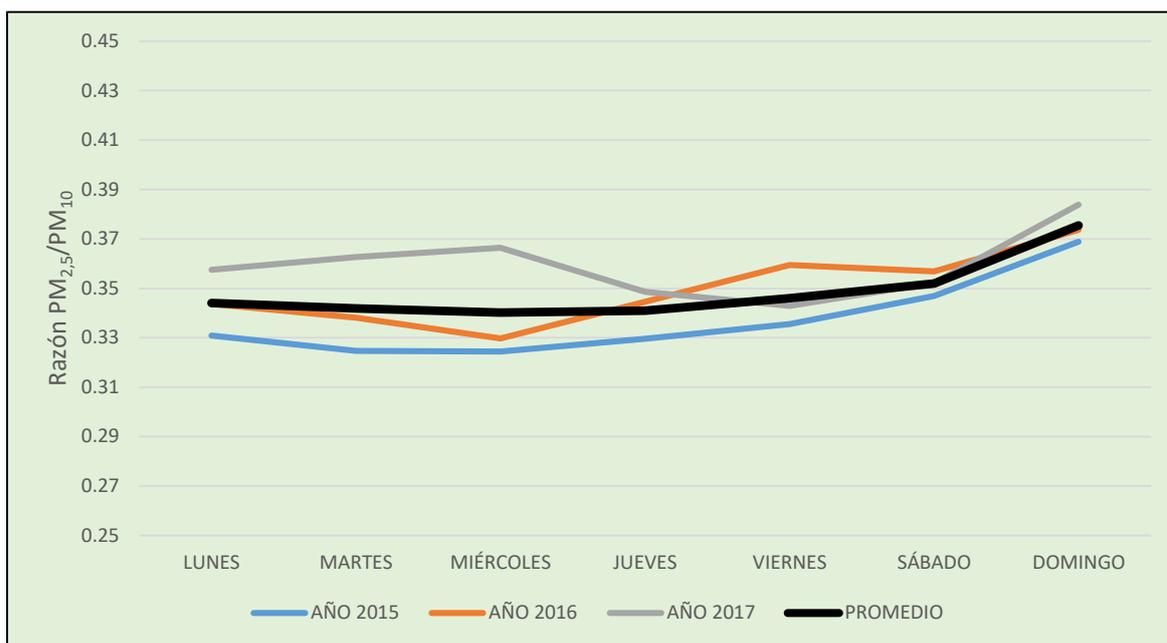


Figura 44. Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Este de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 44 se muestra la variación diaria semanal de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la Zona Este de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ del año 2017 son mayores que del promedio; los mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ se dan los días domingo y los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017.

Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Este que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mayores valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, permitiendo el aumento del material particulado fino respecto el grueso. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

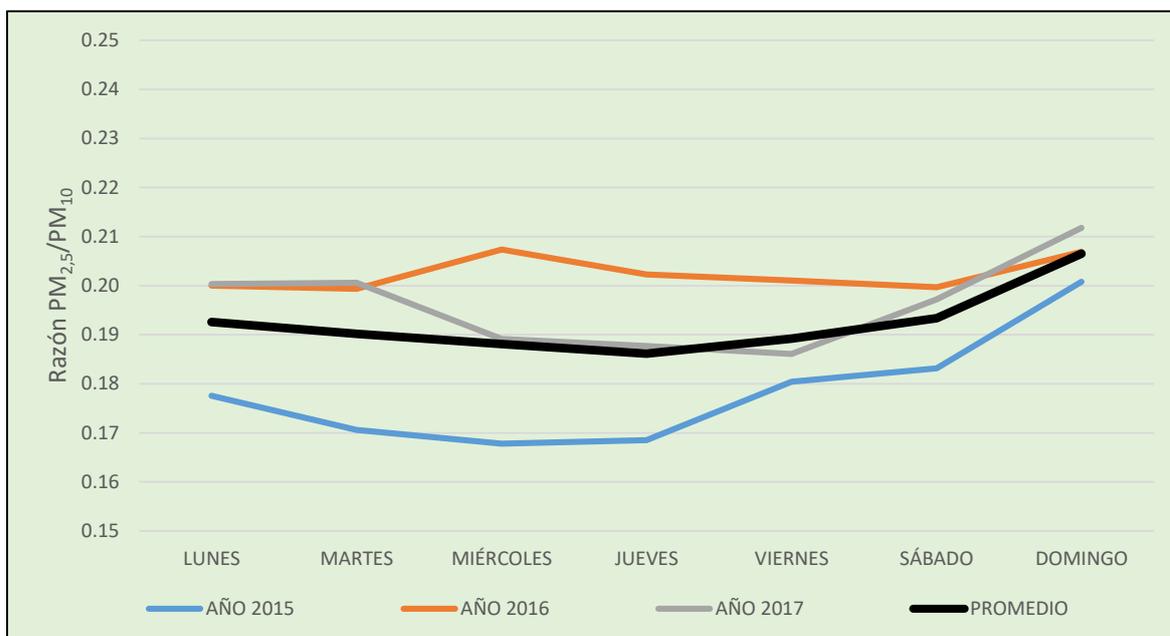


Figura 45. Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en la Zona Sur de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 45 se muestra la variación diaria semanal de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la Zona Sur de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ de los años 2016 y 2017 son mayores que del promedio; los mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ se dan los días domingo y los valores del año 2015 son menores al promedio del periodo 2015-2017.

Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Sur que ha ido incrementándose respecto este año de estudio. En todos los años los mayores valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, permitiendo el aumento del material particulado fino respecto el grueso. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

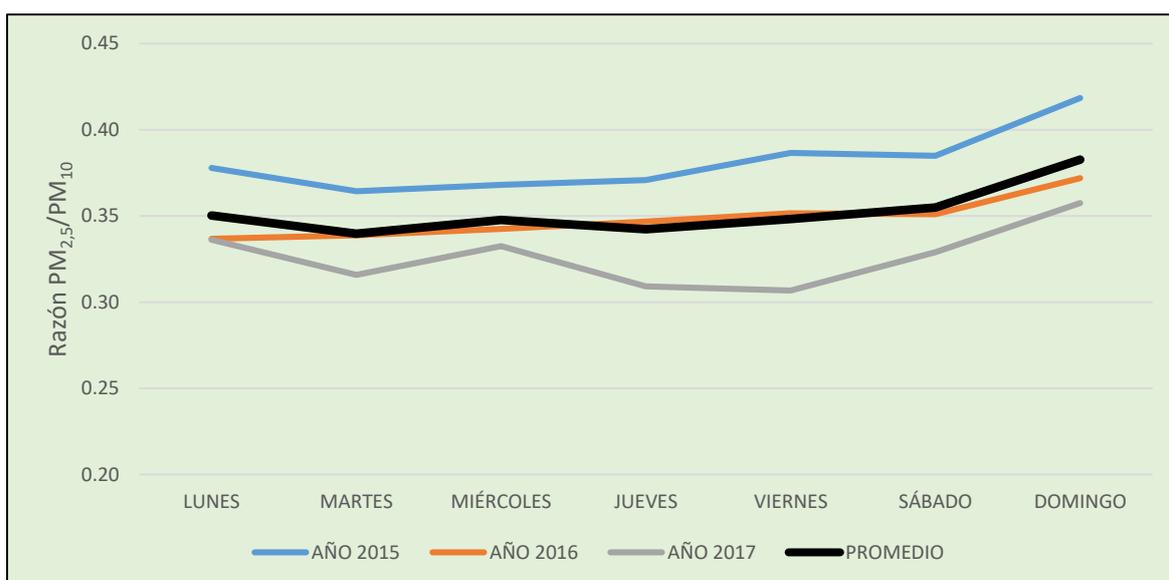


Figura 46. Variación diaria y semanal promedio de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ en la Zona Centro de Lima. Periodo 2015-2017.

En la Figura 46 se muestra la variación diaria semanal de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ para la Zona Centro de Lima Metropolitana para los años 2015, 2016 y 2017, y sus valores promediados para el periodo 2015-2017. Se observa que los valores de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ del año 2015 son mayores que del promedio; los mayores valores de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ se dan los días domingo y los valores del año 2017 son menores al promedio del periodo 2015-2017.

Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población ubicadas en la Zona Centro que ha ido disminuyendo progresivamente la proporción del material particulado fino respecto el grueso. En todos los años los mayores valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo del transporte vehicular, permitiendo el aumento del material particulado fino respecto el grueso. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004).

4.3.3 Variación mensual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana

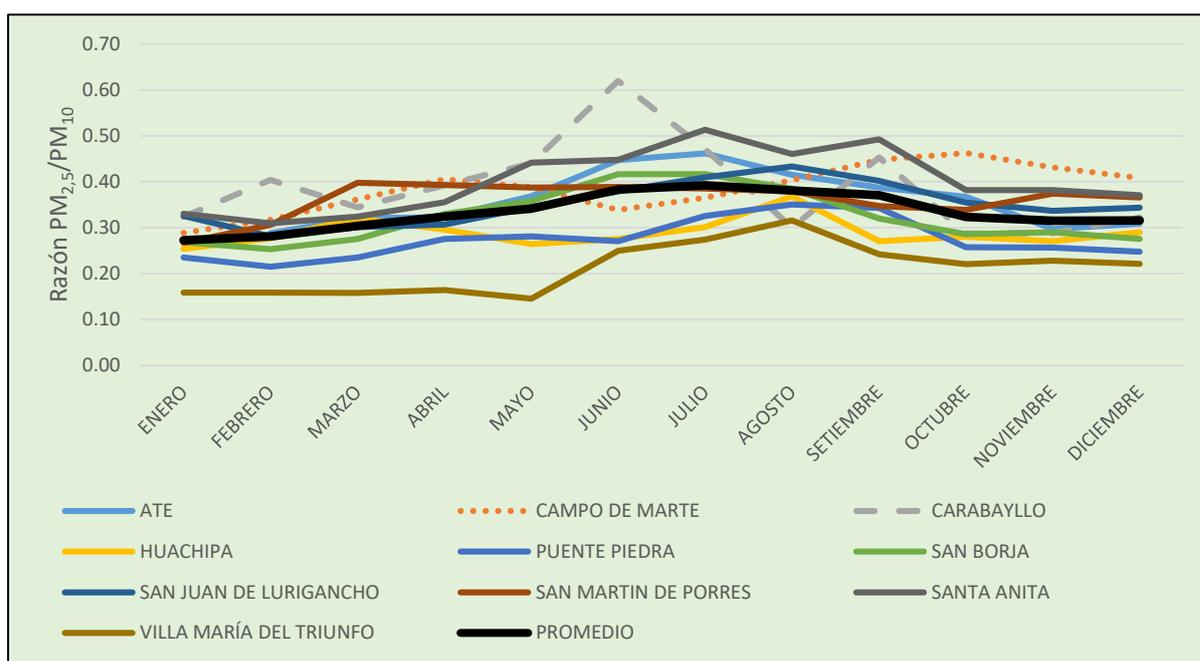


Figura 47. Variación mensual multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de la red de monitoreo de Lima Metropolitana del SENAMHI. Periodo 2015-2017.

En la Figura 47 se muestra la variación mensual multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo 2015-2017). Las evaluaciones se han realizado en base a datos promedios mensuales generados a partir de la información proporcionada por el SENAMHI.

Se observa que, para todas las estaciones de Lima Metropolitana, presentan los mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ durante los meses de invierno (junio, julio y agosto), con valores que oscilan entre 0.25 - 0.62. Estos resultados se asocian a las condiciones de estabilidad de la atmosfera que caracteriza a estos meses, las cuales incrementan la concentración del $PM_{2,5}$ respecto el PM_{10} (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016). Las estaciones Santa Anita (Zona Este de Lima Metropolitana), Carabayllo (Zona Norte de Lima Metropolitana) y Campo de Marte (Zona Centro de Lima Metropolitana) presentan los mayores valores, los cuales posiblemente estén relacionados con el mayor aporte de $PM_{2,5}$ procedente tanto del parque automotor y el industrial de Lima (Pacsi, 2016; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

Los mínimos valores se registran durante los meses del verano austral en las estaciones Villa María del Triunfo (Zona Sur de Lima Metropolitana), Puente Piedra (Zona Norte de Lima Metropolitana) y Huachipa (Zona Este de Lima Metropolitana), con valores que oscilan entre los 0.16 - 0.3. En general en estas tres estaciones se registran los mínimos valores durante todo el año, que podrían estar asociados a la falta de pavimentación de sus vías los cuales incrementan el material particulado grueso respecto el material particulado fino (Galvis y Rojas, 2006; Querol et al. 2004; Sánchez-Ccoyllo et al., 2016).

4.3.4 Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para distritos representativos de Lima Metropolitana

En la Figura 48 se muestra la variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación de calidad del aire Puente Piedra. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ son mayores en los meses de invierno, disminuyendo sus valores hasta los meses de verano donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y temperaturas; disminuyendo la cantidad de material particulado fino, respecto el grueso en temporada de estabilidad atmosférica. (Galvis y Rojas, 2006; Pacsi, 2016).

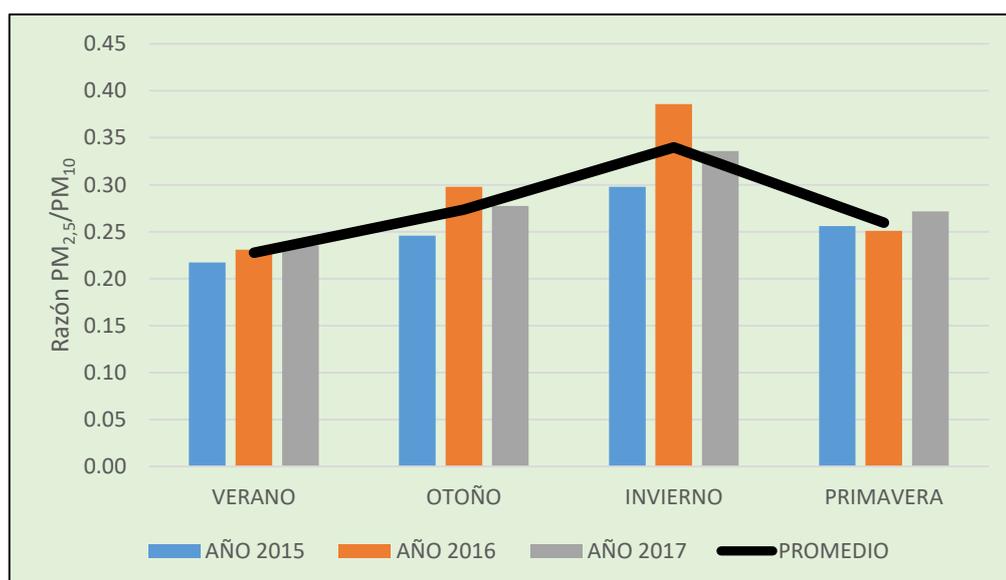


Figura 48. Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Puente Piedra. Periodo 2015-2017.

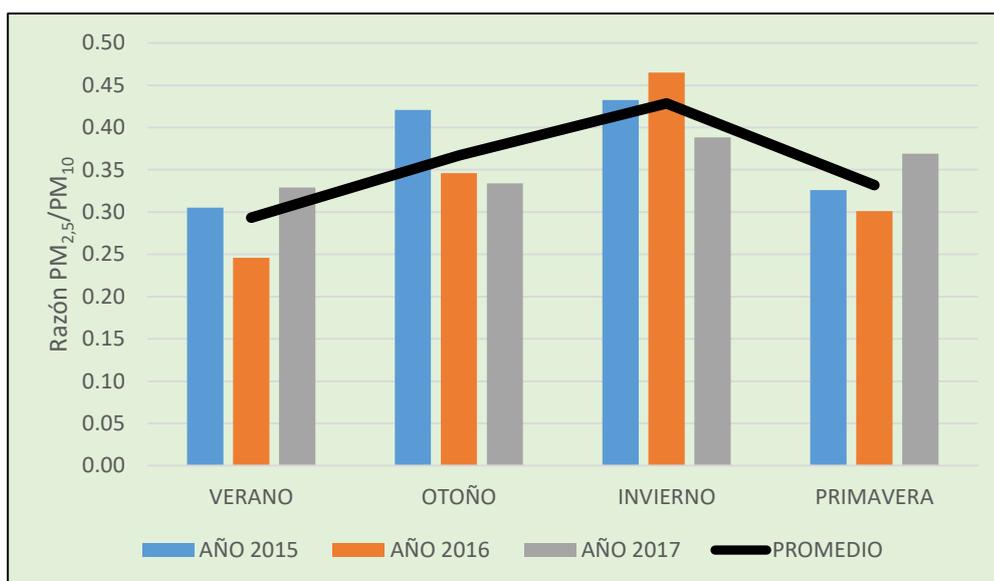


Figura 49. Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Ate. Periodo 2015-2017.

En la Figura 49 se muestra la variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación de calidad del aire Ate. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ son mayores en los meses de invierno, disminuyendo sus valores hasta los meses de verano donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y temperaturas; disminuyendo la cantidad de material particulado fino, respecto el grueso en temporada de estabilidad atmosférica. (Galvis y Rojas, 2006; Pacsi, 2016).

