

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PANDEMIA POR EL
SARS CoV-2 EN LA VARIACIÓN TEMPORAL DE PM_{2.5} EN LAS
CIUDADES DE LIMA METROPOLITANA Y AREQUIPA”**

Presentado por:

ANTONIO BENJAMIN GARCIA SIERRA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima - Perú

2023

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24 Reglamento de Propiedad Intelectual)

Document Information

Analyzed document	Tesis final Antonio Garcia 2023.pdf (D156103277)
Submitted	2023-01-17 03:08:00
Submitted by	SERGIO PACSI VALLDIVIA
Submitter email	spv@lamolina.edu.pe
Similarity	12%
Analysis address	spv.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documents/Ciga/libros2009/225459.pdf Fetched: 2023-01-17 03:13:00		11
SA	PLAN_DE_TESIS_-_CRISTELL (5).docx Document PLAN_DE_TESIS_-_CRISTELL (5).docx (D140348016)		6
W	URL: https://doi.org/10.1289/ehp.9621 Fetched: 2023-01-17 03:09:00		1
W	URL: https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/6017 Fetched: 2023-01-17 03:11:00		2
SA	3548-Andonaire Rodríguez, José Luis.pdf Document 3548-Andonaire Rodríguez, José Luis.pdf (D77433396)		4
W	URL: https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002979 Fetched: 2023-01-17 03:10:00		2
SA	Marco Enrique Mamani Sucari_Jaquelin Esther Calsina Quispe.pdf Document Marco Enrique Mamani Sucari_Jaquelin Esther Calsina Quispe.pdf (D148383233)		4
W	URL: https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/05/1096519/covid-19.pdf Fetched: 2023-01-17 03:09:00		2
W	URL: https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-51902989 Fetched: 2023-01-17 03:08:00		2
W	URL: https://www.gob.pe/institucion/presidencia/noticias/112089-gobierno-amplia-el-estado-de-emerge... Fetched: 2023-01-17 03:08:00		3
W	URL: https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/mineria-y-construccion-en-fase-1-para-reinic... Fetched: 2023-01-17 03:09:00		1
W	URL: https://andina.pe/agencia/noticia-gobierno-amplia-estado-emergencia-hasta-domingo-24-mayo-7964... Fetched: 2023-01-17 03:09:00		1
W	URL: https://www.gob.pe/institucion/munijepelacio/noticias/189135-gobierno-dispone-cuarentena-focal... Fetched: 2023-01-17 03:09:00		3
W	URL: https://www.gob.pe/institucion/pcm/noticias/321228-ejecutivo-oficializa-medidas-para-las-celeb... Fetched: 2023-01-17 03:11:00		2

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PANDEMIA POR EL
SARS CoV-2 EN LA VARIACIÓN TEMPORAL DE PM_{2.5} EN LAS
CIUDADES DE LIMA METROPOLITANA Y AREQUIPA”**

Presentado por:

ANTONIO BENJAMIN GARCIA SIERRA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado

Mg. Lucio Villa Ramos
PRESIDENTE

Dr. Alexis Nicolas Ibañez Blancas
MIEMBRO

Mg. Sc. Diego Alonso Suárez Ramos
MIEMBRO

Ph.D. Sergio Artemio Pacsi Valdivia
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

Al Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia por sus enseñanzas y su asesoría durante el desarrollo de esta tesis.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) por brindarme los datos de concentraciones de material particulado fino y variables meteorológicas de su red de monitoreo.

A la Dirección Regional de Salud de Arequipa (DIRESA) por brindarme los datos de concentraciones de material particulado fino de la red de monitoreo de Arequipa.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Contaminación atmosférica	3
2.2. Definición de material particulado atmosférico (PM)	3
2.3. Clasificación del material particulado atmosférico	4
2.3.1. Según el diámetro aerodinámico	4
2.3.2. Según la moda	5
2.3.3. Según el origen	7
2.4. Composición química del material particulado	8
2.5. Fuentes de emisión	11
2.5.1. Fuentes naturales	11
2.5.1. Fuentes antrópicas	12
2.6. Efectos en la salud y el ambiente	13
2.7. Métodos de muestreo de material particulado	17
2.7.1. Muestreadores pasivos	17
2.7.2. Muestreadores activos	17
2.7.3. Analizadores automáticos.....	18
2.7.4. Sensores remotos	20
2.8. Normativa de regulación de concentraciones de PM _{2.5}	22
2.8.1. Normativa internacional	22
2.8.2. Normativa nacional.....	23
2.9. El SARS CoV-2.....	24

2.10.	Relación entre el PM _{2.5} y el SARS CoV-2	25
2.11.	Medidas de aislamiento adoptadas por el Gobierno contra la pandemia del SARS CoV-2	28
2.11.1.	Año 2020	28
2.11.1.	Año 2021	33
III.	METODOLOGÍA	40
3.1.	Descripción del área en estudio	40
3.2.	Materiales	43
3.3.	Análisis y procesamiento de datos.....	45
3.3.1.	Análisis de la variación horaria y diaria de PM _{2.5}	46
3.3.2.	Análisis de la variación mensual y estacional de PM _{2.5}	47
3.3.3.	Determinación de la concentración diurna y nocturna de PM _{2.5}	47
3.3.4.	Evaluación de la influencia de las medidas adoptadas por el Gobierno.....	48
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1.	Variación horaria y diaria de PM _{2.5}	51
4.1.1.	Variación horaria	51
4.1.2.	Variación diaria.....	58
4.2.	Variación mensual y estacional de PM _{2.5}	68
4.2.1.	Variación mensual	68
4.2.2.	Variación estacional.....	72
4.3.	Concentración diurna y nocturna de PM _{2.5}	75
4.3.1.	Variación diaria.....	75
4.3.2.	Variación semanal.....	83
4.3.3.	Variación mensual	87
4.3.4.	Variación estacional.....	90

4.4.	Evaluación de la influencia de las medidas adoptadas en las concentraciones de $PM_{2.5}$	93
V.	CONCLUSIONES	106
5.1.	Del análisis de la variación horaria y diaria de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021	106
5.2.	Del análisis de la variación mensual y estacional de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021.....	107
5.3.	De la determinación de la concentración diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ a nivel diario, semanal, mensual y estacional en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021	108
5.4.	De la evaluación de la influencia de las medidas adoptadas debido a la pandemia del SARS CoV-2 en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa durante los años 2020 y 2021	109
VI.	RECOMENDACIONES	110
VII.	BIBLIOGRAFÍA	111
VIII.	ANEXOS	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de monitoreo.....	21
Tabla 2: Guía de calidad de aire y objetivos intermedios para PM _{2.5} para concentraciones medias a nivel anual.....	22
Tabla 3: Guía de calidad de aire y objetivos intermedios para PM _{2.5} para concentraciones medias en un período de 24 horas.....	23
Tabla 4: Estándares de calidad ambiental para el contaminante PM _{2.5}	23
Tabla 5: Características generales de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima Metropolitana y Arequipa usadas en este estudio	44
Tabla 6: Características generales de las estaciones meteorológicas de Lima Metropolitana y Arequipa usadas en este estudio	45
Tabla 7: Concentraciones medias horarias de PM _{2.5} registradas en un período de 24 horas para los años 2019 - 2021	57
Tabla 8: Estadísticos básicos pertenecientes a las variables meteorológicas para los años 2019 – 2021	67
Tabla 9: Estadísticos básicos pertenecientes a la concentración media de 24 horas de PM _{2.5} para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio	102
Tabla 10: Comparación estadística de las concentraciones medias de PM _{2.5} para el período 15 de marzo – 30 de abril de los años 2019 – 2021	103
Tabla 11: Estadísticos básicos pertenecientes a las variables meteorológicas para el período 15 de marzo – 30 de abril de los años 2019 – 2021	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diferencia en los tamaños de las partículas	4
Figura 2: Imagen modificada de la EPA (1996) acerca de la distribución del número de partículas en función del diámetro, indicando la fuente o posible origen	7
Figura 3: Ejemplo de proceso químico de formación de partículas secundarias.....	8
Figura 4: Composición química del PM _{2.5} en E.E.U.U. a nivel anual y estacional (verano e invierno) en todo el país, zona oriental y zona occidental	11
Figura 5: Aporte de contribución de cada fuente de emisión a las concentraciones de PM _{2.5} en la ciudad de Barranquilla	13
Figura 6: Los efectos de las partículas finas y ultrafinas en la salud humana por la inhalación de aire.....	16
Figura 7: Equipo muestreador de bajo volumen – Partisol 2000H	18
Figura 8: Estructura del coronavirus	24
Figura 9: Esquema resumido de las actividades económicas a retornar en el Plan de Reactivación Económica	30
Figura 10: Diagrama que distingue los distritos de cada zona de Lima Metropolitana	41
Figura 11: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima Metropolitana	42
Figura 12: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Arequipa	43
Figura 13: Variación de la concentración media horaria de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019	52
Figura 14: Variación de la concentración media horaria de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020	54
Figura 15: Variación de la concentración media horaria de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	56