En la Figura 50 se muestra la variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación de calidad del aire Villa María del Triunfo. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ son mayores en los meses de invierno, disminuyendo sus valores hasta los meses de verano donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y temperaturas; disminuyendo la cantidad de material particulado fino, respecto el grueso en temporada de estabilidad atmosférica. (Galvis y Rojas, 2006; Pacsi, 2016).

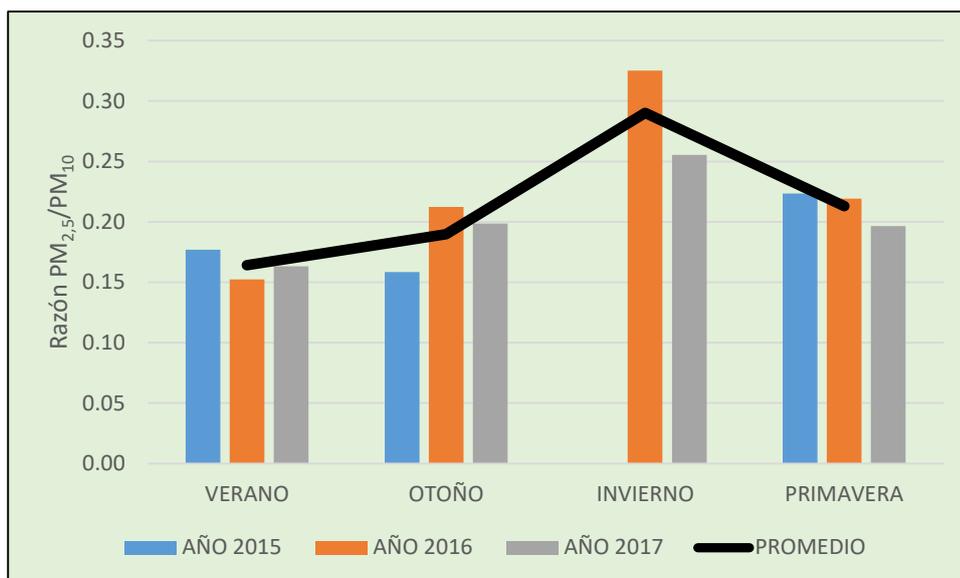


Figura 50. Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Villa María del Triunfo. Periodo 2015-2017.

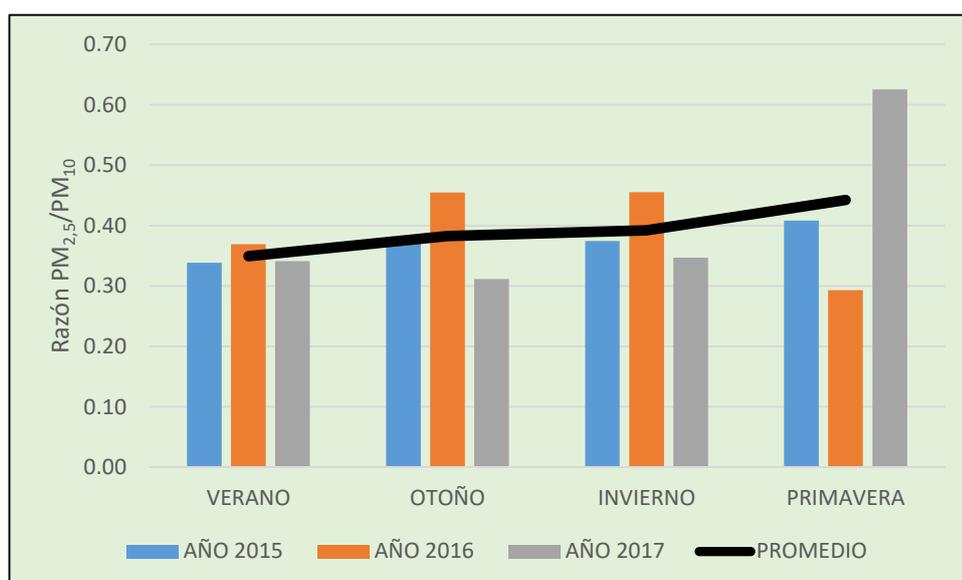


Figura 51. Variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

En la Figura 51 se muestra la variación estacional de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para la estación de calidad del aire Campo de Marte. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ son mayores en los meses de primavera e invierno, disminuyendo sus valores hasta los meses de verano donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las

condiciones de humedad ambiental que predominan en este distrito (baja humedad en verano y alta en invierno) y temperaturas; disminuyendo la cantidad de material particulado fino, respecto el grueso en temporada de estabilidad atmosférica. (Galvis y Rojas, 2006; Pacsi, 2016).

4.3.5 Variación multianual y tendencias de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana

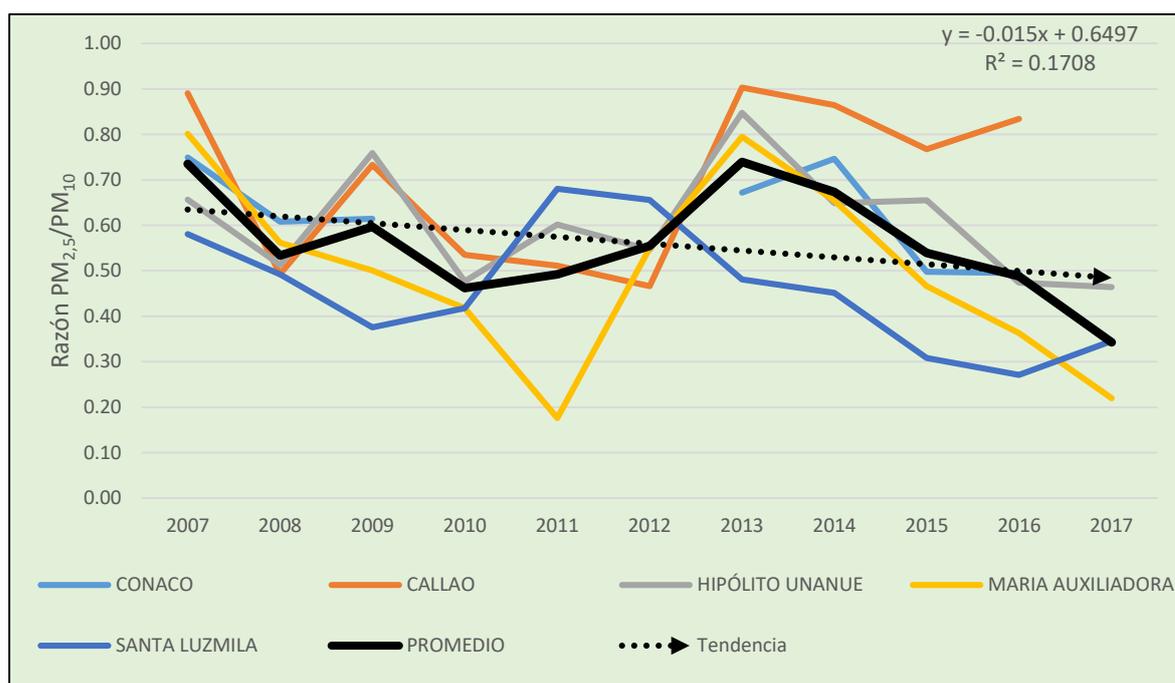


Figura 52. Variación del promedio anual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para las estaciones de Lima Metropolitana, según las estaciones de la DIGESA. Periodo 2007-2017.

En la Figura 52 se muestra la variación temporal del promedio multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para cinco estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana, operadas por la DIGESA (periodo 2007-2017). Se incluye además la evaluación de la tendencia de la serie histórica promedio de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ de toda la red de monitoreo. Se observa que los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ promedio anual de las estaciones de monitoreo, han ido aumentando hasta alcanzar un pico en el año 2013 (0.74) y a partir de este ha ido disminuyendo progresivamente.

La estación con mayor valor de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ es Callao y las de menores valores en promedio son Santa Luzmila (Zona Norte) y María Auxiliadora (Zona Sur). Esta condición se asocia a las altas emisiones vehiculares y polvo atmosférico natural del entorno de las estaciones de monitoreo. La estación Callao presenta los mínimos valores de PM_{10} durante todos los años y nunca supera el ECA nacional, debido a que se asocia a una mayor dispersión de los contaminantes por el viento en la zona (Pacsi, 2016), por lo que se ve reflejado en el aumento de la proporción de $PM_{2,5}/PM_{10}$.

El análisis de tendencias de la serie histórica muestra que existe una disminución débil (coeficiente de determinación de 0.171) de los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en casi todas las estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio. Esta disminución se explica por la implementación progresiva de medidas de control y gestión de calidad del aire por las distintas entidades gubernamentales en los últimos ocho años: fomento al cambio de matriz energética a GNV y GLP del parque automotor de Lima, la implementación del Gasohol y la implementación de corredores viales y el tren eléctrico (Pacsi, 2016); los cuales han disminuido la cantidad de material particulado fino respecto al grueso. Una relación superior a 0.60 sería esperable bajo la influencia directa de fuentes de combustión, mientras que se esperaría una relación inferior a 0.30 bajo la influencia directa de polvo resuspendido o erosión (Querol et al. 2004).

4.4 Evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y vientos en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017.

Las estadísticas descriptivas de la temperatura del aire y la velocidad del viento para las cinco estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI se presentan en el Tabla 17. Se observa que en promedio los mayores valores de temperatura del aire se dan en la estación Antonio Raimondi y los menores en la estación Alexander Von Humboldt. Mientras que en promedio las mayores velocidades del viento también se registran en la estación Antonio Raimondi y las menores en la estación San Borja.

Tabla 17. Estadísticas descriptivas de la temperatura del aire y la velocidad del viento en las cinco estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI.

Estación de monitoreo	Temperatura del aire (°C)				Velocidad del viento (m/s)			
	Media	Desviación Estándar	Min	Max	Media	Desviación Estándar	Min	Max
Antonio Raimondi	21.2	3.4	12.5	32.4	4.3	2.8	0.1	16.8
Carabayllo	20.8	4.4	11.4	33.2	2.2	2.4	0.0	11.3
Alexander Von Humboldt	19.8	3.4	10.4	31.2	2.2	2.3	0.0	11.2
Campo de Marte	19.9	3.3	14.0	31.5	2.1	1.3	0.0	12.8
San Borja	20.2	4.0	14.0	33.2	1.4	0.7	0.0	4.9

4.4.1 Relación horaria de temperatura del aire, velocidad del viento, PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana.

Se observa en la Figura 53 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (21.9 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (18.5 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las temperaturas del aire descienden las concentraciones del material particulado siguen el mismo patrón.

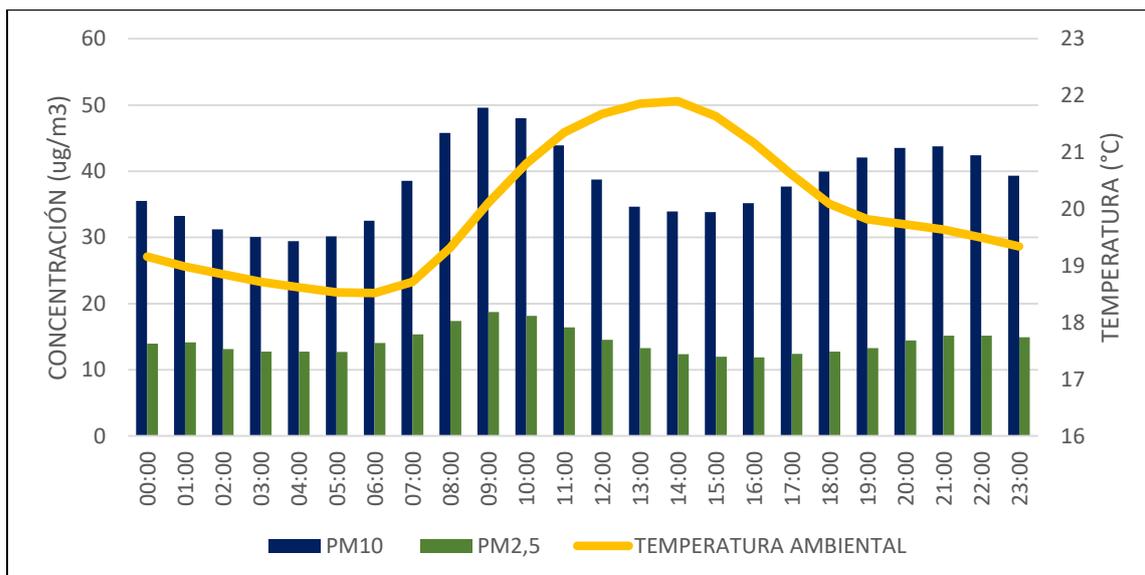


Figura 53. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.41 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.53 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y madrugadas se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.95 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.50 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 18).

Tabla 18. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -5.409x + 153.8$	$y = -2.2855x + 63.175$	$y = 12.36x - 200.54$	$y = 1.4854x - 14.626$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.41$	$R^2 = 0.53$	$R^2 = 0.95$	$R^2 = 0.50$

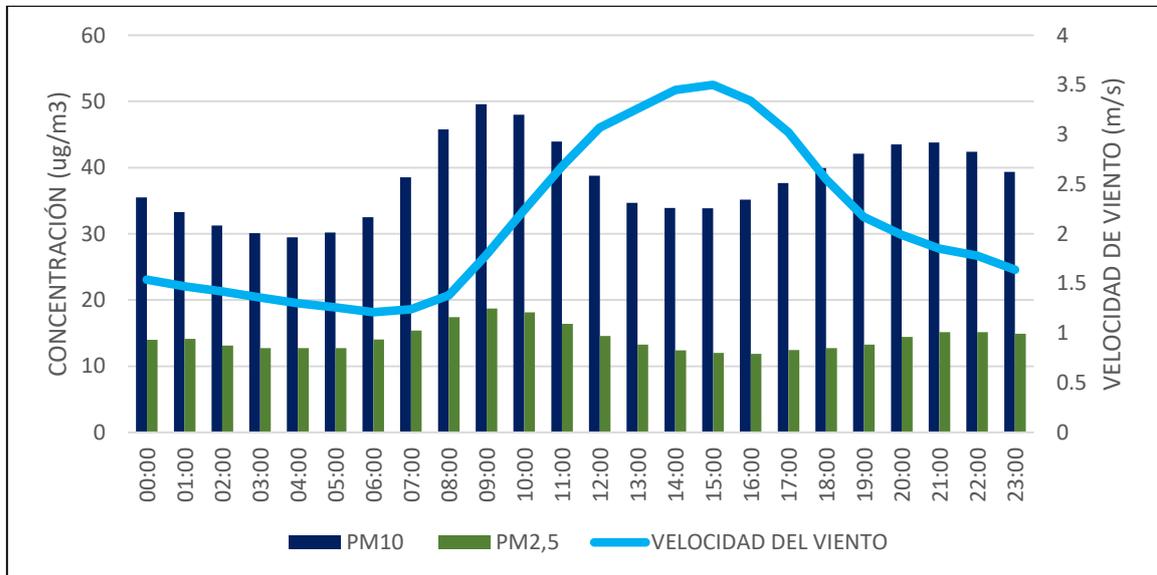


Figura 54. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 54 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Campo de Marte para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 03:00 p.m. (3.5 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un

mínimo a las 06:00 a.m. (1.21 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones del material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.82 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.42 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.85 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.29 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 19).

Tabla 19. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del Viento para la estación Campo de Marte.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -7.4822x + 60.717$	$y = -1.8208x + 19.146$	$y = 18.227x + 6.9823$	$y = 1.7696x + 10.992$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.82$	$R^2 = 0.42$	$R^2 = 0.85$	$R^2 = 0.29$

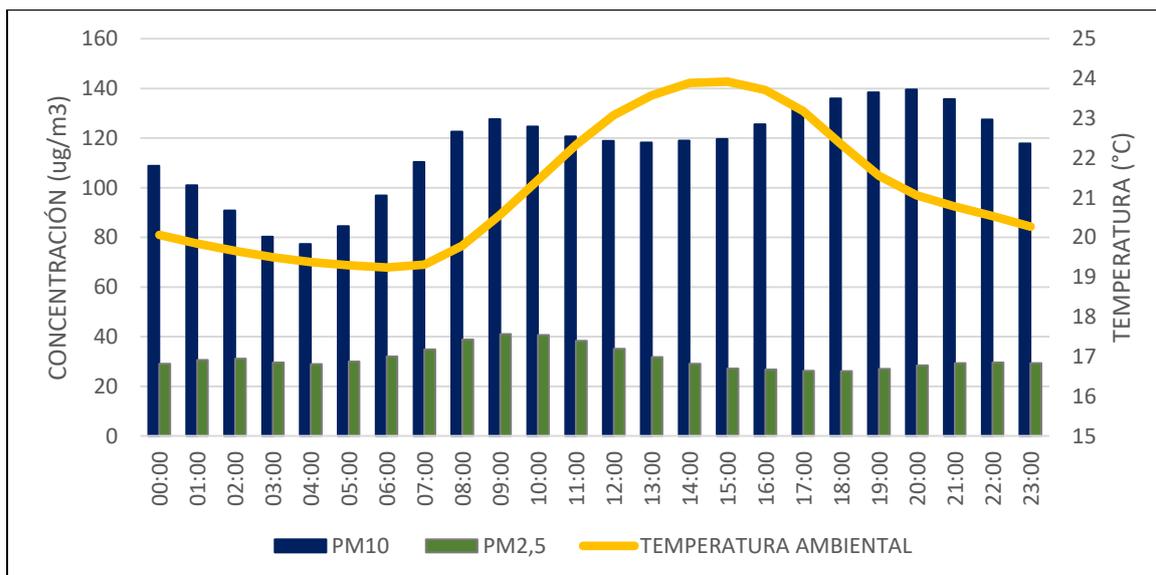


Figura 55. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 55 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi) para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 03:00 p.m. (23.9 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (19.2 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las temperaturas del aire descienden las concentraciones del material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura del aire favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.49 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.54 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el

periodo nocturno y madrugadas, se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.92 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}, debido a que el descenso de la temperatura del aire genera estabilidad atmosférica. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.50 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 20).

Tabla 20. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -2.024x + 167.99$	$y = -2.2508x + 84.277$	$y = 31.25x - 521.26$	$y = -1.0505x + 50.592$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.49$	$R^2 = 0.54$	$R^2 = 0.92$	$R^2 = 0.50$

Se observa en la Figura 56 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del viento (estación Antonio Raimondi) para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (5.7 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 00:00 a.m. (3.53 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

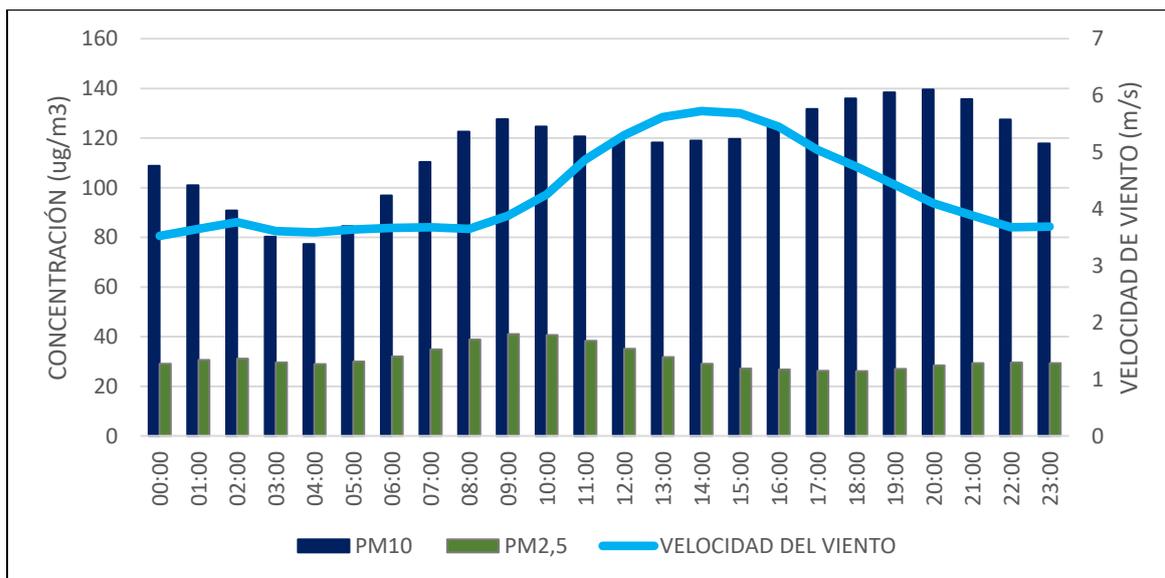


Figura 56. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.58 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.55 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del viento y el PM₁₀, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.48 entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}, debido a que la disminución de la velocidad del viento minimiza la dispersión del material particulado fino. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.47 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 21).

Tabla 21. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -3.9519x + 141.96$	$y = -5.1373x + 58.486$	$y = 62.334x - 126.33$	$y = -2.7907x + 39.945$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.58$	$R^2 = 0.55$	$R^2 = 0.48$	$R^2 = 0.47$

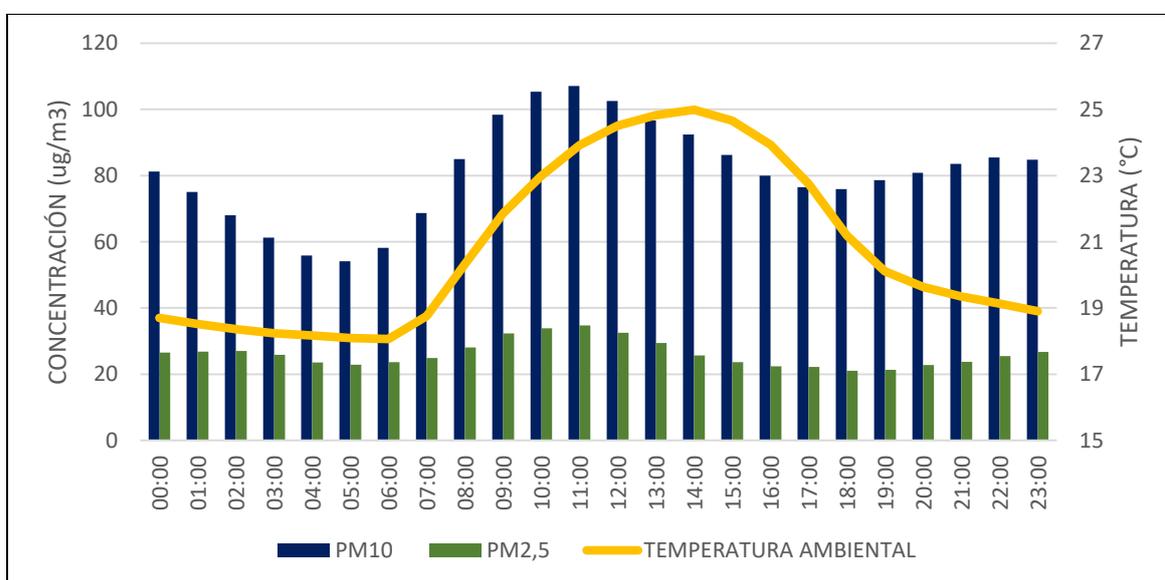


Figura 57. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 57 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Carabayllo para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (25.0 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (18.1 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado

disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las temperaturas del aire descienden las concentraciones del material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura va de la mano con el incremento de las emisiones del material particulado grueso. Esta correlación positiva es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.51 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀. Sin embargo, existe una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado fino, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.49 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y madrugadas, se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.53 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}, debido a que el descenso de la temperatura genera estabilidad atmosférica. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.84 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 22).

Tabla 22. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Carabayllo.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = 4.5734x - 15.838$	$y = -4.2763x + 133.95$	$y = 13.051x - 172.31$	$y = -3.0406x + 82.89$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.51$	$R^2 = 0.49$	$R^2 = 0.53$	$R^2 = 0.84$

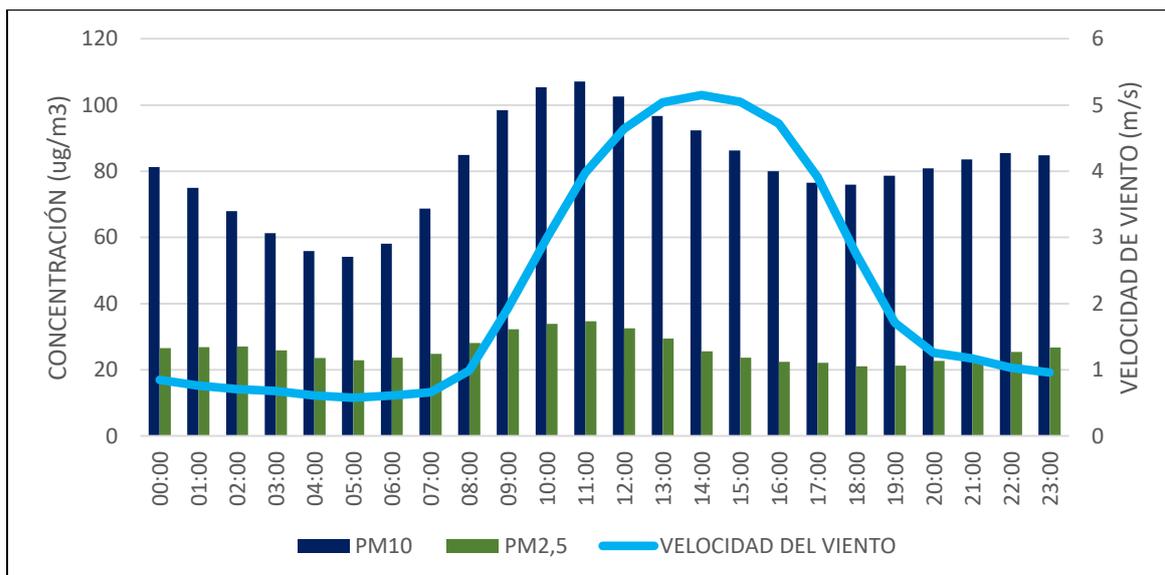


Figura 58. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 58 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Carabayllo para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (5.2 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 05:00 a.m. (0.6 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.57 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.39 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del

viento y el PM₁₀, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.43 entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}, debido a que la disminución de la velocidad del viento minimiza la dispersión del material particulado fino. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.30 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 23).

Tabla 23. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del Viento para la estación Carabaylo.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -7.2536x + 130.86$	$y = -2.1461x + 39.121$	$y = 22.659x + 52.283$	$y = -3.219x + 27.806$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.57$	$R^2 = 0.39$	$R^2 = 0.43$	$R^2 = 0.30$

Se observa en la Figura 59 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación San Borja para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 03:00 p.m. (23.1 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (18.2 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las temperaturas del aire descienden las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

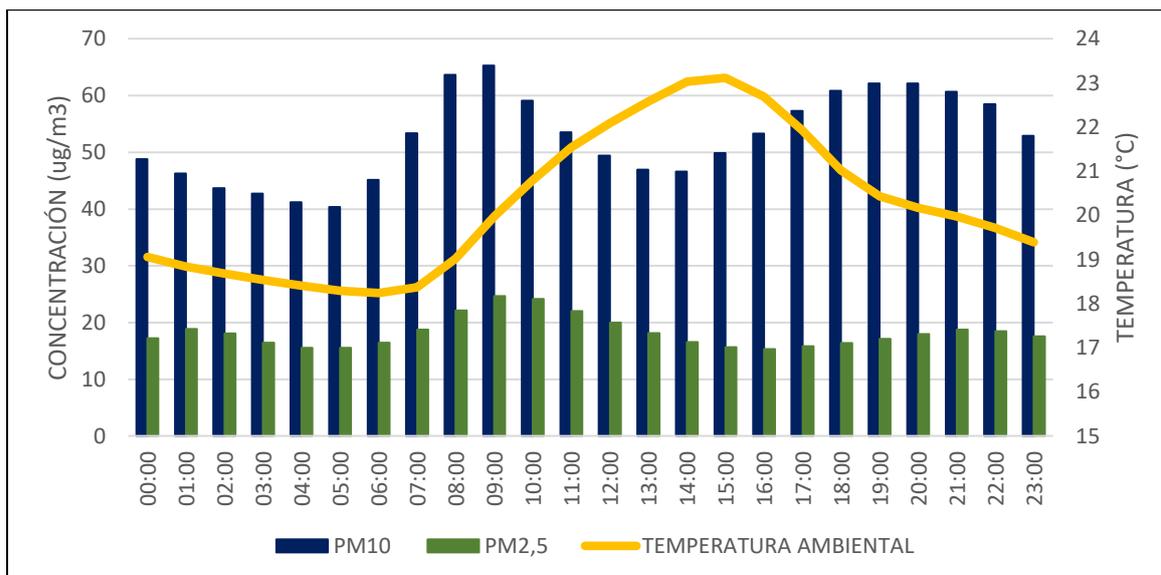


Figura 59. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación San Borja. Periodo 2015-2017.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura del aire favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.46 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.36 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y madrugadas se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.98 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.29 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 24).

Tabla 24. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación San Borja.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -2.625x + 110.52$	$y = -1.2692x + 46.524$	$y = 11.469x - 169.66$	$y = 0.8371x + 1.3341$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.46$	$R^2 = 0.36$	$R^2 = 0.98$	$R^2 = 0.29$

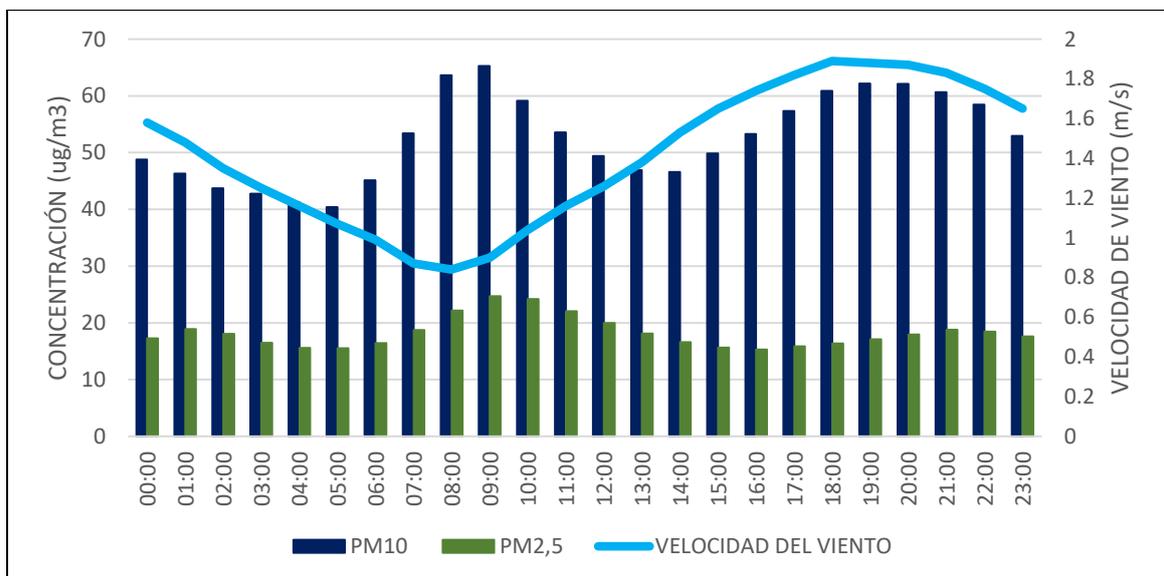


Figura 60. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad de Viento para la estación San Borja. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 60 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación San Borja para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 06:00 p.m. (1.9 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 08:00 a.m. (0.8 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las

velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.49 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.54 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.94 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.47 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 25).

Tabla 25. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del Viento para la estación San Borja.

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -13.987x + 71.412$	$y = -6.4683x + 27.429$	$y = 28.906x + 6.5294$	$y = 2.7539x + 13.206$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.49$	$R^2 = 0.54$	$R^2 = 0.94$	$R^2 = 0.47$

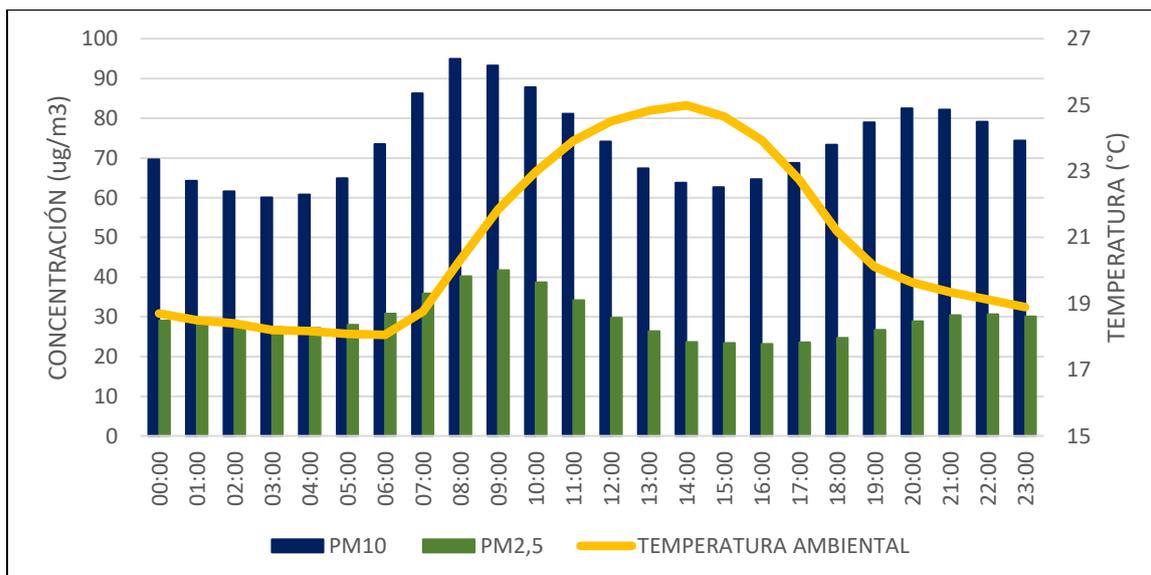


Figura 61. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 61 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (24.8 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (17.9 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las temperaturas del aire descienden las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.68 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.53 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y madrugadas se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el

PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.80 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.67 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 26).