Figura 16: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019	59
Figura 17: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020	60
Figura 18: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	61
Figura 19: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación Campo de Marte	62
Figura 20: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación Carabayllo.....	63
Figura 21: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación San Juan de Lurigancho.....	64
Figura 22: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación UMA2.....	65
Figura 23: Variación de la concentración media mensual de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019	69
Figura 24: Variación de la concentración media mensual de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020	70
Figura 25: Variación de la concentración media mensual de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	71
Figura 26: Variación de la concentración media estacional de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019	73
Figura 27: Variación de la concentración media estacional de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020	74
Figura 28: Variación de la concentración media estacional de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	75
Figura 29: Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019.....	76

Figura 30: Concentración media diaria diurna y nocturna de PM _{2.5} del año 2019 en las 4 estaciones de calidad de aire	76
Figura 31: Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020.....	77
Figura 32: Concentración media diaria diurna y nocturna de PM _{2.5} del año 2020 en las 4 estaciones de calidad de aire	78
Figura 33: Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021.....	79
Figura 34: Concentración media diaria diurna y nocturna de PM _{2.5} del año 2021 en las 4 estaciones de calidad de aire	79
Figura 35: Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM _{2.5} de la estación Campo de Marte	80
Figura 36: Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM _{2.5} de la estación Carabayllo.....	81
Figura 37: Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM _{2.5} de la estación San Juan de Lurigancho.....	82
Figura 38: Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM _{2.5} de la estación UMA2	83
Figura 39: Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019.....	84
Figura 40: Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020.....	85
Figura 41: Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021.....	87
Figura 42: Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019.....	88
Figura 43: Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de PM _{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020.....	89

Figura 44: Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	90
Figura 45: Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019	91
Figura 46: Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020	92
Figura 47: Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021	93
Figura 48: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación Campo de Marte en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril	95
Figura 49: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación Campo de Marte para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio.....	96
Figura 50: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación San Juan de Lurigancho en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril....	97
Figura 51: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación San Juan de Lurigancho para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio	98
Figura 52: Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación UMA2 en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril.....	100
Figura 53: Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación UMA2 para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio.....	101

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Actividades económicas que reanudaron en la fase 1 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 080-2020-PCM	130
Anexo 2: Actividades económicas que reanudaron en la fase 2 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 101-2020-PCM	132
Anexo 3: Actividades económicas que reanudaron en la fase 3 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 117-2020-PCM	135
Anexo 4: Actividades económicas que reanudaron en la fase 4 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 157-2020-PCM	138
Anexo 5: Salidas de Minitab 19 respecto a la comparación estadística de las concentraciones medias de PM _{2,5} en el período 15 de marzo – 30 de abril	140

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis de la variación temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021 y la influencia de las medidas de aislamiento establecidas por el Gobierno debido a la pandemia del SARS CoV-2 en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los años 2020 y 2021. Se utilizaron datos de concentración de $PM_{2.5}$ provenientes de SENAMHI para la ciudad de Lima Metropolitana y de la DIRESA de Arequipa para la ciudad de Arequipa. A su vez se utilizaron datos meteorológicos provenientes de SENAMHI para ambas ciudades. Se realizaron gráficos de variación temporal a diferentes escalas temporales y diagramas de cajas para las escalas diarias, diurnas y nocturnas. Asimismo, se realizaron gráficos de variación diaria para el período 15 de marzo – 30 de abril, diagramas de cajas y cálculos de estadísticos descriptivos. Los resultados mostraron que en todas las escalas temporales las concentraciones de $PM_{2.5}$ son mayores en Lima Metropolitana que en Arequipa en los tres años de estudio en donde en la primera ciudad hay más concentraciones que superan el ECA que en la segunda ciudad. Todas las concentraciones de $PM_{2.5}$ superan la guía de la OMS. A cualquier escala temporal, las concentraciones nocturnas fueron generalmente mayores que las concentraciones diurnas en el año 2019 en ambas ciudades mientras que en el año 2021 las concentraciones diurnas fueron mayores que las concentraciones nocturnas. En el período 15 de marzo – 30 de abril, las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron menores en el año 2020 que en los años 2019 y 2021 en ambas ciudades.

Palabras claves: $PM_{2.5}$, aislamiento, cuarentena, toque de queda, Lima Metropolitana y Arequipa

ABSTRACT

The temporal variation of PM_{2.5} concentrations is evaluated in two cities by this study: Metropolitan Lima and Arequipa in the years 2019 – 2021 and the influence of the social distancing policies established by the Government due to SARS CoV-2 pandemic in the PM_{2.5} concentrations in both years 2020 and 2021. PM_{2.5} concentrations data from the National Service of Meteorology and Hidrology (SENAMHI by its acronym in Spanish) for Metropolitan Lima city and PM_{2.5} concentrations data from the Regional Directorate of Environmental Health (DIRESA by its acronym in Spanish) of Arequipa for Arequipa city were used. At the same time, meteorological data from SENAMHI were used for both cities. Temporal variation graphs for different temporal scales and boxplots for daily, diurnal and nocturnal scales were made. In addition, daily variation graphs were made for the period March 15 – April 30, including boxplots and descriptive statistics calculations. The results showed that in all time scales, PM_{2.5} concentrations are higher in Metropolitan Lima than in Arequipa in the three years of study, where in the first city there are more concentrations that exceed the Environmental Quality Standards (ECA by its acronym in Spanish) of Perú than in the second city. All PM_{2.5} concentrations exceed the WHO guideline. At any time scale, nighttime concentrations were generally higher than daytime concentrations in 2019 in both cities, while daytime concentrations were higher than nighttime concentrations in 2021. In the period March 15 – April 30, PM_{2.5} concentrations were lower in 2020 than in 2019 and 2021 in both cities.

Key words: PM_{2.5}, social distancing, quarantine, curfew, Metropolitan Lima and Arequipa

I. INTRODUCCIÓN

El aire limpio es uno de los requerimientos básicos de la salud y el bienestar humano (Kumar, Tchounwou, Biswal & Tuluri, 2018). Según Mukherjee y Agrawal (2017), los estudios de salud indican que la exposición a largo plazo al material particulado tiene múltiples efectos en la salud en las personas de todos los grupos etarios. Los monitoreos de calidad de aire son necesarios para ver el estado de la calidad del aire.

La evaluación de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como su variación temporal y tendencia son significativamente importantes a partir de perspectivas ambientales y de salud. Asimismo, las tendencias temporales son también importantes para evaluar el impacto de las medidas de control y reducción de emisiones. Las condiciones meteorológicas influyen en las tendencias y variabilidad de todas las especies de aerosoles en la atmósfera. Además, las fuentes de emisión y su transporte al lugar de muestreo también son factores importantes (Sumesh, Rajeevan, Resmi & Unnikrishnan, 2017; Sanguineti et al., 2020).

La pandemia del SARS CoV-2 implicó un conjunto de medidas restrictivas tales como la cuarentena con el fin de garantizar el distanciamiento social. Estas medidas limitaron drásticamente las rutinas de las personas, alterando las condiciones ambientales en las áreas afectadas dado que muchas actividades comerciales se detuvieron y muchos empleados han pasado al trabajo remoto desde sus viviendas (Connerton et al., 2020).