Tabla 26. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -6.8505x + 236.71$	$y = -3.6636x + 116.5$	$y = 12.093x - 157.01$	$y = 2.6974x - 21.397$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.68$	$R^2 = 0.53$	$R^2 = 0.80$	$R^2 = 0.67$

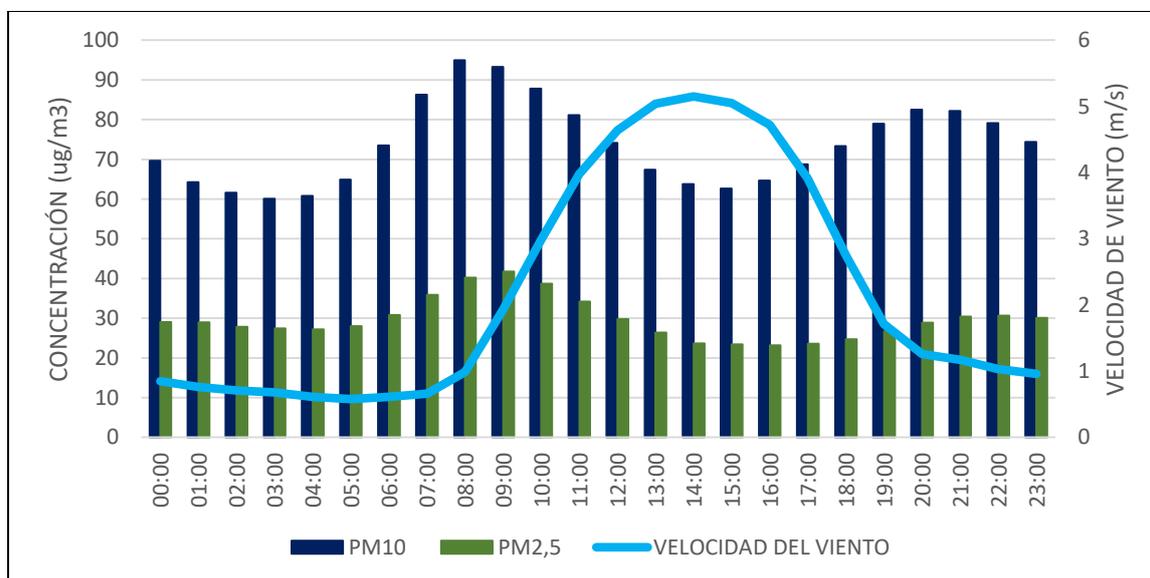


Figura 62. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 62 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-

2017. La variación horaria multianual del PM_{10} y $PM_{2.5}$ ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (5.0 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 05:00 a.m. (0.5 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM_{10} y el $PM_{2.5}$, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM_{10} . Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.53 entre la velocidad del viento y el PM_{10} ; y de 0.45 entre la velocidad del viento y el $PM_{2.5}$. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del viento, el PM_{10} y el $PM_{2.5}$, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.69 entre la velocidad del viento y el PM_{10} ; y de 0.59 entre la velocidad del viento y el $PM_{2.5}$ (Tabla 27).

Tabla 27. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -4.7383x + 91.764$	$y = -2.7063x + 39.309$	$y = 21.709x + 50.403$	$y = 5.9657x + 23.916$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.53$	$R^2 = 0.45$	$R^2 = 0.69$	$R^2 = 0.59$

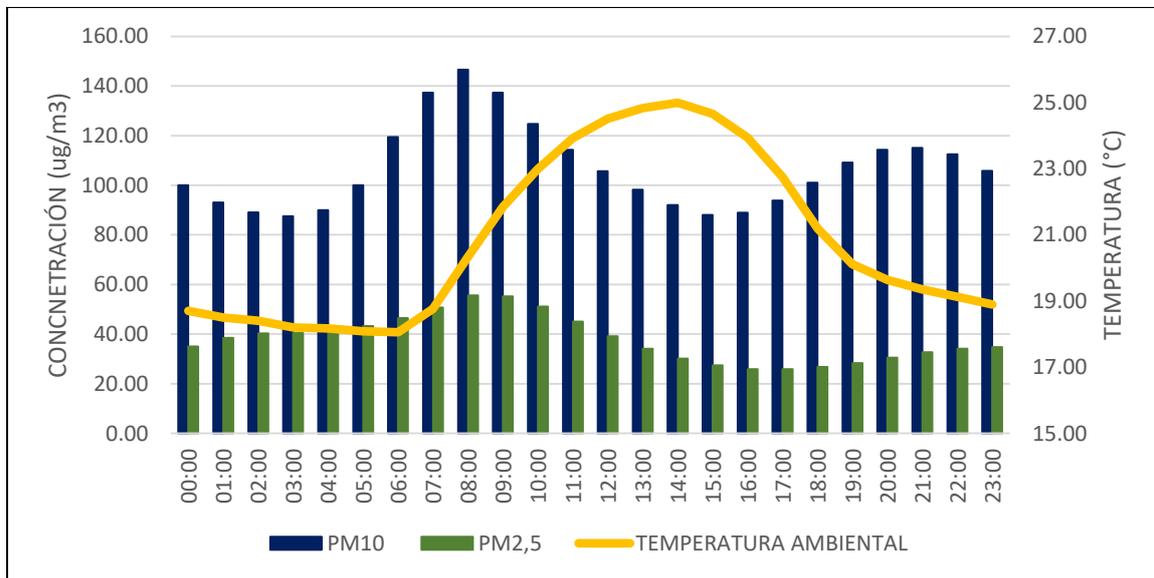


Figura 63. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 63 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (24.8 °C); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 06:00 a.m. (17.9 °C). En el periodo diurno en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y madrugadas a medida que las

temperaturas del aire descienden las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.45 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.28 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y madrugadas, se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.67 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}, debido a que el descenso de la temperatura genera estabilidad atmosférica. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.95 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 28).

Tabla 28. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -5.806x + 242.09$	$y = -2.655x + 99.324$	$y = 12.991x - 143.21$	$y = -7.028x + 168.65$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.45$	$R^2 = 0.28$	$R^2 = 0.67$	$R^2 = 0.95$

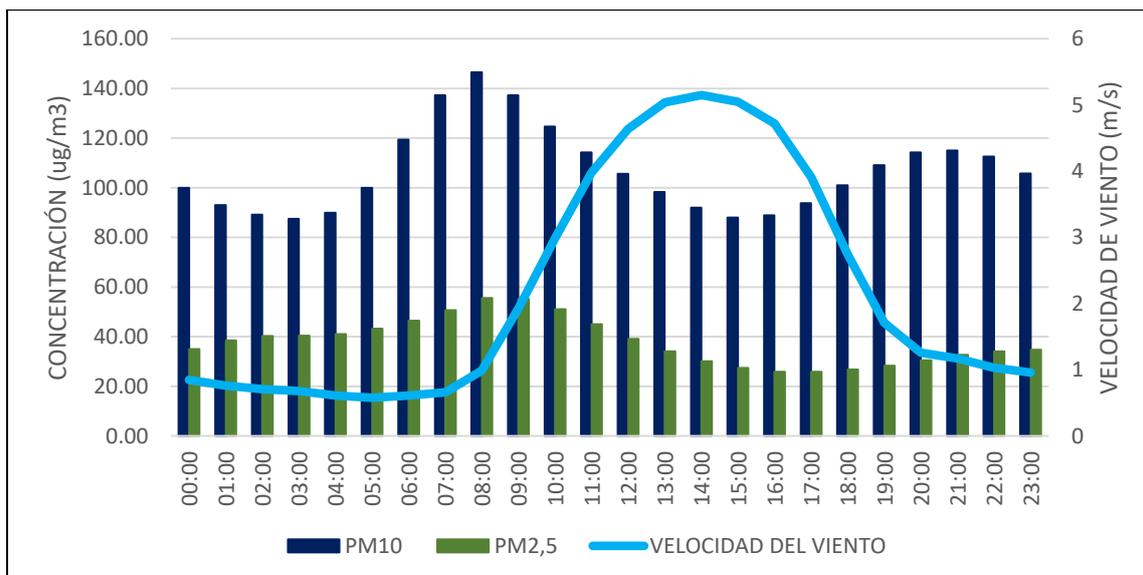


Figura 64. Variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 64 la variación horaria multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación horaria multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación horaria de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante el periodo diurno, alcanzado un máximo valor a las 02:00 p.m. (5.0 m/s); y los menores valores en el periodo nocturno y madrugadas, alcanzando un mínimo a las 05:00 a.m. (0.5 m/s). En el periodo diurno en general, a medida que las velocidades del viento se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen, mientras que en el periodo nocturno y en las madrugadas a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado siguen el mismo patrón.

En el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.71 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.52 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en el periodo nocturno y en las madrugadas se presenta una correlación positiva entre la velocidad del

viento y el PM₁₀, debido a la disminución de la velocidad del viento junto con la menor emisión de material particulado grueso. Esta correlación positiva se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.56 entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Sin embargo, se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}, debido a que la disminución de la velocidad del viento minimiza la dispersión del material particulado fino. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.90 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 29).

Tabla 29. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	Diurno		Nocturno	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -9.8164x + 143.36$	$y = -4.8826x + 55.461$	$y = 23.005x + 79.91$	$y = -13.259x + 48.718$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.71$	$R^2 = 0.52$	$R^2 = 0.56$	$R^2 = 0.90$

4.4.2 Relación mensual de temperatura del aire, velocidad del viento, PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana.

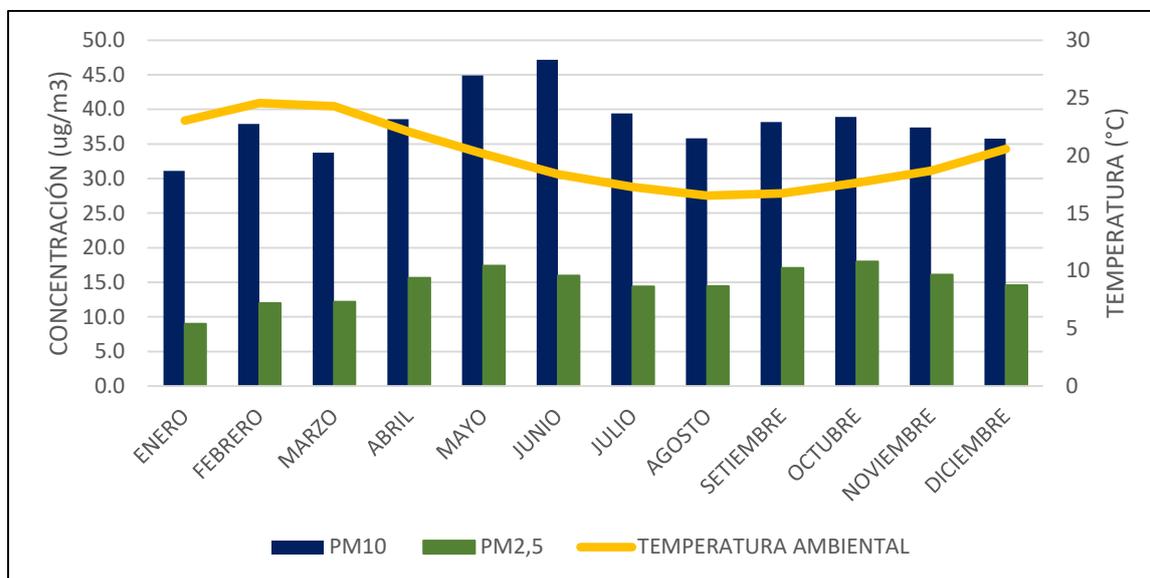


Figura 65. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 65 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de febrero (24.5 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (16.5 °C). A lo largo del año en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen; y viceversa, a medida que las temperaturas del aire disminuyen las concentraciones de material particulado aumentan.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es

corroborada con el coeficiente de determinación de 0.71 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.52 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con el incremento de las concentraciones del material particulado. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.78 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.23 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 30).

Tabla 30. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Campo de Marte.

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -2.1704x + 86.804$	$y = -0.9425x + 34.509$	$y = -0.8323x + 53.053$	$y = -0.4902x + 24.95$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.71$	$R^2 = 0.52$	$R^2 = 0.78$	$R^2 = 0.23$

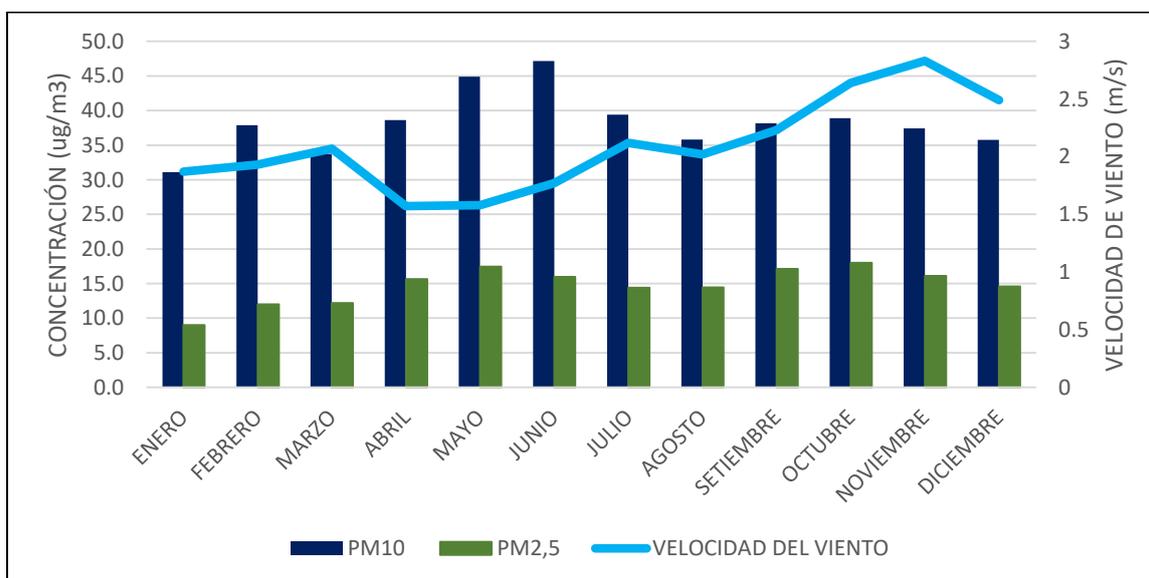


Figura 66. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Campo de Marte. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 66 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Campo de Marte para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los últimos seis meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de noviembre (2.8 m/s); y los menores valores en los seis primeros meses del año, alcanzando un mínimo en el mes de abril (1.6 m/s). En general, a medida que la velocidad del viento se incrementa, las concentraciones de material particulado disminuyen y viceversa, a medida que la velocidad del viento disminuye las concentraciones de material particulado aumentan.

Durante los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.34 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.53 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses no se presenta una correlación clara entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido a una constante fluctuación a lo largo de este último. Esta escasa correlación se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.31 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.26 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 31).

Tabla 31. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Campo de Marte.

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -18.137x + 71.523$	$y = -11.611x + 34.591$	$y = 1.9958x + 32.721$	$y = 2.4855x + 9.8408$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.34$	$R^2 = 0.53$	$R^2 = 0.31$	$R^2 = 0.26$

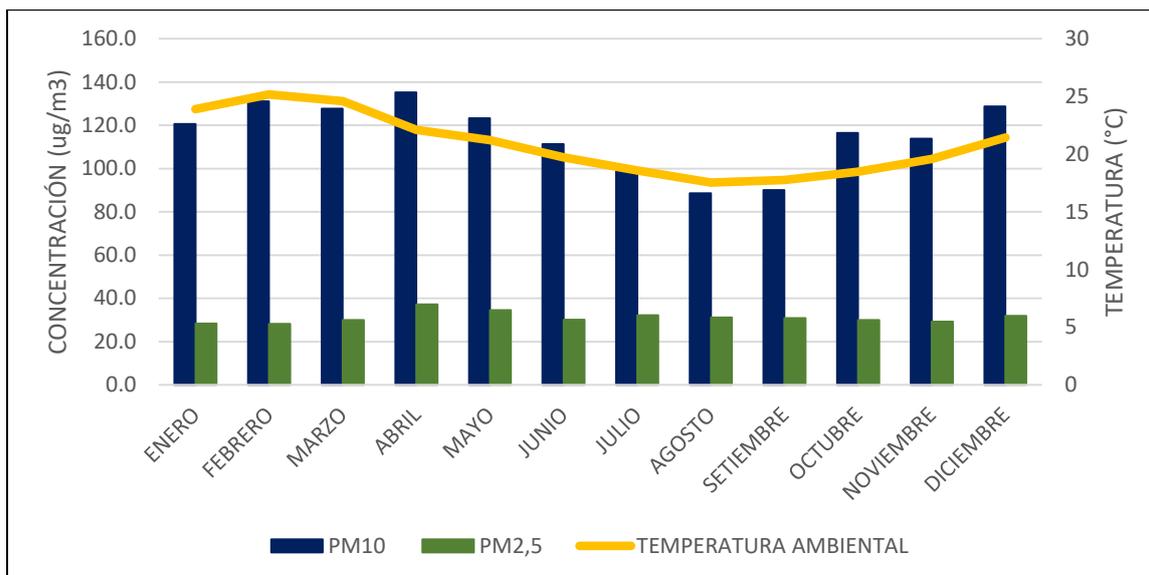


Figura 67. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 67 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de febrero (25.2 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (17.5 °C). A lo largo del año en general, a medida que la temperatura del aire se incrementa, la concentración de material particulado fino disminuye y el grueso aumenta; y viceversa, a medida que la temperatura del aire disminuye la concentración de material particulado fino aumenta y el grueso disminuye.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, y negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}; siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado fino, por lo que disminuye su concentración, mientras el material particulado grueso aumenta su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.75 entre la temperatura ambiental y

el PM_{2,5}; y de 0.47 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀, a través de una correlación positiva. Asimismo, en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5} (principalmente agosto-noviembre), debido al descenso de las temperaturas junto con el incremento de las concentraciones de material particulado fino; y positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.98 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}; y de 0.79 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀, por medio de una correlación positiva (Tabla 32).