En el Perú, el Gobierno implementó una serie de medidas de confinamiento para intentar frenar los contagios que causó la pandemia del SARS CoV-2 siendo las más resaltantes la cuarentena total, el cual duró 106 días, y los toques de queda. Esta última medida rigió desde el 18 de marzo de 2020 hasta finales de enero de 2022 con variaciones periódicas en los días y horarios de aplicación.

Por todo lo mencionado, en la presente investigación se evaluó la variación horaria, diaria, mensual y estacional de las concentraciones de $PM_{2.5}$, así como la variación diurna y nocturna a nivel diario, semanal, mensual y estacional de las concentraciones de $PM_{2.5}$ con la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Dirección Regional de Salud (DIRESA) de Arequipa.

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

Objetivo general:

Analizar la variación temporal de $PM_{2.5}$ y sus modificaciones por la influencia de la pandemia del SARS CoV-2 en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa durante el periodo 2019 y 2021.

Objetivos específicos:

Analizar la variación horaria y diaria de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021.

Analizar la variación mensual y estacional de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021.

Determinar la concentración diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ a nivel diario, semanal, mensual y estacional en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021.

Evaluar la influencia de las medidas adoptadas debido a la pandemia del SARS CoV-2 en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa durante los años 2020 y 2021.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica puede entenderse como la presencia de toda forma de materia en el aire que pueda ocasionar algún problema de salud o daño a las personas o de cualquier bien de la naturaleza. Ésta siempre ha estado presente de origen natural por medio de erupciones, incendios forestales, tormentas de arena, entre otros. Pero, también es causa de las actividades antropogénicas que la contaminación atmosférica se ha visto incrementada (Aránguez et al., 1999).

Por otro lado, Wark y Warner definen la contaminación atmosférica 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 humana o que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal, animal o del ambiente, de modo que interfieran con el goce de la vida, la propiedad o el ejercicio de las actividades (como se citó en Sánchez, Ortiz & Castrejón, 2014).

2.2. Definición de material particulado atmosférico (PM)

El material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire (Viana, 2003).

Por su parte, Mézaros define el material particulado atmosférico como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en la suspensión de la atmósfera. El término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (como se citó en Inza, Sánchez, Menéndez, Ortega & Gil, 2006).

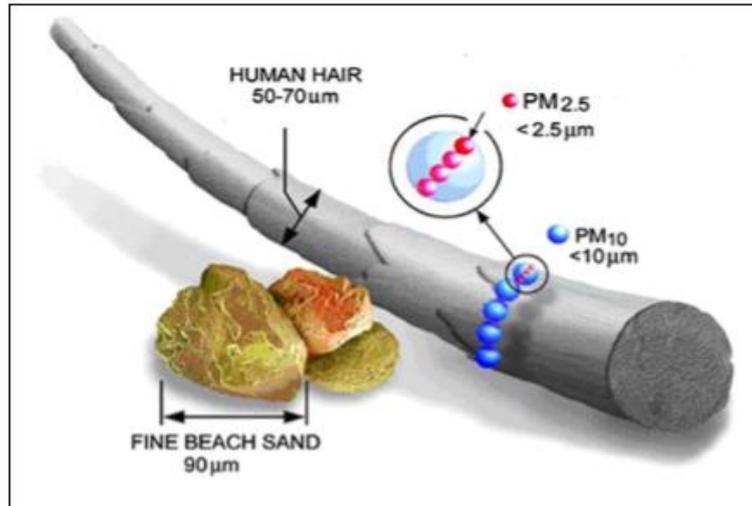


Figura 1. Diferencia entre los tamaños de las partículas. Adaptado de “Evaluación espacial y temporal del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana para el período 2015-2017” por J. Espinoza, 2018, tesis de pregrado, p. 6.

2.3. Clasificación del material particulado atmosférico

2.3.1. Según el diámetro aerodinámico

Según Gao, para fines regulatorios e investigación relacionadas a la salud de las personas, se caracteriza el tamaño de las partículas en base a su diámetro aerodinámico (diámetro de una esfera uniforme de densidad sanitaria con la misma velocidad de sedimentación terminal que la partícula de interés) (como se citó en Castelar, 2019).

a. Partículas ultrafinas

La fracción ultrafina incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a $0.1 \mu m$ ($PM_{0.1}$) (Castelar, 2019).

b. Partículas finas

La fracción fina incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) (Castelar, 2019).

c. Partículas gruesas

La fracción gruesa incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) (Castelar, 2019).

d. Partículas Totales en Suspensión (PTS)

Son aquellas partículas que comprenden un rango de tamaño entre 0.005 y $100\ \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico; sin embargo, la mayoría de las partículas presentes en la atmósfera tienen un tamaño menor a $40\ \mu\text{m}$ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2011).

2.3.2. Según la moda

Según Warneck, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) y Seinfeld & Pandis, en el intervalo de tamaño de partículas atmosféricas generalmente se identifican hasta cuatro diferentes rangos de tamaños denominados “modas” (ver Figura 2), que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas (como se citó en Pérez, 2013).

a. Moda de nucleación ($< 0.02\ \mu\text{m}$)

La mayor concentración en número de partícula se encuentra entre $5 - 15\ \text{nm}$. Los únicos precursores gaseosos con capacidad para formar partículas por nucleación homogénea en aire ambiente son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el amoníaco (NH_3). La vida media de estas partículas en la atmósfera es del orden de horas ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación (Kulmala et al., 2001). Durante episodios de contaminación por la actividad del tráfico se detecta con frecuencia la presencia de partículas de esta moda (Viana, 2003).

b. Moda Aitken ($0.02 - 0.1\ \mu\text{m}$)

Estas partículas pueden tener un origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de partículas de la moda de nucleación). La influencia de las emisiones antropogénicas

en las partículas de la moda Aitken no está bien definida actualmente (Matter, Siegmann & Burstcher, 1999).

c. Moda de acumulación (0.1 – 1 μm)

La mayor densidad de partículas se registra entre 150 – 250 nm. En la atmósfera, las partículas de la moda Aitken crecen hasta formar parte de la moda de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que tienen lugar en gotas de agua en las nubes. La transferencia de masa es máxima en la nube a pesar del escaso tiempo de reacción, debido al elevado volumen de agua y la velocidad de reacción en las nubes (Langner & Rohde, 1991). El tiempo de residencia en la atmósfera es máximo para las partículas de esta moda (Pérez, 2013).

d. Moda o fracción gruesa (> 1 μm en términos de aerosoles atmosféricos)

En términos de calidad de aire y epidemiología esta moda comprende las partículas de diámetro > 2.5 μm . La mayor parte de las partículas en esta moda se forman por procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral) o de otros materiales, o por la explosión de burbujas (*jet drops*) en la superficie de mares y océanos (aerosol marino) (Pérez, 2013).