Tabla 32. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Temperatura del aire (estación Antonio Raimondi).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = 2.7686x + 63.278$	$y = -2.0875x + 80.555$	$y = 9.907x - 81.093$	$y = -0.9546x + 47.824$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.47$	$R^2 = 0.75$	$R^2 = 0.79$	$R^2 = 0.98$

Se observa en la Figura 68 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del viento (estación Antonio Raimondi) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los últimos seis meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de octubre (6.0 m/s); y los menores valores en los seis primeros meses del año, alcanzando un mínimo en el mes de abril (3.2 m/s). En general, a medida que la velocidad del viento se incrementa, las concentraciones de material particulado disminuyen y viceversa, a medida que la velocidad del viento disminuye las concentraciones de material particulado aumentan.

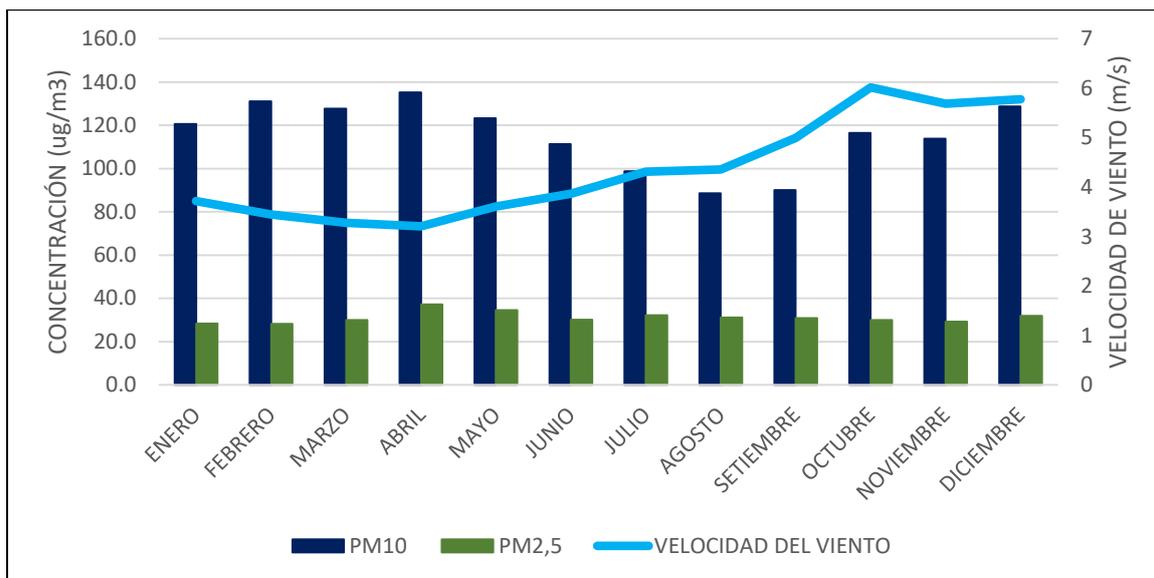


Figura 68. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y Velocidad del Viento (estación Antonio Raimondi). Periodo 2015-2017.

Durante los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.86 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.31 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses se presenta una correlación positiva entre la velocidad del viento y el PM₁₀ y una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}, debido a una influencia distinta en ambos contaminantes. Estas relaciones se ven reflejadas con el coeficiente de determinación de 0.69 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.29 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 33).

Tabla 33. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Puente Piedra) y la Velocidad del viento (estación Antonio Raimondi).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -30.679x + 232.99$	$y = -7.383x + 56.693$	$y = 17.9x + 13.154$	$y = -0.8109x + 35.107$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.86$	$R^2 = 0.31$	$R^2 = 0.69$	$R^2 = 0.29$

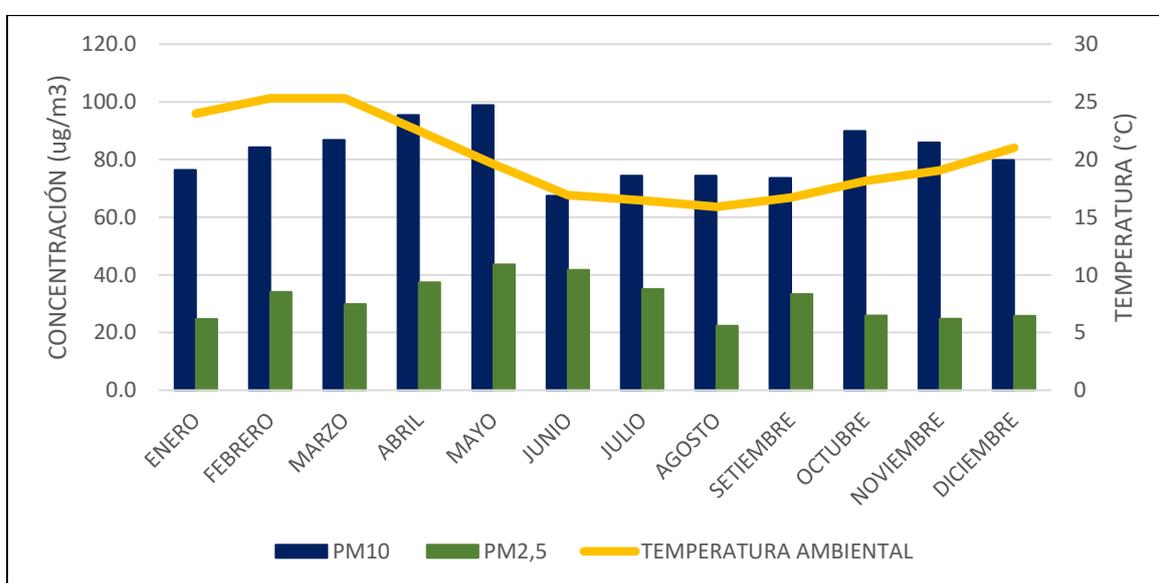


Figura 69. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 69 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Carabayllo para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de febrero (25.3 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (15.9 °C). A lo largo del año en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado

disminuyen; y viceversa, a medida que las temperaturas del aire disminuyen las concentraciones de material particulado aumentan.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.56 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.61 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido al descenso de las temperaturas junto con el incremento de las concentraciones del material particulado. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.99 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀ (octubre-diciembre); y de 0.67 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 34).

Tabla 34. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación Carabayllo.

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -2.8102x + 153.96$	$y = -1.6486x + 71.953$	$y = -3.4416x + 152.03$	$y = -2.1327x + 67.941$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.56$	$R^2 = 0.61$	$R^2 = 0.99$	$R^2 = 0.67$

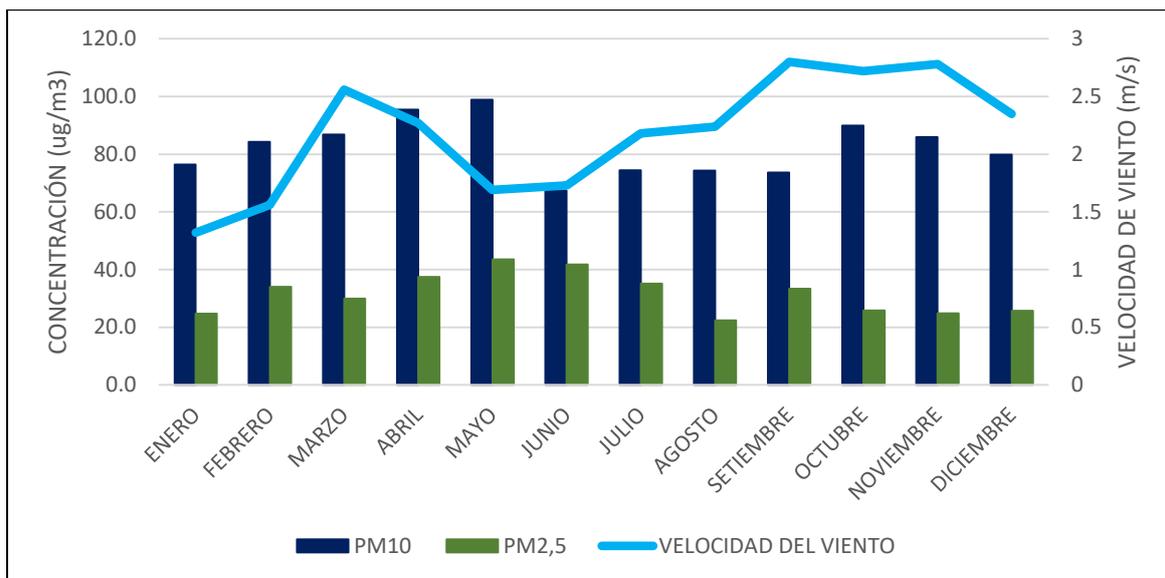


Figura 70. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad del Viento para la estación Carabayllo. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 70 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Carabayllo para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los últimos seis meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de setiembre (2.8 m/s); y los menores valores en los seis primeros meses del año, alcanzando un mínimo en el mes de enero (1.3 m/s). En general, a medida que la velocidad del viento se incrementa, las concentraciones de material particulado disminuyen y viceversa, a medida que la velocidad del viento disminuye las concentraciones de material particulado aumentan.

Durante los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.82 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.93 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento,

el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso. Esta correlación se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.71 entre la velocidad del viento y el PM₁₀ (setiembre-noviembre); y de 0.62 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} (Tabla 35).

Tabla 35. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación Carabayllo.

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -12.794x + 121.53$	$y = -13.824x + 66.675$	$y = -171.73x + 558.26$	$y = -13.098x + 60.708$
Coefficiente de determinación	R ² = 0.82	R ² = 0.93	R ² = 0.71	R ² = 0.62

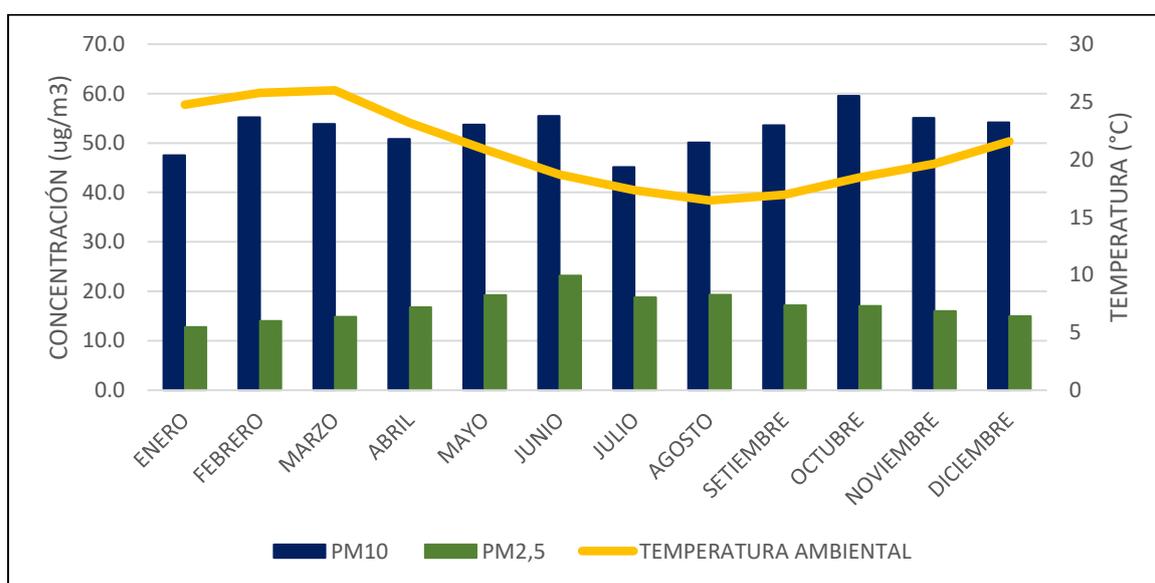


Figura 71. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Temperatura del aire para la estación San Borja. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 71 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación San Borja para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo

de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de marzo (26.0 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (16.4 °C). A lo largo del año en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado disminuyen; y viceversa, a medida que las temperaturas del aire disminuyen las concentraciones de material particulado aumentan.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura favorece la dispersión del material particulado tanto fino como grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.96 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀; y de 0.90 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con el incremento de las concentraciones del material particulado. Esta correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.78 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀ (octubre-diciembre); y de 0.82 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5} (Tabla 36).

Tabla 36. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} y la Temperatura del aire para la estación San Borja.

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -1.2935x + 80.18$	$y = -1.2462x + 45.723$	$y = -1.587x + 87.814$	$y = -0.7728x + 31.418$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.96$	$R^2 = 0.90$	$R^2 = 0.78$	$R^2 = 0.82$

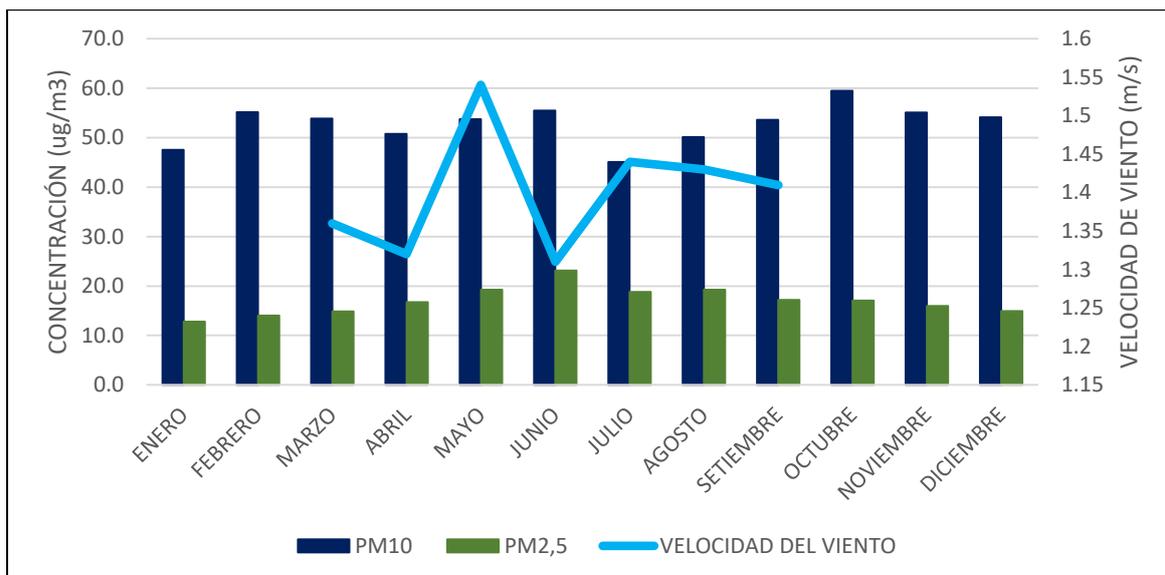


Figura 72. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y Velocidad del Viento para la estación San Borja. Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 72 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} y la Velocidad del viento para la estación San Borja para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se ve limitada debido a la falta de data durante el periodo de evaluación, se toman como valores referenciales su máximo (1.5 m/s) y mínimo (1.3 m/s) valor alcanzado.

Se observa en la Figura 73 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de febrero (25.0 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (15.8 °C). A lo largo del año en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado fino disminuyen y del grueso aumentan; y viceversa, a medida que las temperaturas del aire disminuyen las concentraciones de material particulado fino aumentan y del grueso disminuyen.

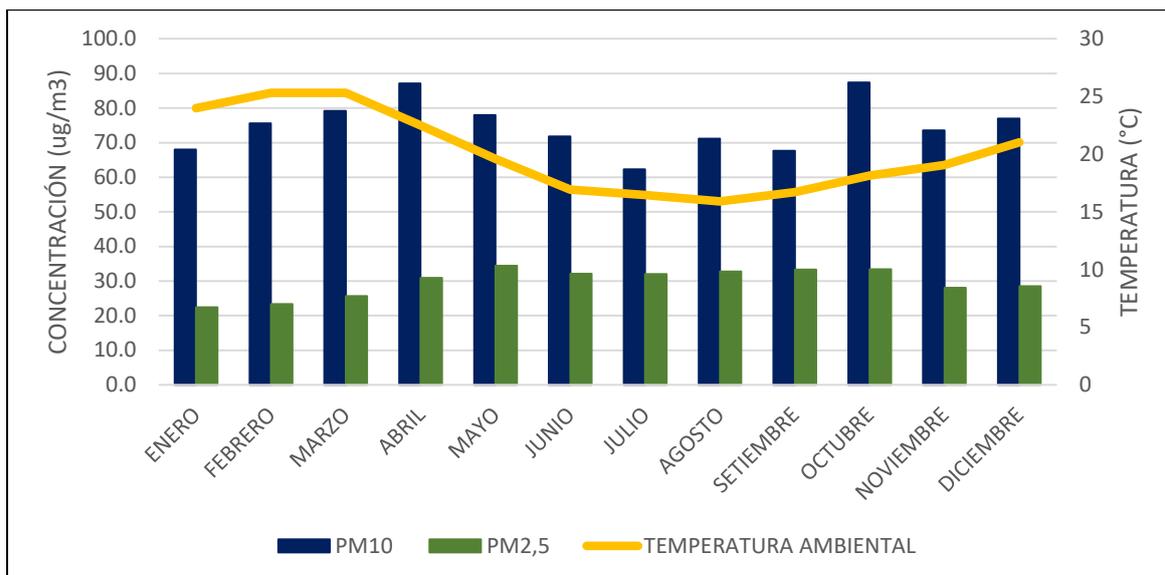


Figura 73. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5} y positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura del aire favorece la dispersión del material particulado fino, por lo que disminuye su concentración. La correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.68 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.40 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5} y positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con el incremento de las concentraciones del material particulado fino. La correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.61 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.60 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀ (Tabla 37).

Tabla 37. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = 1.1055x + 55.703$	$y = -1.213x + 55.194$	$y = 2.0238x + 34.259$	$y = -0.9794x + 48.874$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.40$	$R^2 = 0.68$	$R^2 = 0.60$	$R^2 = 0.61$

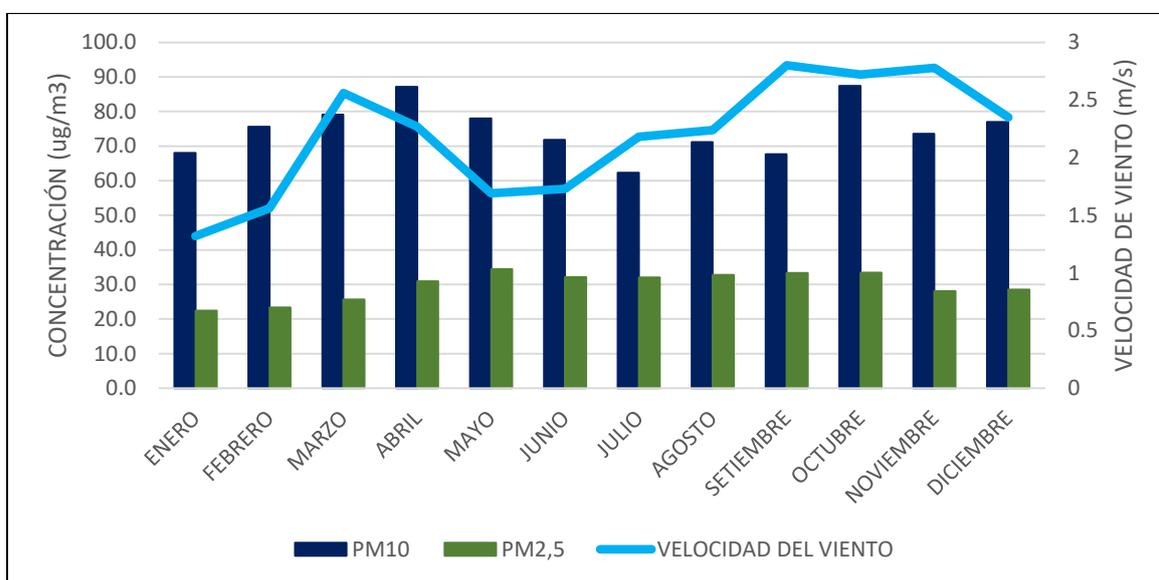


Figura 74. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 74 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los últimos meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de setiembre (2.7 m/s); y los menores valores a inicios del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de enero (1.2 m/s). A lo largo del año en general, a medida que la velocidad del viento se incrementa, las concentraciones de

material particulado fino disminuyen y del grueso aumentan; y viceversa, a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado fino aumentan y del grueso disminuyen.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} y positiva entre la velocidad del viento y el PM₁₀, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad el viento favorece la dispersión del material particulado fino, por lo que disminuye su concentración. La correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.84 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.55 entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} y positiva entre la velocidad del viento y el PM₁₀, debido al descenso de las velocidades junto con el incremento de las concentraciones del material particulado fino. La correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.62 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.46 entre la velocidad del viento y el PM₁₀ (Tabla 38).

Tabla 38. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Santa Anita) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = 10.496x + 57.14$	$y = -8.0146x + 47.335$	$y = 22.388x + 19.346$	$y = -6.928x + 46.891$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.55$	$R^2 = 0.84$	$R^2 = 0.46$	$R^2 = 0.62$

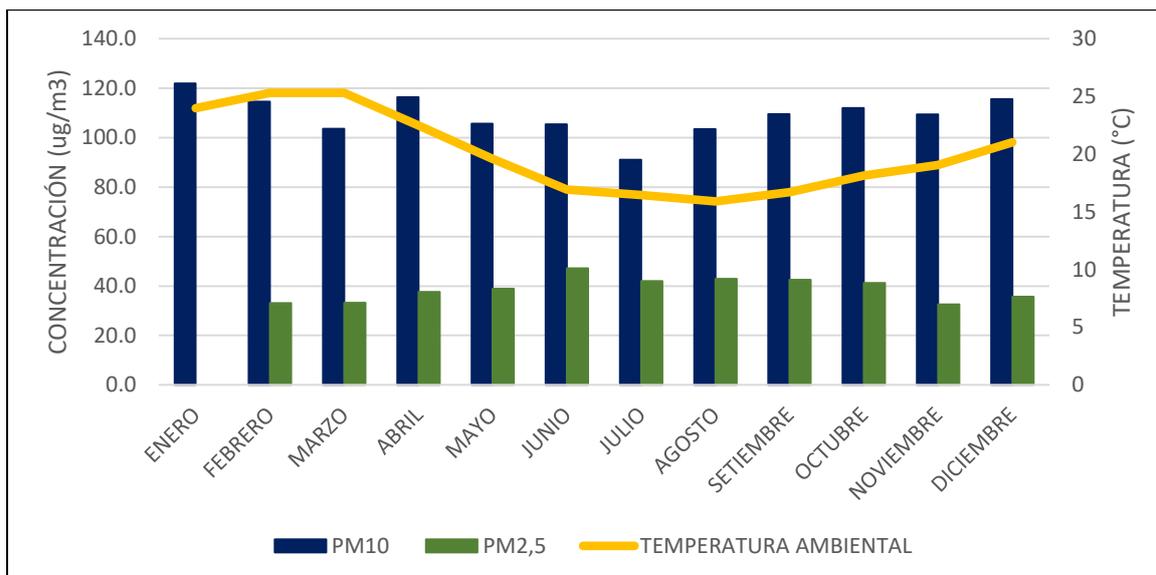


Figura 75. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

Se observa en la Figura 75 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los primeros meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de febrero (25.0 °C); y los menores valores a mitades del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de agosto (15.8 °C). A lo largo del año en general, a medida que las temperaturas del aire se incrementan, las concentraciones de material particulado fino disminuyen y del grueso aumentan; y viceversa, a medida que las temperaturas del aire disminuyen las concentraciones de material particulado fino aumentan y del grueso disminuyen.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5} y positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, siendo más notoria entre la temperatura del aire y el PM_{2,5}. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura del aire favorece la dispersión del material particulado fino, por lo que disminuye su concentración. La correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.93 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.68 entre la temperatura

ambiental y el PM₁₀. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la temperatura del aire y el PM_{2,5} y positiva entre la temperatura del aire y el PM₁₀, debido al descenso de las temperaturas del aire junto con el incremento de las concentraciones del material particulado fino. La correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.65 entre la temperatura ambiental y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.48 entre la temperatura ambiental y el PM₁₀ (Tabla 39).

Tabla 39. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Temperatura del aire (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}	Temperatura y PM ₁₀	Temperatura y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = 1.745x + 75.039$	$y = -1.5096x + 71.107$	$y = 3.1104x + 51.256$	$y = -1.8012x + 71.7$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.68$	$R^2 = 0.93$	$R^2 = 0.48$	$R^2 = 0.65$

Se observa en la Figura 76 la variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Velocidad del viento (estación Alexander Von Humboldt) para el periodo 2015-2017. La variación mensual multianual del PM₁₀ y PM_{2,5} ya se discutieron en los dos primeros objetivos de este trabajo de investigación. La variación mensual de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores durante los últimos meses del año, alcanzado un máximo valor en el mes de setiembre (2.7 m/s); y los menores valores a inicios del año, alcanzando su mínimo valor en el mes de enero (1.2 m/s). A lo largo del año en general, a medida que la velocidad del viento se incrementa, las concentraciones de material particulado fino disminuyen y del grueso aumentan; y viceversa, a medida que las velocidades del viento disminuyen las concentraciones de material particulado fino aumentan y del grueso disminuyen.

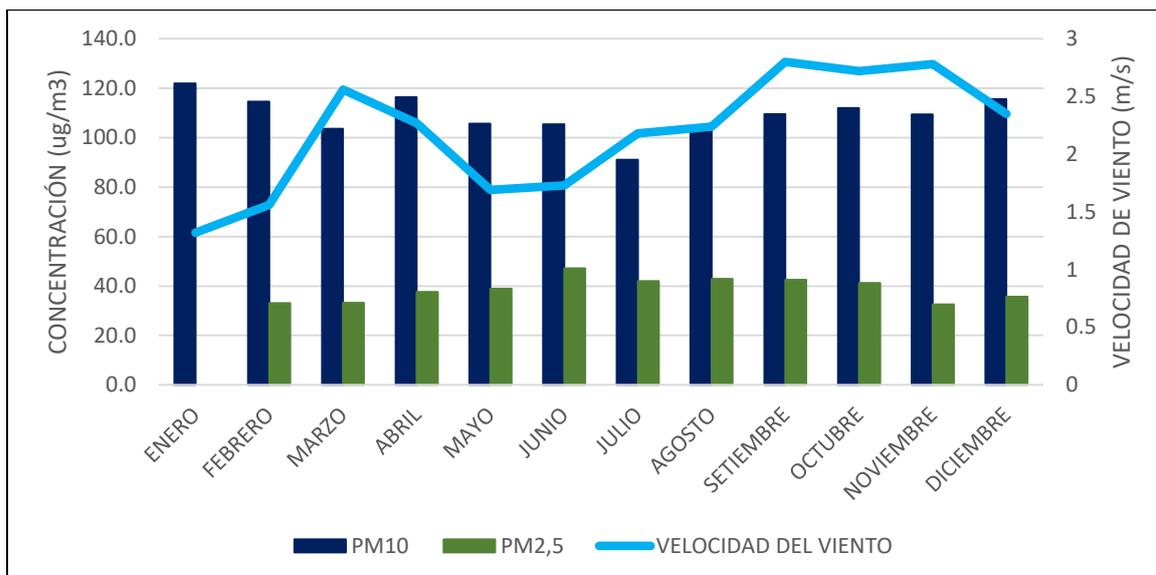


Figura 76. Variación mensual multianual del PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt). Periodo 2015-2017.

En los seis primeros meses se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento, el PM₁₀ y el PM_{2,5}, siendo más notoria entre la velocidad del viento y el PM₁₀. Esto se explica debido a que el aumento de la velocidad del viento favorece la dispersión tanto del material particulado fino y grueso, por lo que disminuye su concentración. Esta correlación negativa es corroborada con el coeficiente de determinación de 0.64 entre la velocidad del viento y el PM₁₀; y de 0.62 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}. Mientras en los últimos seis meses también se presenta una correlación negativa entre la velocidad del viento y el PM_{2,5} y positiva entre la velocidad del viento y el PM₁₀, debido al descenso de las velocidades junto con el incremento de las concentraciones del material particulado fino. La correlación negativa se ve reflejada con el coeficiente de determinación de 0.79 entre la velocidad del viento y el PM_{2,5}; y la positiva, con 0.74 entre la velocidad del viento y el PM₁₀ (Tabla 40).

Tabla 40. Correlación entre el PM₁₀, PM_{2,5} (estación Ate) y la Velocidad del Viento (estación Alexander Von Humboldt).

Correlación	1 ^{er} mitad del año		2 ^{da} mitad del año	
	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}	Velocidad del viento y PM ₁₀	Velocidad del viento y PM _{2,5}
Ecuación de regresión	$y = -10.599x + 134.6$	$y = -10.839x + 61.593$	$y = 23.81x + 44.555$	$y = -16.487x + 77.677$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.64$	$R^2 = 0.62$	$R^2 = 0.74$	$R^2 = 0.79$

4.4.3 Variación espacial de la temperatura del aire y vientos en Lima Metropolitana

En la Figura 77 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la temperatura del aire para las cinco estaciones meteorológicas automáticas de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo verano 2015-2017). La variación espacial de la temperatura del aire se caracteriza por presentar sus mayores valores en la Zona Norte de Lima Metropolitana durante el verano, alcanzado un máximo valor en la estación Antonio Raimondi (25.3 °C); y los menores valores en las Zonas Este y Sur, alcanzando su mínimo valor en la estación Alexander Von Humboldt (23.4 °C).

Estas diferencias de temperaturas a lo largo de Lima Metropolitana, trae como consecuencia el movimiento horizontal de las masas de aire de menor temperatura (mayor presión atmosférica) a mayor temperatura (menor presión atmosférica), propiciando que los vientos tengan una dirección del sur. Y transportando de esta manera el material particulado generado desde las Zonas Sur hacia las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana (DIGESA, 2011).

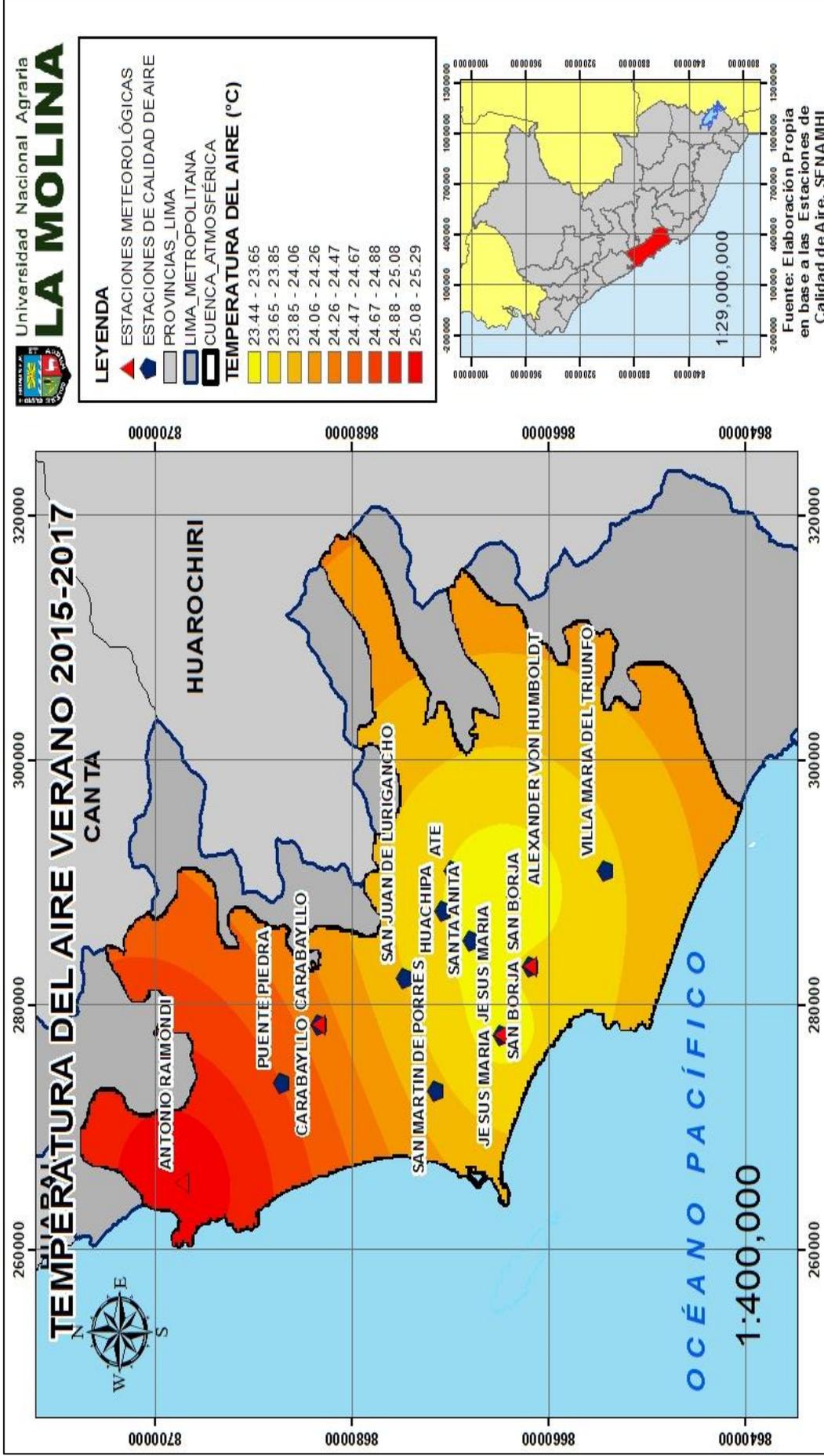


Figura 77. Distribución espacial de la temperatura del aire en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017.