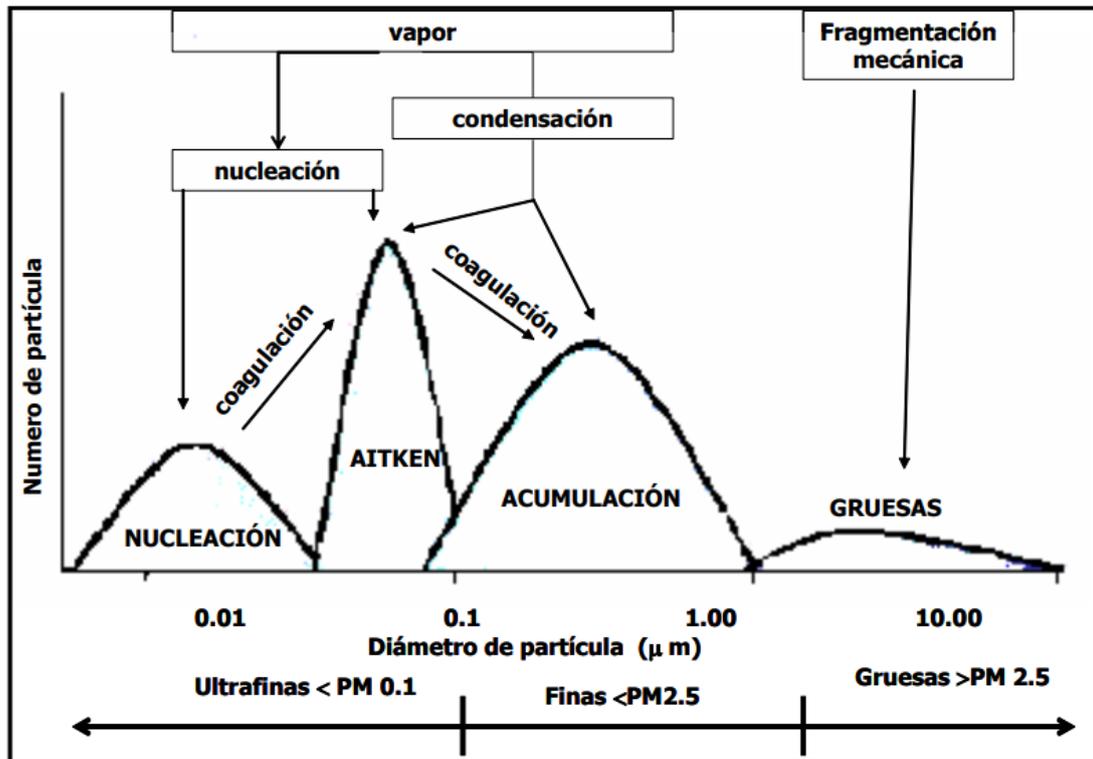


Figura 2. Imagen modificada de la EPA acerca de la distribución del número de partículas en función del diámetro, indicando la fuente o posible origen. Adaptado de “Estudio del contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales en partículas atmosféricas de diferentes diámetros aerodinámicos de La Comarca Lagunera, México” por R. Pérez, 2013, tesis doctoral, p. 4.

2.3.3. Según el origen

SEMARNAT (2011) afirma que se puede clasificar a las partículas según su origen, el cual es una de las clasificaciones más básicas de las partículas ambientales y de los demás contaminantes del aire.

a. Partículas primarias

Son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera por diversas fuentes de emisión (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

b. Partículas secundarias

Son aquellas que se generan en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos, llamados precursores. Los principales gases

precursores de las partículas son el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco (NH_3), los cuales forman partículas de sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos (SEMARNAT, 2011). La Figura 3 muestra un ejemplo de formación de este tipo de partículas.

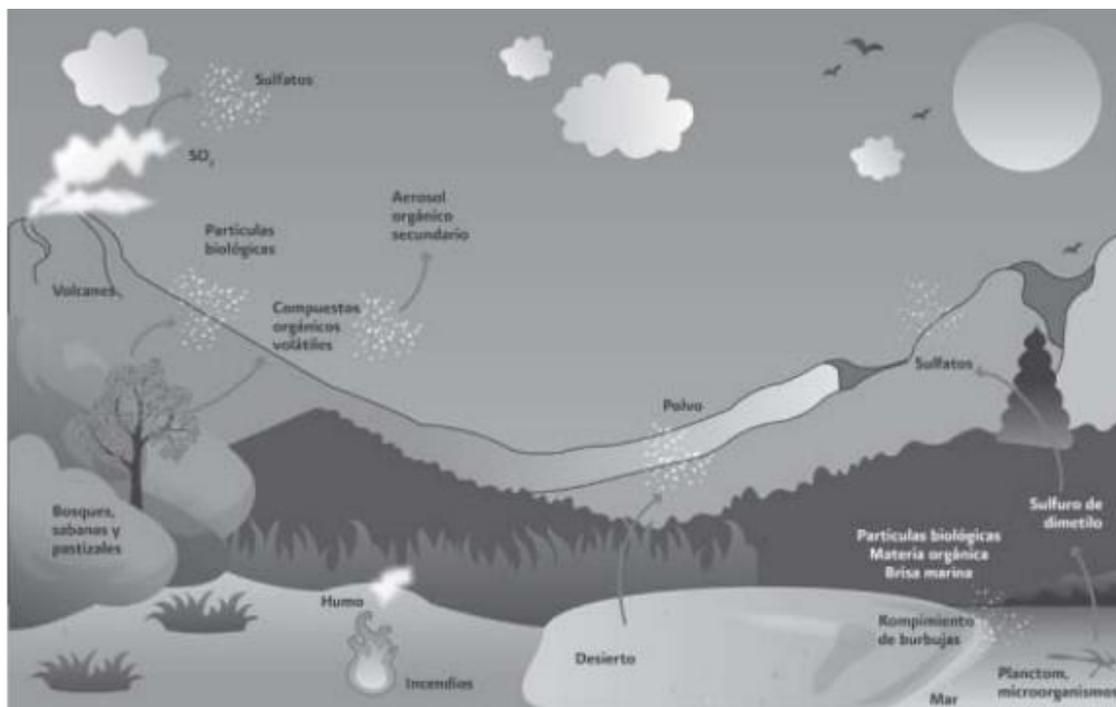


Figura 3. Ejemplo de proceso químico de formación de partículas secundarias. Adaptado de “Guía metodológica para la estimación de emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ ” por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011, p.14.

2.4. Composición química del material particulado

Según SEMARNAT (2011), la composición química de las partículas es muy diversa y depende, principalmente, tanto de la fuente emisora como del mecanismo de formación de las partículas. Se pueden encontrar tanto compuestos mayoritarios como minoritarios. Los compuestos mayoritarios generalmente conforman la mayor parte de la masa de las partículas mientras que los compuestos minoritarios pueden estar presentes adicionalmente a los compuestos mayoritarios en las partículas ambientales o formar parte de ellos. La Figura 4 muestra un ejemplo de la composición del $\text{PM}_{2.5}$ en un lugar específico. Entre los compuestos mayoritarios tenemos los siguientes:

a. Sulfatos

Son principalmente componentes secundarios que se originan de la oxidación del SO_2 , el que a su vez se origina por la combustión de combustibles que contienen alto porcentaje de azufre. También, pueden estar presentes como un componente primario derivado de la sal de los mares o de la materia mineral, como el yeso (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

b. Nitratos

La forma más común de los nitratos en las partículas suspendidas se presenta como nitrato de amonio (NH_4NO_3), compuesto que se deriva de la neutralización de vapores de ácido nítrico (HNO_3) por amoníaco (NH_3). También los nitratos pueden estar presentes como nitrato de sodio (NaNO_3) (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

c. Amonio

Los compuestos más comunes de amonio presentes en las partículas son el sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) y el nitrato de amonio (NH_4NO_3) (SEMARNAT, 2011).

d. Sodio y cloro

Principalmente se originan de la sal marina, en zonas costeras (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

e. Carbón elemental

Está constituido principalmente por carbón negro (hollín) formado durante la combustión de biomasa y combustibles fósiles (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

f. Carbón orgánico

Está presente en los compuestos orgánicos, tanto primarios, derivados de fuentes móviles o industriales, como secundarios, resultado de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

g. Componentes minerales

Se originan del material del suelo y roca por procesos de la fuerza del viento, actividades de construcción y demolición. Los suelos y las rocas son ricos en aluminio (Al), sílice (SiO₂), hierro (Fe) y calcio (Ca) (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

h. Agua

Hay componentes en las partículas ambientales, especialmente las sales como el sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄), nitrato de amonio (NH₄NO₃) y cloruro de sodio (NaCl), que pueden tomar agua de la atmósfera y convertirse en gotas líquidas. Esta agua puede representar un componente significativo de la masa de las partículas (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

Los principales compuestos minoritarios tenemos los siguientes:

a. Elementos traza

Algunos ejemplos de estos son los metales, como el titanio (Ti), vanadio (V), plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), zinc (Zn) y manganeso (Mn), los cuales pueden ser emitidos por procesos industriales. Sus concentraciones son muy pequeñas, tanto que su detección es a menudo una función de la sensibilidad del procedimiento analítico utilizado (SEMARNAT, 2011; Castelar, 2019).

b. Compuestos orgánicos traza

Hay una importante cantidad de compuestos orgánicos individuales que están presentes en muy bajas concentraciones; ejemplos de ellos son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y alifáticos, los aldehidos, los ácidos carboxílicos, las cetonas, entre otros (SEMARNAT, 2011).