En la Figura 78 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la temperatura del aire para las cinco estaciones meteorológicas automáticas de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo invierno 2015-2017). La variación espacial de la temperatura del aire se caracteriza nuevamente por presentar sus mayores valores en la Zona Norte de Lima Metropolitana durante el invierno, alcanzado un máximo valor en la estación Antonio Raimondi (18.2 °C); y los menores valores en las Zonas Este y Sur, alcanzando su mínimo valor en la estación Alexander Von Humboldt (16.2 °C).

Estas diferencias de temperaturas a lo largo de Lima Metropolitana, trae como consecuencia el movimiento horizontal de las masas de aire de menor temperatura (mayor presión atmosférica) a mayor temperatura (menor presión atmosférica), propiciando que los vientos tengan una dirección del sur. Y transportando de esta manera el material particulado generado desde las Zonas Sur hacia las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana (DIGESA, 2011).

En la Figura 79 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la velocidad y dirección del viento para las cinco estaciones meteorológicas automáticas de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo verano 2015-2017). La variación espacial de la velocidad del viento se caracteriza por presentar sus mayores valores en la Zona Norte de Lima Metropolitana durante el verano, alcanzado un máximo valor en la estación Antonio Raimondi (3.7 m/s); y los menores valores en las Zona Centro, alcanzando su mínimo valor en la estación San Borja (1.3 m/s).

La dirección predominante en Lima Metropolitana en este periodo es del suroeste. Además, que el viento sopla principalmente en el intervalo de 1.60 a 3.40 m/s con una frecuencia de distribución de 24.9 por ciento. El viento favorece la dispersión del material particulado debido a la mezcla con mayor volumen de aire y trasladándolo a distintas zonas desde su lugar de emisión (DIGESA, 2011).

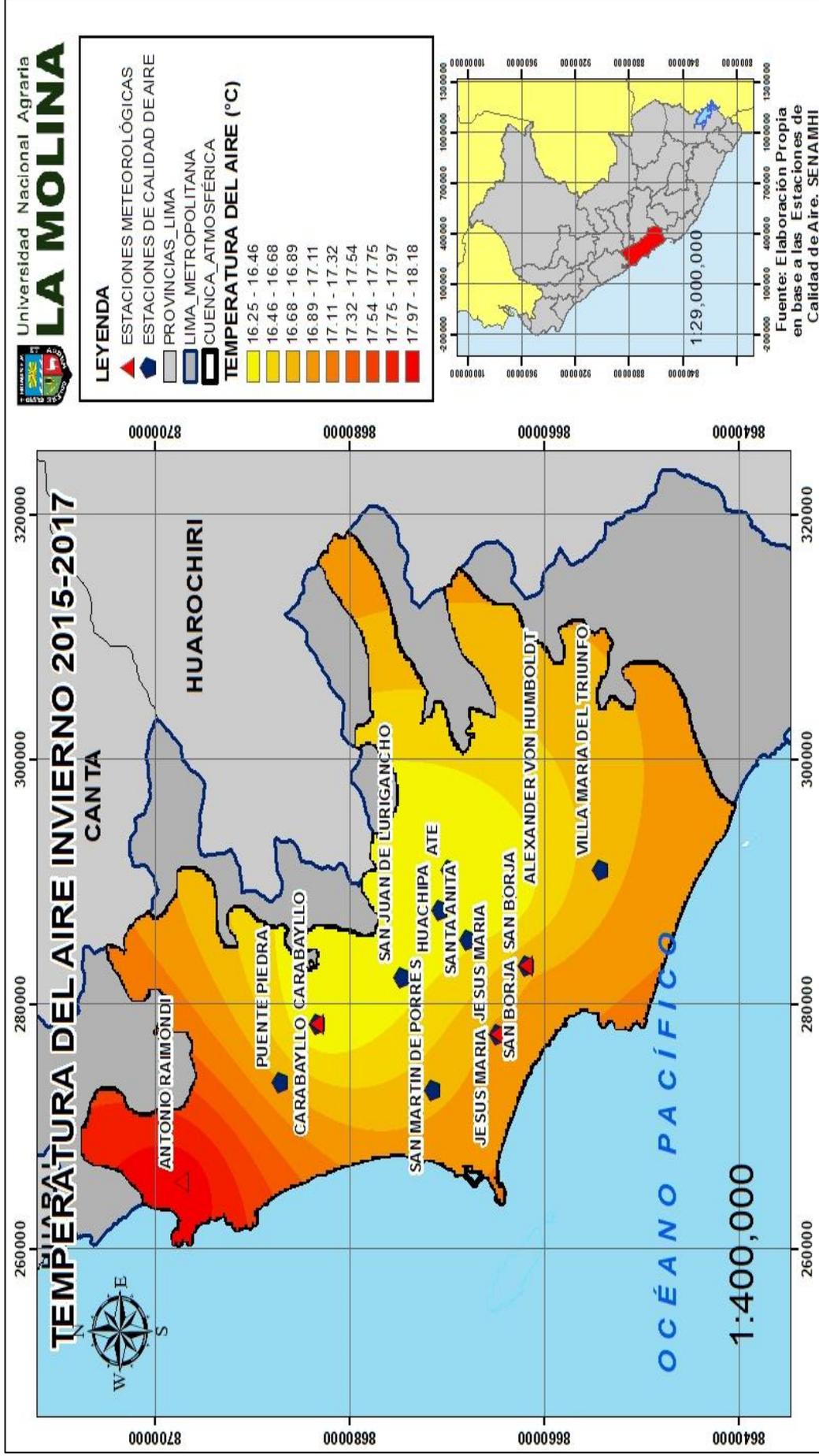


Figura 78. Distribución espacial de la temperatura del aire en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017.

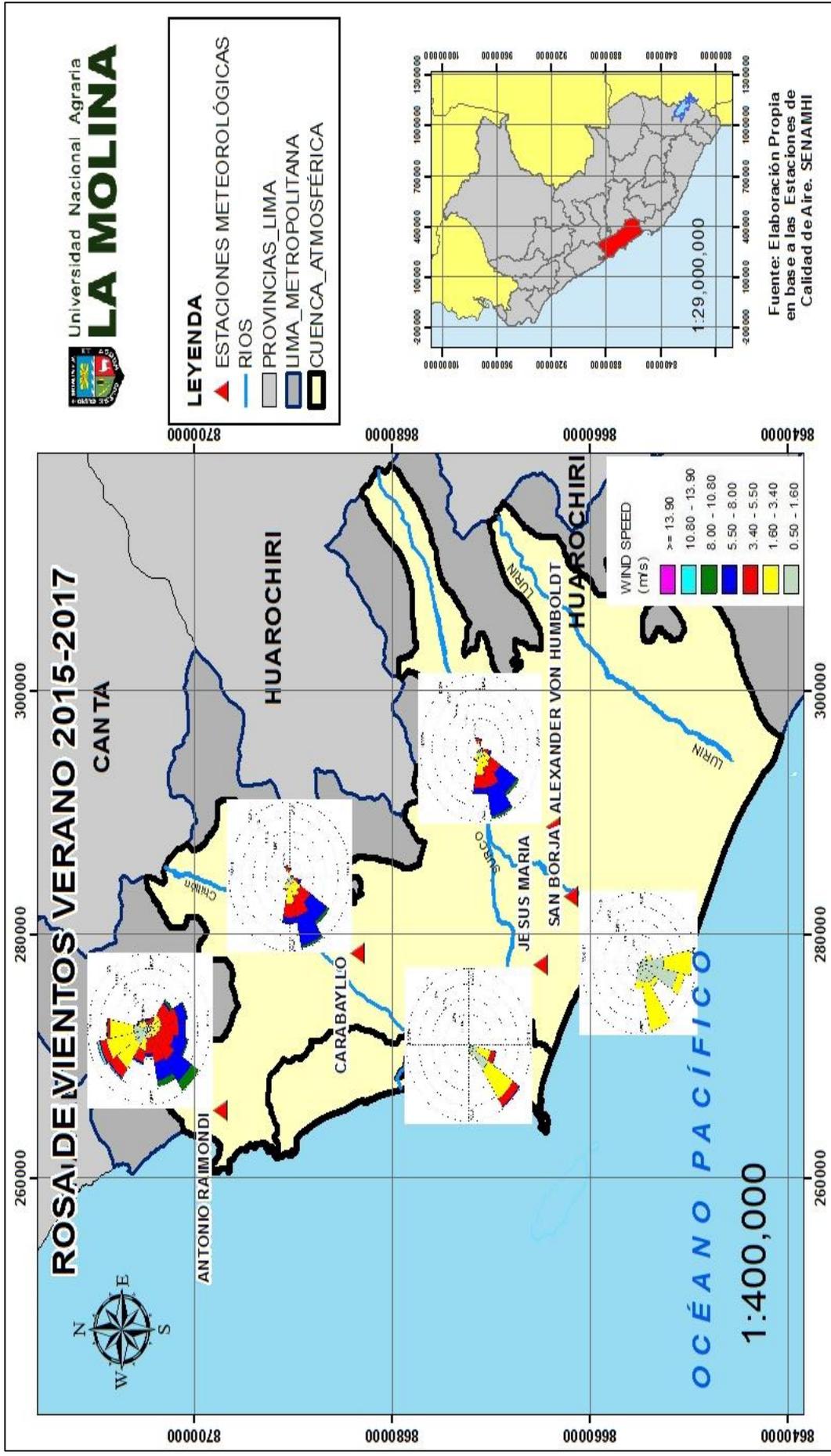


Figura 79. Distribución espacial de los vientos en Lima Metropolitana. Periodo verano 2015-2017.

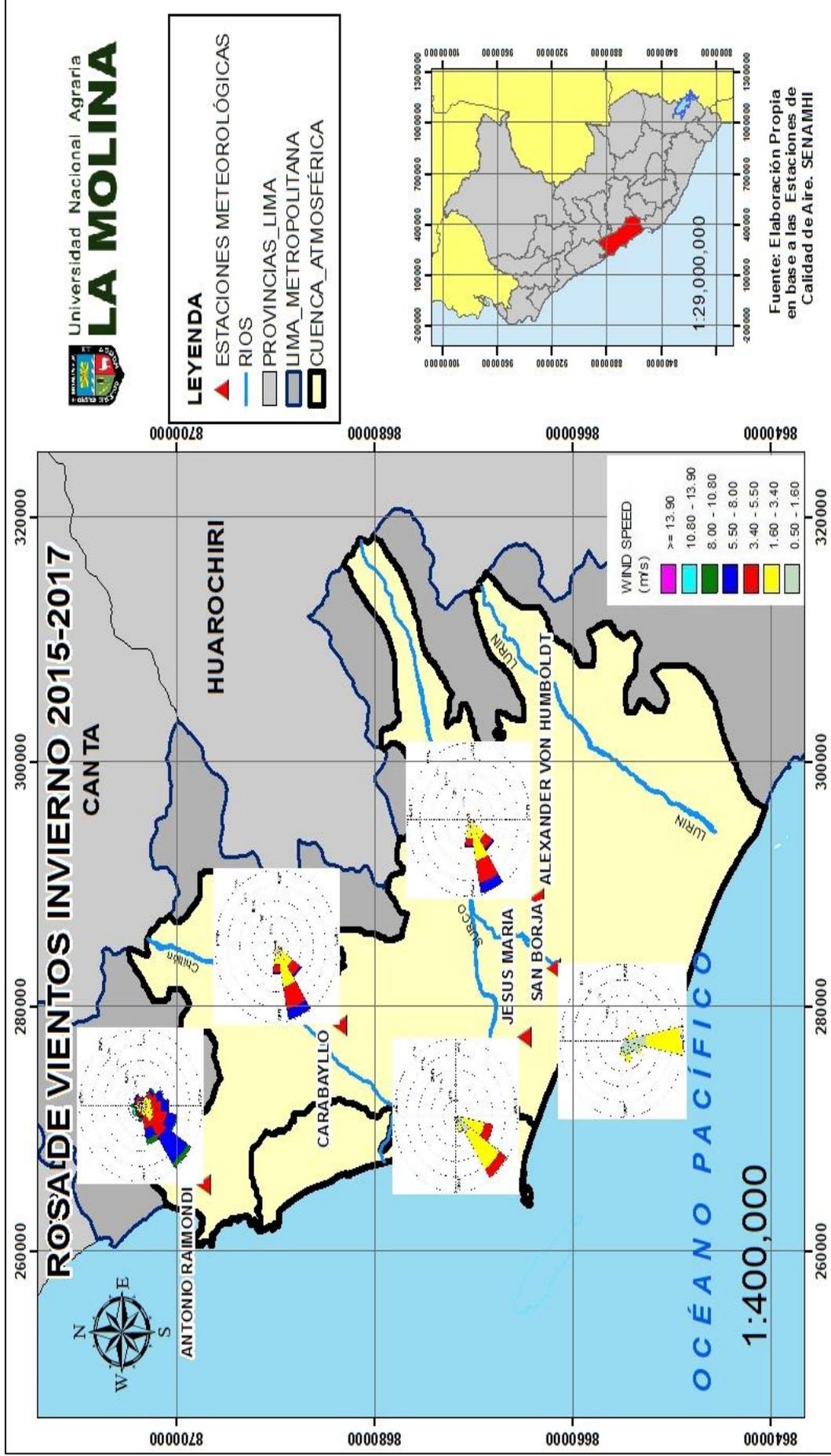


Figura 80. Distribución espacial de los vientos en Lima Metropolitana. Periodo invierno 2015-2017.

En la Figura 80 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la velocidad y dirección del viento para las cinco estaciones meteorológicas automáticas de Lima Metropolitana, operadas por el SENAMHI (periodo invierno 2015-2017). La variación espacial de la velocidad del viento nuevamente se caracteriza por presentar sus mayores valores en la Zona Norte de Lima Metropolitana durante el invierno, alcanzado un máximo valor en la estación Antonio Raimondi (4.5 m/s); y los menores valores en las Zona Centro, alcanzando su mínimo valor en la estación San Borja (1.4 m/s).

La dirección predominante en Lima Metropolitana en este periodo es del suroeste. Además, que el viento sopla principalmente en el intervalo de 1.60 a 3.40 m/s con una frecuencia de distribución de 36.3 por ciento. El viento favorece la dispersión del material particulado debido a la mezcla con mayor volumen de aire y trasladándolo a distintas zonas desde su lugar de emisión (DIGESA, 2011).

V. CONCLUSIONES

5.1 De la evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM₁₀ en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017

La variación horaria del PM₁₀ en Lima Metropolitana presenta dos picos máximos durante el día (09:00 a.m. y 08:00 p.m.) y dos picos mínimos (04:00 a.m. y 03:00 p.m.).

La distribución espacial, presenta las mayores concentraciones en las Zonas Sur y Este, principalmente en las estaciones Villa María del Triunfo y Ate, respectivamente. Y los menores niveles se encuentran en la Zona Centro, principalmente en la estación Campo de Marte.

A nivel diario los máximos valores se registran los martes y sábados y los mínimos valores los días domingos.

A nivel mensual los mayores valores de PM₁₀ se registran durante los meses marzo, abril y mayo y los mínimos durante julio, agosto y setiembre. A nivel estacional en general se presentan mayores valores de PM₁₀ durante el verano que durante el invierno.

La variación multianual del PM₁₀ muestra que todas las estaciones de monitoreo, a excepción del Callao, superan significativamente los valores límites del ECA para PM₁₀ (50 µg/m³). Existe una disminución moderada de los niveles de PM₁₀ en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.560.

5.2 De la evaluación y análisis de la distribución espacial y temporal (horario, mensual y multianual) de la concentración del material particulado PM_{2,5} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017

La variación horaria del PM_{2,5} en Lima Metropolitana presenta dos picos máximos durante el día (09:00 a.m. y 10:00 p.m.) y dos picos mínimos (04:00 a.m. y 05:00 p.m.).

La distribución espacial, presenta las mayores concentraciones en la Zona Este, principalmente en la estación Ate. Y los menores niveles se encuentran en la Zona Centro, principalmente en la estación Campo de Marte.

A nivel diario los máximos valores se registran los martes y sábados y los mínimos valores los días domingos.

A nivel mensual los mayores valores de PM_{2,5} se registran durante los meses abril, mayo y junio y los mínimos durante enero, febrero y marzo. A nivel estacional en general se presentan mayores valores de PM_{2,5} durante el invierno que durante el verano.

La variación multianual del PM_{2,5} muestra que todas las estaciones de monitoreo, a excepción del Callao, superan significativamente los valores límites del ECA para PM_{2,5} (25 µg/m³); y las guías de la OMS (10 µg/m³). La tendencia de la serie histórica de PM_{2,5} muestra que existe en general una disminución alta de los niveles de PM_{2,5} en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.734.