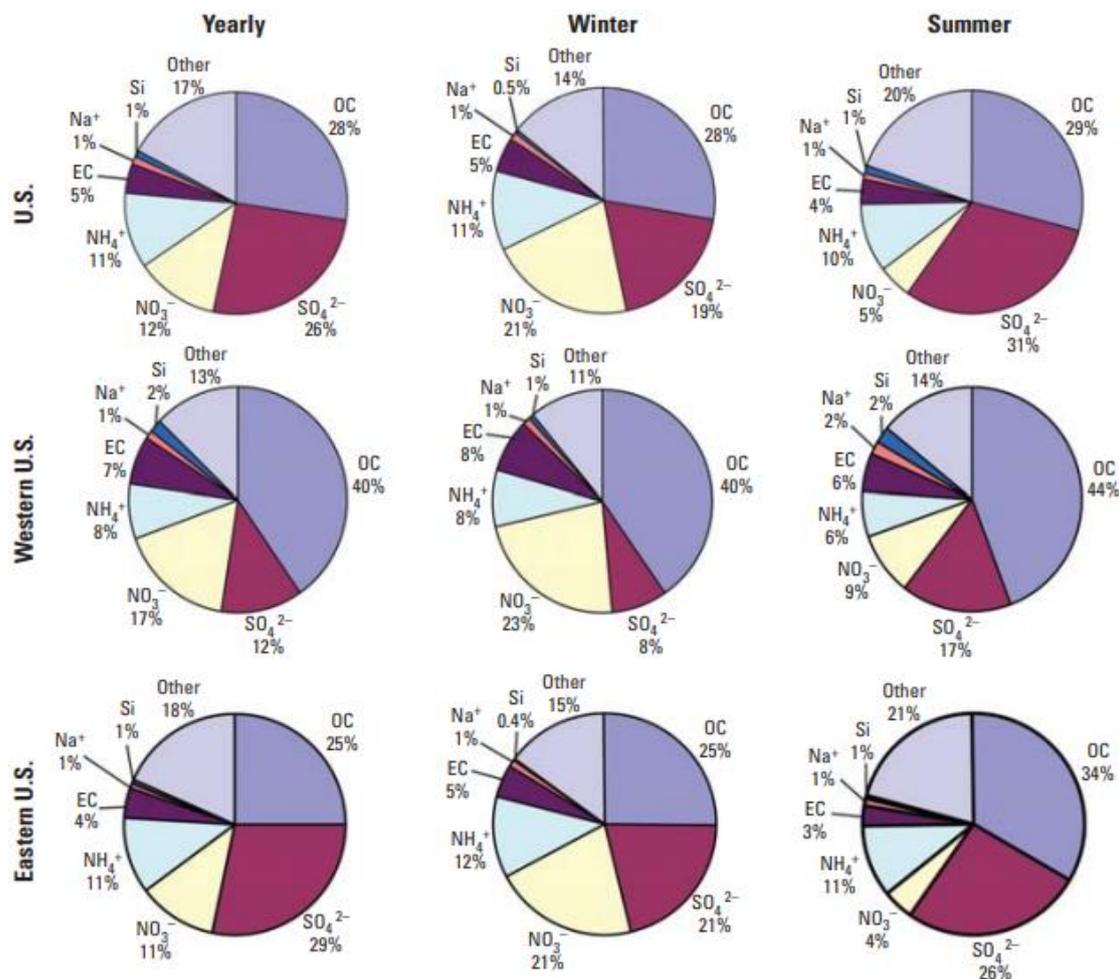


Figura 4. Composición química del PM_{2.5} en E.E.U.U. a nivel anual y estacional (verano e invierno) en todo el país, zona oriental y zona occidental. Adoptado de “Spatial and temporal variation in PM_{2.5} chemical composition in the United States for health effects studies” por M. Bell, F. Dominici, K. Ebisu, S. Zeger & J. Samet, 2007, *Environmental Health Perspectives*, 115, p. 992.

2.5. Fuentes de emisión

Según Minguillón (2007), las fuentes de emisión se clasifican en fuentes naturales y fuentes antrópicas.

2.5.1. Fuentes naturales

Son aquellas que emiten contaminantes atmosféricos sin la participación de las actividades humanas (SEMARNAT, 2011). Como principales fuentes naturales de partículas primarias destacan las emisiones fugitivas de los suelos, los aportes procedentes de transportes a larga distancia, el aerosol marino procedente de la superficie de mares y océanos y fuentes

biogénicas. Las emisiones volcánicas también son una fuente de partículas primarias, aunque su contribución a los niveles de material particulado no es significativa. Las principales fuentes naturales de gases precursores de partículas secundarias son las emisiones de SO₂ volcánicas, el dimetil sulfuro de origen biogénico marino, la transpiración de los suelos, los rayos y grandes zonas forestales que emiten vapores orgánicos debido a la transpiración de las plantas (Minguillón, 2007).

2.5.2. Fuentes antrópicas

Son aquellas emisiones generadas por las actividades humanas (SEMARNAT, 2011). Las principales fuentes antrópicas de material particulado se encuentran en zonas urbanas e industriales; destacan el tráfico, las emisiones tanto canalizadas como fugitivas derivadas de la actividad industrial (transporte, minería, cerámica, manipulación de material pulverulento al aire libre, sector energético, etc.), emisiones generadas en actividades de construcción y demolición, algunas actividades agrícolas (quema de biomasa, arado, etc.) y emisiones procedentes del sector residencial y servicios (Minguillón, 2007). Las fuentes antrópicas se clasifican en: fuentes móviles, fuentes fijas o estacionarias y fuentes de área.

a. Fuentes móviles

Son todas las fuentes motorizadas como motocicletas, vehículos con pasajeros, camiones, autobuses, maquinaria de uso agrícola, locomotoras, embarcaciones marinas, maquinaria para construcción, entre otras. Las emisiones de este tipo de fuentes son principalmente un producto de la combustión y evaporación de los combustibles utilizados, así como del desgaste tanto de los frenos como de las llantas (SEMARNAT, 2011).

b. Fuentes fijas o estacionarias

Estas fuentes se refieren a toda la instalación establecida en un solo lugar que tenga como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. En este tipo de establecimientos, las emisiones de partículas primarias pueden generarse a través de actividades de combustión o como resultado de diversos procesos que se llevan a cabo dentro de las fuentes fijas (SEMARNAT, 2011).

c. Fuentes de área

Son todos aquellos establecimientos o lugares donde se desarrollan actividades que de manera individual emiten cantidades relativamente pequeñas de contaminantes, pero que en conjunto sus emisiones representan un aporte considerable de contaminantes a la atmósfera. En esta categoría se incluyen la mayoría de los establecimientos comerciales y de servicios, como por ejemplo las panaderías, talleres de carpintería, grifos y otros (Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria [DIGESA], 2005).

La Figura 5 muestra un ejemplo de fuentes de emisión de $PM_{2.5}$ en un lugar específico.

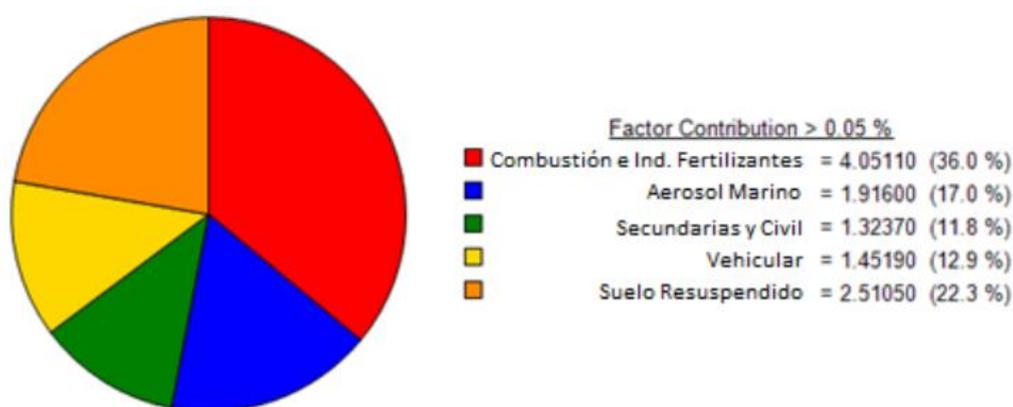


Figura 5. Aporte de contribución de cada fuente de emisión a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Barranquilla. Adaptado de “Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en la ciudad de Barranquilla, Colombia” por Y. Nuñez, 2019, tesis de maestría, p. 72.

2.6. Efectos en la salud y el ambiente

Si bien se ha reconocido cierta correlación entre la mala calidad del aire y las enfermedades humanas desde la antigüedad, los efectos de la contaminación del aire en la salud entraron en la conciencia mundial en el siglo XX (Anderson, Thundiyil & Stolbach, 2011). A principios de la década de 1990, la aplicación de estudios econométricos de series de tiempo y estudios prospectivos de cohortes sugirió una mortalidad asociada con exposiciones agudas (diarias) y crónicas (décadas) a la contaminación del aire por partículas comúnmente observadas en el mundo desarrollado (Dockery, 2009). El tamaño del efecto de la exposición a partículas - un aumento de aproximadamente 0.5 % en la mortalidad por cada incremento

de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de exposición a corto plazo a material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a $10 \mu\text{m}$ y un aumento de aproximadamente 10 % por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la exposición a largo plazo a material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ - es pequeña en comparación con otros factores de riesgo, pero la exposición es involuntaria y afecta a la población entera, lo que hace que la contaminación por material particulado sea un importante problema de salud pública (Bae & Hong, 2018). Según la Organización Mundial de la Salud, los efectos de la presencia de estos contaminantes en las personas pueden acarrear problemas en la salud de la población, desde problemas respiratorios, inflamaciones agudas, enfermedades cardiovasculares, hasta enfermedades crónicas, como el cáncer de pulmón, entre otras (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2005).

Los datos acumulados sugieren que la exposición al material particulado puede conducir a la inflamación pulmonar. La inflamación crónica es un sello distintivo de enfermedades pulmonares como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva (EPOC) y se puede agravar en los grupos susceptibles por la contaminación por material particulado (Jansen et al., 2005). Los grupos susceptibles con enfermedades pulmonares o cardíacas preexistentes, así como las personas mayores y los niños, son particularmente vulnerables. Por ejemplo, la exposición al material particulado afecta el desarrollo pulmonar, así como una tasa de crecimiento pulmonar crónicamente reducida y un déficit en la función pulmonar a largo plazo. No hay evidencia de un nivel seguro de exposición o un umbral por debajo del cual no ocurran efectos adversos para la salud. La exposición es ubicua e involuntaria, aumentando la importancia de este determinante de la salud (OMS, 2013).

La asociación entre el material particulado y las cardiopatías se observó a mediados de la década de los noventa del siglo pasado cuando se acumuló evidencia epidemiológica de una asociación entre la contaminación del aire y los ingresos hospitalarios por enfermedades cardiovasculares y se formularon las primeras hipótesis sobre el mecanismo patogénico. Actualmente, los estudios epidemiológicos han demostrado asociaciones coherentes entre los cambios diarios en las concentraciones de material particulado y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, ingresos hospitalarios, exacerbación de la enfermedad en pacientes con enfermedades cardiovasculares y respuestas fisiológicas tempranas en

individuos sanos compatibles con un deterioro del perfil de factores de riesgo. Además, se encontró evidencia de que la exposición promedio anual a $PM_{2.5}$ está asociada con mayores riesgos de mortalidad causada por cardiopatía isquémica y arritmia (Peters, 2005). Investigaciones recientes demuestran que el material particulado afecta directamente al sistema cardiovascular al entrar en la circulación sistémica. Este proceso provoca disfunción miocárdica a través de mecanismos de producción de especies reactivas de oxígeno, interferencia de iones calcio y disfunción vascular (Nelin, Joseph, Gorr & Wold, 2012).

La exposición a largo plazo a altas concentraciones de material particulado puede disminuir el volumen total del cerebro y aumentar la concentración de marcadores inflamatorios. Un estudio de Framingham Offspring examinó el cerebro de personas libres de demencia que tenían al menos 65 años y evaluó los cambios entre quienes vivían en áreas de mayor y menor concentración. Las personas expuestas a niveles más altos de material particulado mostraron un volumen cerebral total más pequeño y una mayor incidencia de infartos cerebrales encubiertos (Wright & Ding, 2016). Además, el material particulado, especialmente el $PM_{2.5}$, puede atravesar la barrera hematoencefálica y producir neuroinflamación, proceso que está relacionado con el desarrollo de diversas alteraciones cognitivas. Por ejemplo, la exposición al material particulado puede provocar un retraso en el desarrollo neurológico en la infancia temprana (Arias-Pérez et al., 2020). Estudios recientes han demostrado que el material particulado tiene implicaciones en el estrés oxidativo, la inflamación, la disfunción de órganos celulares, así como la alteración de la homeostasis de las proteínas, promoviendo la pérdida de neuronas y exagerando la carga del sistema nervioso central (SNC) (Wang, Xiong & Tang, 2017). La Figura 6 ilustra algunas enfermedades a causa del material particulado fino.

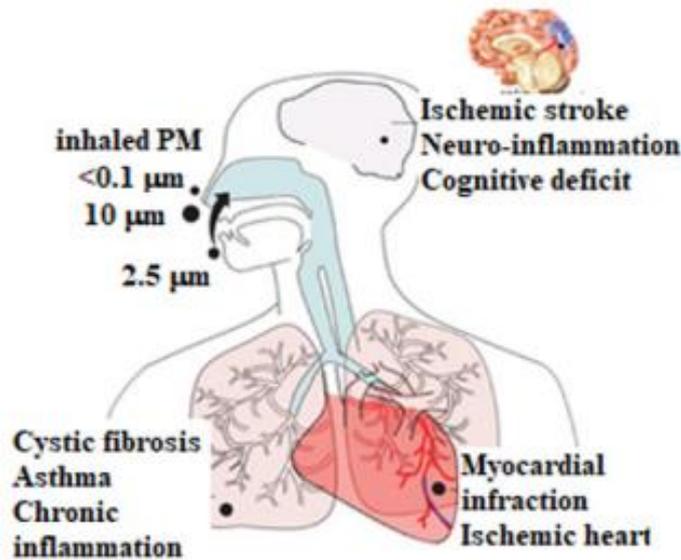


Figura 6. Los efectos de las partículas finas y ultrafinas en la salud humana por la inhalación de aire. Adaptado de “Assessments of gaseous and particulate matter emissions from biomass combustion and their effect on human health” por M. Lajili, 2019, *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 17, p. 12682.

El entorno ambiental modificado debido al material particulado en las áreas urbanas ha ejercido una profunda influencia en el estado morfológico, bioquímico y fisiológico de las plantas y sus respuestas (Rai, 2016). La exposición a una concentración de masa determinada de material particulado suspendido en el aire puede dar lugar a respuestas fitotóxicas muy diferentes, según la mezcla particular de partículas depositadas. La deposición de partículas y los efectos sobre la vegetación incluyen inevitablemente (1) nitrato y sulfato y sus asociaciones en forma de deposición ácida y acidificante y (2) elementos traza y metales pesados, incluyendo el plomo. Los polvos con $\text{pH} \geq 9$ pueden causar daño directo a los tejidos de las hojas sobre los que se depositan o indirectamente a través de la alteración del pH del suelo y los polvos que transportan sales solubles tóxicas también tendrán efectos adversos en las plantas (Prajapati, 2012). Por otro lado, según el Departamento de Protección Ambiental de Massachusetts, al igual que los seres humanos, los animales también pueden padecer de daños en su salud debido a la presencia de estos materiales contaminantes, varios estudios han mostrado que la contaminación está contribuyendo en nacimientos defectuosos, reproducción fallida y enfermedades en animales (como se citó en Betteta, 2019).

2.7. Métodos de muestreo de material particulado

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, los métodos de monitoreo se pueden dividir en cuatro tipos genéricos principales con diferentes costos y niveles de desempeño (DIGESA, 2005).