5.3 Del cálculo y análisis de la relación de las concentraciones del material particulado ($PM_{2,5}/PM_{10}$) de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana

La variación horaria de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en Lima Metropolitana presenta una cresta a las 04:00 a.m. y un valle a las 07:00 p.m. La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ disminuye durante el día y aumenta en las noches y madrugadas.

La distribución espacial, presenta las mayores relaciones en la Zona Este y Centro, principalmente en la estación Ate y Campo de Marte, respectivamente. Y los menores valores se encuentran en la Zona Sur, principalmente en la estación Villa María del Triunfo. La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ es de 0.40 en promedio para la estación Santa Anita y 0.20 para la estación de Villa María del Triunfo, dando un promedio de 0.33 para la ciudad de Lima Metropolitana.

La linealidad de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en las estaciones Santa Anita y Campo de Marte permite utilizar datos de PM_{10} para estimar con confianza la concentración de $PM_{2,5}$ que pueden ser utilizados en estudios de relaciones entre este contaminante y la salud de la población en los distritos representados por estas estaciones. En estas estaciones la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ registra una mayor influencia de fuentes de combustión.

Los datos de $PM_{2,5}$ no son estimados a partir de datos de PM_{10} en las estaciones de Puente Piedra, San Borja y Villa María del Triunfo. Sería necesario monitorear $PM_{2,5}$ de manera directa y estudiar con detalle las interacciones entre las fuentes y las variables meteorológicas alrededor de estas estaciones. En estas estaciones la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ demuestra una mayor influencia de fuentes de material particulado grueso para las estaciones Villa María del Triunfo y Puente Piedra; y fuentes de material particulado fino para la estación de San Borja.

A nivel diario los mayores valores se registran los domingos y los mínimos valores los días jueves.

A nivel mensual los mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ se registran durante los meses junio, julio y agosto y los mínimos durante enero, febrero y marzo. A nivel estacional en general se presentan mayores valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ durante el invierno que durante el verano.

La variación multianual de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ muestra que todas las estaciones de monitoreo, han ido aumentando hasta alcanzar un pico en el año 2013 y a partir de este ha ido disminuyendo progresivamente. La tendencia de la serie histórica de relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ muestra que existe en general una disminución débil de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.171.

5.4 De la evaluación y análisis de las influencias de las variables meteorológicas temperatura del aire y viento en la distribución espacial y temporal de la concentración del material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana, durante el periodo 2015-2017

Los niveles de material particulado tanto fino como grueso en Lima Metropolitana registran importante relación con las condiciones meteorológicas de la zona, como lo son la temperatura del aire, la velocidad y dirección del viento. Los factores meteorológicos junto con los diferentes tipos de emisiones de material particulado muy probablemente determinan la calidad de aire en Lima Metropolitana.

En Lima Metropolitana las direcciones que registran las mayores frecuencias son las provenientes del suroeste. Durante las horas diurnas se registran importantes variaciones en la velocidad y dirección del viento, comportamiento que posiblemente está relacionado con efectos generados por el anticiclón del Pacífico Sur, la interacción con fenómenos sinópticos de la corriente de Humboldt y efecto local generado por la variación de temperatura del aire y presión atmosférica.

En el periodo diurno, a nivel horario se registra una correlación negativa entre la temperatura del aire y el material particulado tanto fino como grueso. En el periodo nocturno y madrugadas en general, a nivel horario se registra una correlación positiva entre la temperatura del aire y el material particulado grueso; y una correlación negativa entre la temperatura del aire y el material particulado fino.

En el periodo diurno, a nivel horario se registra una correlación negativa entre la velocidad del viento y el material particulado tanto fino como grueso. En el periodo nocturno y madrugadas en general, a nivel horario se registra una correlación positiva entre la velocidad del viento y el material particulado grueso; y una correlación negativa entre la velocidad del viento y el material particulado fino.

A nivel mensual, en general se registra una correlación negativa entre la temperatura del aire y el material particulado tanto fino como grueso. Y una correlación negativa entre la velocidad del viento y el material particulado tanto fino como grueso.

La distribución espacial de la temperatura del aire, velocidad y dirección del viento transportan el material particulado generado desde las Zonas Sur hacia las Zonas Norte y Este de Lima Metropolitana.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda contar con una mayor cantidad de estaciones de calidad de aire y meteorología a fin de abarcar con mayor representatividad y exactitud a la Región de Lima Metropolitana, para ello las estaciones de calidad de aire deben de estar sujetas a funcionamiento óptimo, por lo que se necesita inversión para el mantenimiento preventivo y correctivo de todos los instrumentos de medición de calidad de aire y estaciones meteorológicas.

El siguiente paso es crear mapas temáticos que representen la calidad de aire en tiempo real, de tal manera que las personas sean conscientes a la exposición que estas se encuentran y la autoridad de Salud DIGESA tome cartas en el asunto.

Se recomienda que las autoridades ambientales como el OEFA y El Ministerio de Transportes y Comunicaciones continúen fiscalizando el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles a nivel de sus competencias y de las emisiones vehiculares, respectivamente. Así también, mejorar el procedimiento de las Revisiones Técnicas Vehiculares.

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) a través del sub Sector Hidrocarburos debe priorizar la disminución del azufre en los combustibles líquidos derivados de los hidrocarburos a nivel nacional para mejorar la calidad ambiental. Así también masificar los centros de abastecimiento de los mismos.

Los sectores con competencia ambiental deben sensibilizar y concientizar a la población en el uso de vehículos particulares y públicos que se abastezcan con combustibles eco

amigables como el Gas Natural Vehicular (GNV), asimismo mejorar la pavimentación de las calles y avenidas por las cuales estas unidades de transporte se desplazarán.

El Ministerio del Ambiente debe continuar elaborando y aprobando los Límites Máximos Permisibles para las emisiones de material particulado en sus fracciones gruesas y finas de las diversas actividades productivas en coordinación con los sectores que no cuentan con la normatividad vigente. Además, el OEFA debe fiscalizar de manera oportuna el cumplimiento de estos.

Es necesario determinar la contribución de las diversas fuentes de material particulado en cada zona de la ciudad de Lima Metropolitana por medio de la caracterización química-morfológica del material particulado en el aire y la aplicación de modelos de balance de masas o similares.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, G. 2006. Estimación del aporte de diferentes fuentes a la contaminación atmosférica por partículas en Santiago, mediante un modelo de balance de masas de elementos químicos. (Tesis de Pregrado en Ing. Civil Mecánico). Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Antonel, J. y Chowdhury, Z. 2014. Measuring ambient particulate matter in three cities in Cameroon, Africa. *Atmospheric Environment*, 95:344-354.
- Arciniegas, A. y Rodríguez, C. 2005. Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en la localidad de Puente Aranda en Bogotá. (Tesis de Pregrado en Ing. Ambiental y Sanitario). Bogotá: Universidad de la Salle.
- Atkinson RW, Fuller GW, Anderson HR, Harrison RM, Armstrong B. 2010. Urban ambient particle metrics and health. A time series analysis. *Epidemiology*, 21:501–511.
- Baccini, M., Biggeri, A., Lagazio, C., Lertxundi, A., & Saez, M. 2007. Parametric and semi-parametric approaches in the analysis of short-term effects of air pollution on health. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51(9):4324-4336.

- Beatriz, P. 2005. Contaminación del aire por material particulado en la Ciudad de Buenos Aires. (Tesis de Doctorado en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Weinmayr, G., Hoffmann, B., & Vineis, P. 2014. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet*, 383(9919):785-795.
- Cheung, K., Daher, N., Kam, W., Shafer, M. M., Ning, Z., Schauer, J. J., & Sioutas, C. 2011. Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient coarse particulate matter (PM_{10-2.5}) in the Los Angeles area. *Atmospheric Environment*, 45(16):2651–2662.
- Cortez, J. 2013. Evaluación de la contaminación atmosférica en el aire ambiente de Manizales por COPs y PM₁₀. (Tesis de Magister en Ingeniería - Ingeniería Química). Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Correia AW, Pope III CA, Dockery DW, Wang Y, Ezzati M, Dominici F. 2013. The effect of air pollution control on life expectancy in the United States: an analysis of 545 us counties for the period 2000 to 2007. *Epidemiology*, 24(1):23–31.
- Decreto Supremo N° 009-2003-SA. Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire.
- Decreto Supremo N° 012-2005-SA. Modifican Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire.

- Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.
- DIGESA. 2012. II Estudio de saturación de Lima Metropolitana y el Callao 2011 (en Línea). Disponible en http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/Estudio%20de%20Saturacion%202012.pdf . Consultado 10 abril del 2017.
- DIGESA. 2017. Programa Nacional de Vigilancia Sanitaria de Calidad del Aire (en línea). Disponible en http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/aire_lc/lima_callao.asp. Consultado 23 de enero 2018.
- Environmental Systems Research Institute, 2016. Work Smarter With ArcGIS (en línea). Disponible en <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis/>. Consultado 17 junio del 2017.
- Essiett, A y Bede, M. 2015. Assessment of Total Suspended Particulates (TSP) in Ikot Abasi L. G. A., Nigeria. *International Journal of Physics*, 3(6):230-232.
- Esworthy, R. 2013. Air quality: EPA's 2013 changes to the particulate matter (PM) standard. *Congressional Research Service* 7-5700, n. R42934; 2013. p. 6.
- Galvis, B., & Rojas, N. (2006). Relación entre PM_{2,5} y PM₁₀ en la Ciudad de Bogotá. *Acta Nova*, 3(2): 336-353.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford Univ. Press, New York. Págs 185-251.

- Guaita R, Pichiule M, Mate T, Linares C, Diaz J. 2011. Short-term impact of particulate matter (PM_{2,5}) on respiratory mortality in Madrid. *International Journal of Environmental Health Research*, 21:260–74.
- Janssen, N. A. H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C., & Cassee, F. R. 2013. Short-term effects of PM_{2,5}, PM₁₀ and PM_{2,5-10} on daily mortality in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 463:20-26.
- Juda-Rezler, K., Reizer, M., & Oudinet, J. P. 2011. Determination and analysis of PM₁₀ source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European urban areas: the case of wintertime 2006. *Atmospheric Environment*, 45(36): 6557-6566.
- Hasheminassab, S., Daher, N., Schauer, J. J., & Sioutas, C. 2013. Source apportionment and organic compound characterization of ambient ultrafine particulate matter (PM) in the Los Angeles Basin. *Atmospheric Environment*, 79: 529-539.
- Her, J., Park, S., & Lee, J. S. 2016. The effects of bus ridership on airborne particulate matter (PM₁₀) concentrations. *Sustainability*, 8(7):636.
- Hou, Q., An, X., Wang, Y., Tao, Y., & Sun, Z. 2012. An assessment of China's PM₁₀-related health economic losses in 2009. *Science of the Total Environment*, 435: 61-65.
- Karanasiou, A., Moreno, N., Moreno, T., Viana, M., De Leeuw, F., & Querol, X. 2012. Health effects from Sahara dust episodes in Europe: literature review and research gaps. *Environment International*, 47:107-114.

- Keuken, M. P., Moerman, M., Voogt, M., Blom, M., Weijers, E. P., Röckmann, T., & Dusek, U. 2013. Source contributions to PM_{2,5} and PM₁₀ at an urban background and a street location. *Atmospheric Environment*, 71:26-35.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74:136-143.
- Kumar, P., Morawska, L., Birmili, W., Paasonen, P., Hu, M., Kulmala, M., & Britter, R. 2014. Ultrafine particles in cities. *Environment international*, 66:1-10.
- Ley General del Ambiente N° 28611. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 13 de octubre del 2005.
- Londahl, J., Pagels, J., Swietlicki, E., Zhou, J., Ketzel, M., Massling, A., & Bohgard, M. 2006. A set-up for field studies of respiratory tract deposition of fine and ultrafine particles in humans. *Journal of Aerosol Science*, 37(9):1152-1163.
- Ministerio del Ambiente, 2016. Informe nacional de la calidad del aire 2013-2014. Julio, 2016. Lima, Perú.
- Miranda, K. y Ortiz, L. 2008. Evaluación de la concentración de material particulado suspendido PM₁₀ y su relación con la morbilidad asociados a ERA`s en niños menores a catorce años por enfermedad respiratoria aguda en el municipio de Toluviejo (sucre). (Tesis de Pregrado en Ing. Ambiental y Sanitario). Bogotá: Universidad de la Salle.

- Misra, C., Geller, M. D., Shah, P., Sioutas, C., & Solomon, P. A. 2001. Development and Evaluation of a Continuous Coarse (PM₁₀–PM_{2,5}) Particle Monitor. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(9): 1309-1317.
- Moral, F. 2003. *La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística Lineal*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Cáceres.
- Moreano, D. y Palmisano, A. 2012. Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM₁₀ y CO. (Tesis de Pregrado en Ing. Civil). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Opazo, D. 2011. Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos en Santiago para el año 2009. (Tesis de Pre grado en Geógrafo). Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- OMS, 2014. La calidad del aire se está deteriorando en muchas de las ciudades del mundo. 7 mayo 2014. (en línea). Disponible en http://www.paho.org/hq/index.php?id=9558%3Aair-quality-is-deteriorating-in-many-of-the-worlds-cities&option=com_content . Consultado 6 mayo. 2017.
- OMS, 2016. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Actualización de septiembre de 2016. (en línea). Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. Consultado 16 julio 2017.
- Pacsi Valdivia Sergio A. 2016. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana. En:

Anales Científicos, Universidad Nacional Agraria La Molina. N° 77 (2), 273-283 (2016).

- Pascal, M., Corso, M., Chanel, O., Declercq, C., Badaloni, C., Cesaroni, G., & Medina, S. 2013. Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: results of the Aphekom project. *Science of the Total Environment*, 449:390-400.
- Pascal, M., Falq, G., Wagner, V., Chatignoux, E., Corso, M., Blanchard, M., & Larrieu, S. 2014. Short-term impacts of particulate matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on mortality in nine French cities. *Atmospheric Environment*, 95:175-184.
- Pearson, J. F., Bachiredy, C., Shyamprasad, S., Goldfine, A. B., & Brownstein, J. S. 2010. Association between fine particulate matter and diabetes prevalence in the US. *Diabetes Care*, 33(10):2196-2201.
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9):1132-1141.
- Querol, X., Alastuey A., Ruiz C.R., Artiñano B., Hansson H.C., Harrison R.M., Buringh E., Schneider J. 2004. Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment* 38: 6547–6555.
- Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM. Establecen el Índice de Calidad del Aire - INCA y crean el Sistema de Información de Calidad del Aire - INFO AIRE PERÚ, como parte del Sistema Nacional de Información Ambiental – SINIA.

- Safar, Z. y Labib, M. 2010. Assessment of particulate matter and lead levels in the Greater Cairo area for the period 1998–2007. *Journal of advanced research*, 1(1):53-63.
- Sánchez-Ccoyllo, O. R.; Ordóñez-Aquino, C. G.; Aliaga-Martínez, R. R. y Rojas-Quincho, J. P. (2015). Evaluación de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana, 2014. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Sánchez-Ccoyllo, O.; Ordóñez-Aquino, C.; Ibarra-Basurto, J. y Aliaga-Martínez, R. 2015. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana, 2013. Lima: SENAMHI.
- Sánchez-Ccoyllo, O. R.; Ordoñez, C. G.; Gavidia, M. E.; Silva, J. S.; Angulo, J. L.; Blas, D. R.; Chávez, J. E.; Aliaga, R. R.; Zevallos, A.; Canales, J. C.; Aguirre, A.R. 2013. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011. Lima: SENAMHI.
- Srimuruganandam, B., & Nagendra, S. S. 2012. Source characterization of PM₁₀ and PM_{2,5} mass using a chemical mass balance model at urban roadside. *Science of the Total Environment*, 433:8-19.
- Viana, M. 2003. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. (Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas). Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Villatoro M.; Henríquez, C. y Sancho, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de PH, CA, CICE, y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32(1): 95-105. Costa Rica.

- Wark, K., Warner, C.F. 2007. Contaminación del aire. Origen y control. México, D.F.: Limusa Noriega Editores.
- World Bank, 2013. PM₁₀, country level. Disponible en http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.PM10.MC.M3?order=wbapi_data_value_2011+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=asc. Consultado 5 marzo 2017.
- World Health Organization, 2006. Air Quality Guidelines: Global Update 2005. WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization, 2006. Air quality Guidelines, global update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Report on a WHO Working Group. Bonn, Germany. January 2006.
- World Health Organization, 2011. Exposure to air pollution (particulate matter) in outdoor air. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization, 2013. Health effects of particulate matter. Copenhagen, Denmark. WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization, 2014. WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion. Geneva, Switzerland.
- World Health Organization, 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneva, Switzerland.

- Wu, S., Deng, F., Hao, Y., Wang, X., Zheng, C., Lv, H., & Shima, M. 2014. Fine particulate matter, temperature, and lung function in healthy adults: findings from the HVNR study. *Chemosphere*, 108:168-174.
- Xu, G., Jiao, L., Zhang, B., Zhao, S., Yuan, M., Gu, Y., & Tang, X. 2017. Spatial and temporal variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in Wuhan, Central China. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(3):741-751.
- Zhang, M., Song, Y., Cai, X., & Zhou, J. 2008. Economic assessment of the health effects related to particulate matter pollution in 111 Chinese cities by using economic burden of disease analysis. *Journal of Environmental Management*, 88(4):947-954.