2.7.1. Muestreadores pasivos

Estos ofrecen un método simple y eficaz en función de los costos para realizar el sondeo de la calidad de aire en un área determinada. A través de la difusión molecular a un material absorbente para contaminantes específicos, se recoge una muestra integrada durante un determinado período (que generalmente varía entre una semana y un mes). Los bajos costos por unidad permiten muestrear en varios puntos del área de interés, lo cual sirve para identificar los lugares críticos donde hay una alta concentración de contaminantes, como las vías principales o las fuentes de emisión, y donde se deben realizar estudios más detallados. Para aprovechar al máximo esta técnica, se debe contar con un diseño cuidadoso del estudio y vigilar los procedimientos de aseguramiento y control de la calidad seguidos en el laboratorio durante el análisis de la muestra (DIGESA, 2005).

2.7.2. Muestreadores activos

Con estos muestreadores, las muestras de contaminantes se recolectan por medios físicos o químicos para su posterior análisis en laboratorio. Por lo general, se bombea un volumen conocido de aire a través de un colector -como un filtro (muestreador activo manual) o una solución química (muestreador activo automático)- durante un determinado período y luego se retira para el análisis. Los sistemas de muestreo, el acondicionamiento de las muestras, los sistemas de ponderación para el material particulado y los procedimientos de laboratorio son factores clave que influyen en la calidad de los datos finales (DIGESA, 2005). La Figura 7 muestra un ejemplo de muestreador activo para $PM_{2.5}$.



Figura 7. Equipo muestreador de bajo volumen – Partisol 2000H. Adaptado de “Comparación entre tres muestreadores de material particulado ($PM_{2.5}$) en el campus de la UNALM” por G. Castelar, 2019, tesis de pregrado, p. 28.

2.7.3. Analizadores automáticos

Estos pueden proporcionar mediciones de alta resolución (generalmente en promedios horarios) en un único punto para varios contaminantes criterio, así como para otros contaminantes importantes como los COV. La muestra se analiza en línea y en tiempo real, generalmente a través de métodos electro ópticos: absorción de UV o IR; la fluorescencia y la quimioluminiscencia son principios comunes de detección. Para asegurar la calidad de los datos de los analizadores automáticos, es necesario contar con procedimientos adecuados para el mantenimiento, la operación y el aseguramiento y control de calidad. Según el Ministerio del Ambiente, existen tres métodos automáticos estándar para la medición de

material particulado: atenuación de rayos beta, microbalanza oscilatoria de elemento cónico y dispersión de luz (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

a. Atenuación de rayos beta

Esta técnica se basa en la respuesta óptica de una muestra del analito a la radiación emitida por una fuente radioactiva (isótopo de C-14). De modo que, conforme vaya aumentando la masa de partículas en el filtro que contiene la muestra, irá atenuándose cada vez más el paso de la radiación beta. Esta relación es la que, finalmente, permite determinar la masa del analito, cuyo cálculo es usado posteriormente por el equipo automático para establecer su concentración en microgramos por metro cúbico (MINAM, 2019).

b. Microbalanza oscilatoria de elemento cónico

Esta técnica utiliza un filamento cónico que sostiene un filtro de 13 milímetros de diámetro, donde es colectada la muestra. Dicho filamento es sometido a una oscilación constante, cuya frecuencia se irá reduciendo conforme vaya aumentando la masa de partículas en el filtro. Esta relación inversa es la que, finalmente, permite calcular la masa del analito, la cual es usada posteriormente por el equipo automático para establecer su concentración en microgramos por metro cúbico (MINAM, 2019).

c. Dispersión de la luz

Esta técnica se basa en la respuesta de cada partícula del analito a un haz de luz emitido a la corriente de aire que ingresa al equipo automático. En específico, la respuesta de reflexión al haz de luz, permite determinar el tamaño de cada partícula en función de su ángulo de reflexión, así como la cantidad de partículas presentes en la muestra. Una vez determinado el tamaño y número de las partículas, el equipo automático procede a calcular primero la masa del analito y, luego, su concentración en microgramos por metro cúbico (MINAM, 2019).

2.7.4. Sensores remotos

Son instrumentos desarrollados recientemente que usan técnicas espectroscópicas de larga trayectoria para medir las concentraciones de varios contaminantes en tiempo real. Los datos se obtienen mediante la integración entre el detector y una fuente de luz a lo largo de una ruta determinada. Los sistemas de monitoreo de larga trayectoria pueden cumplir un papel importante en diferentes situaciones de monitoreo, principalmente cerca de las fuentes. Para obtener datos significativos con estos sistemas, es necesario contar con procedimientos adecuados para la operación, calibración y manejo de datos. Estos métodos requieren de mucha atención en la calibración de los instrumentos y el aseguramiento de la calidad para obtener datos significativos (DIGESA, 2005).

La Tabla 1 resume las ventajas y desventajas respectivas de cada método de monitoreo de calidad de aire.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de monitoreo

Método	Ventajas	Desventajas
Muestreadores pasivos	<ul style="list-style-type: none"> - Muy económicos. - Muy simples. - No dependen de cables de electricidad. - Se pueden colocar en números muy grandes. - Útiles para sondeos, mapeos y estudios de línea base. 	<ul style="list-style-type: none"> - No ha sido probado para algunos contaminantes. - Solo suministran promedios mensuales y semanales. - Requieren mano de obra intensiva para su funcionamiento y el consiguiente análisis. - No existe un método de referencia para monitorear el cumplimiento. - Lenta generación de datos.
Muestreadores activos	<ul style="list-style-type: none"> - Económicos. - De fácil manejo. - Operación y rendimiento confiables. - Cuentan con base de datos históricos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Suministran promedios diarios. - Requieren mano de obra intensiva para la recolección y análisis de muestras. - Requieren análisis de laboratorio.
Analizadores automáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Han sido debidamente probados. - Alto rendimiento. - Datos horarios. - Información en línea. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sofisticados. - Costosos. - Demandan alta calificación. - Altos costos recurrentes.
Sensores remotos	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionan datos en función de la ruta y del rango de concentración. - Útiles cerca de fuentes. - Mediciones de componentes múltiples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy sofisticados y costosos. - Soporte, operación, calibración y validación difíciles. - No comparable con mediciones puntuales. - Visibilidad atmosférica e interferencia.

Nota: Adaptado de “Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos” por Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria, 2005, p. 14.

2.8. Normativa de regulación de concentraciones de PM_{2.5}

2.8.1. Normativa internacional

A nivel internacional se tiene las guías de calidad de aire de la Organización Mundial de la Salud, los cuales establecen un valor de 5 µg/m³ a nivel anual y 15 µg/m³ para un período de 24 horas tal como se observa en las Tablas 2 y 3.

Para hacer uso de la guía de la OMS a nivel anual se debe obtener el promedio de todas las concentraciones de PM_{2.5} en todo el año y posteriormente comparar con la guía respectiva.

Tabla 2: Guía de calidad de aire y objetivos intermedios para PM_{2.5} para concentraciones medias a nivel anual

Recomendación	PM_{2.5} (µg/m³)
Objetivo intermedio 1	35
Objetivo intermedio 2	25
Objetivo intermedio 3	15
Objetivo intermedio 4	10
Guía de calidad de aire	5

Nota: Adaptado de “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide” por Organización Mundial de la Salud, 2021, p. 78.

Para hacer uso de la guía de la OMS a un período de 24 horas se debe obtener promedios para cada día del año en estudio. Posteriormente se debe comparar los promedios obtenidos con la guía respectiva asegurándose que al menos el 99% de los promedios cumplan dicho estándar.

Tabla 3: Guía de calidad de aire y objetivos intermedios para PM_{2.5} para concentraciones medias en un período de 24 horas

Recomendación	PM_{2.5} (µg/m³)
Objetivo intermedio 1	75 ^a
Objetivo intermedio 2	50 ^a
Objetivo intermedio 3	37.5 ^a
Objetivo intermedio 4	25 ^a
Guía de calidad de aire	15^a

Nota: ^aPercentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año). Adaptado de “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide” por Organización Mundial de la Salud, 2021, p. 88.

2.8.2. Normativa nacional

A nivel nacional se cuentan con los estándares de calidad ambiental establecidos por el Ministerio de Ambiente, el cual establece un valor de 25 µg/m³ a nivel anual y 50 µg/m³ para un período de 24 horas tal como se observa en la Tabla 4.

Para usar el ECA a nivel anual se debe obtener el promedio de todas las concentraciones de PM_{2.5} en todo el año y después comparar con el estándar respectivo. Por otro lado, para usar el ECA a un período de 24 horas se debe obtener promedios para cada día del año en estudio y posteriormente asegurarse de que no haya más de siete concentraciones medias que superen el ECA.

Tabla 4: Estándares de calidad ambiental para el contaminante PM_{2.5}

Parámetros	Período	Valor (µg/m³)	Criterios de evaluación	Método de análisis
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	

Nota: Adaptado de “Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias” por Ministerio de Ambiente, 2017, p. 9.

2.9. El SARS CoV-2

El nuevo coronavirus, llamado SARS CoV-2 o COVID-19, es un virus de forma redonda u ovalada y a menudo polimórfica que tiene un diámetro de 60 a 140 nm. Tiene una proteína espiga que se encuentra en la superficie del virus y forma una estructura en forma de barra siendo la estructura principal utilizada para la tipificación. También, tiene una proteína en la nucleocápside que encapsula el genoma viral y puede usarse como antígeno de diagnóstico (Pérez, Gómez & Dieguez, 2020). Su genoma está constituido por ARN de cadena sencilla, con polaridad positiva, y con una longitud aproximada de 30 000 ribonucleótidos (Díaz & Toro, 2020). La Figura 8 muestra la estructura del coronavirus.

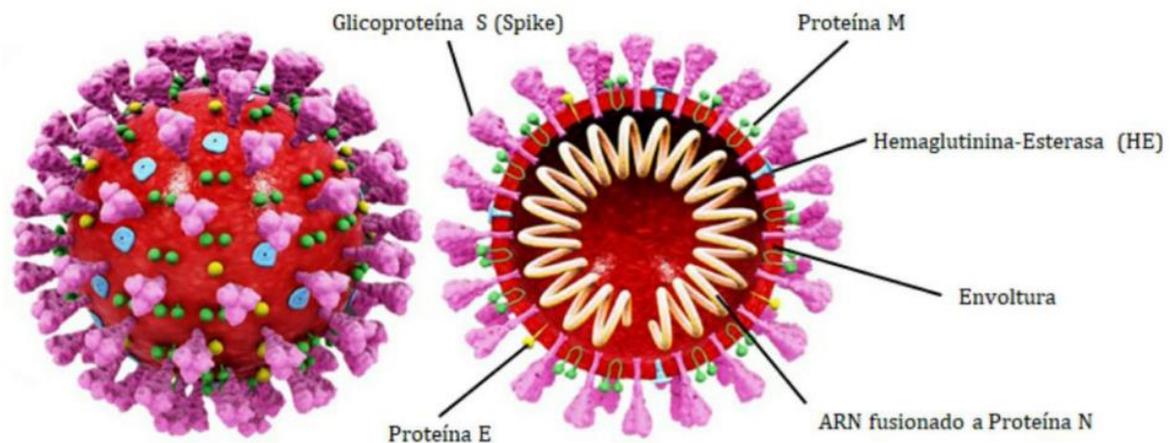


Figura 8. Estructura del coronavirus. En la parte central del virus se muestra el genoma ARN ligado a la nucleoproteína (N); en la zona periférica se encuentran los trímeros de la glicoproteína S, así como los dímeros de HE, acompañados de las proteínas de membrana (M) y las proteínas de envoltura (E). Adaptado de “El nuevo coronavirus y la pandemia del Covid-19” por C. Vargas, R. Acosta & A. Tequen, 2020, *Revista Médica Herediana*, 31, p. 126.

Los pacientes infectados con el SARS CoV-2 pueden presentar varios síntomas, tales como fiebre, tos, disnea, dolor muscular, dolor de garganta, dolor de cabeza, dolor de pecho y dolor abdominal, entre 2 y 14 días después de la exposición al nuevo coronavirus (Weng, Su & Wang, 2021). Al inicio, el SARS CoV-2 ataca principalmente el sistema respiratorio, ya que representa el principal punto de entrada en el huésped, pero también puede afectar múltiples órganos. Aunque la mayoría de los presentes no presentan síntomas o son levemente sintomáticos, algunas personas infectadas por el SARS CoV-2 experimentan una disfunción multiorgánica más grave (Villapol, 2020).

Como los otros coronavirus, el SARS CoV-2 tiene propensión a la neuroinvasión; las neuronas olfatorias se están discutiendo actualmente como una puerta de entrada para la neuroinvasión y la propagación de CoVs después de la infección de las células neuronales desde el sistema nervioso central hacia la periferia a través de una ruta transneuronal. Se han reportado casos de pacientes con alteración en su sentido del olfato, el cual puede estar relacionado a esta capacidad (Hornuss et al., 2020).

2.10.Relación entre el PM_{2.5} y el SARS CoV-2

Como se mencionó anteriormente, a raíz de la pandemia, los países del mundo adoptaron medidas restrictivas con el objetivo de garantizar el distanciamiento social. Dichas medidas restrictivas llevaron a una mejora de la calidad del aire. Asimismo, la exposición a altas concentraciones de PM_{2.5} hace más vulnerable al cuerpo humano frente al virus. A continuación, se mencionan algunos ejemplos.

Chauhan y Singh (2020) hicieron un análisis de algunas grandes ciudades en el mundo (Nueva York, Los Ángeles, Zaragoza, Roma, Dubai, Delhi, Mumbai, Beijing y Shanghai) que sufrieron severamente con el COVID-19 en la que dicho análisis mostró una disminución en las concentraciones de PM_{2.5} debido al aislamiento, principalmente por el menor movimiento de las personas para mantener el “distanciamiento social” para controlar la propagación del COVID-19 reflejando así los esfuerzos hechos en las ciudades para frenar la propagación de la infección, las cuales ocasionaron una mejora en la calidad del aire.

Ali et al. (2021) hicieron un análisis de las concentraciones de PM_{2.5} en las cuatro ciudades más importantes de Pakistán (Lahore, Islamabad, Karachi y Peshawar) mediante observaciones satelitales y terrestres. Ambos conjuntos de datos mostraron una reducción sustancial de los niveles de contaminación por PM_{2.5} (que van del 13% al 33% en el caso de las observaciones satelitales y del 23% al 58% en el caso de las observaciones terrestres) en todo Pakistán. Además, se mostró una alta tasa de propagación de COVID-19 en las ciudades más importantes de Pakistán con condiciones pobres de calidad de aire.

Mahato, Pal y Ghosh (2020) evaluaron la calidad de aire en la megaciudad Delhi con la ayuda de datos de calidad de aire de 34 estaciones de monitoreo ubicadas en toda la megaciudad en dos fases (preconfinamiento y durante el confinamiento) en la que sus resultados arrojaron que la calidad del aire durante el confinamiento mejoró significativamente. Las concentraciones de material particulado experimentaron una reducción mayor a 50% en comparación con la fase de preconfinamiento.

Ghosal y Saha (2021) examinaron la influencia de las medidas de confinamiento impuestas debido a la pandemia del COVID-19 en el nivel de concentración de $PM_{2.5}$, en las áreas estadísticas basadas en núcleos más densamente pobladas en cada uno de los 50 estados de E.E.U.U. Después de comparar el nivel de contaminantes en el período previo al confinamiento y el confinamiento en el 2020 a través de una perspectiva de análisis longitudinal y funcional, los resultados arrojaron que las diversas medidas de confinamiento implementadas en E.E.U.U. tuvieron un impacto significativo en la reducción del nivel de concentración de $PM_{2.5}$.

Chen et al. (2020) analizaron las concentraciones de $PM_{2.5}$ y de sus componentes en Shanghai antes (8 al 23 de enero del 2020) y durante (24 de enero al 8 de febrero del 2020) el período de cuarentena de la pandemia del COVID-19. Los resultados arrojaron una disminución del 44% en la concentración de $PM_{2.5}$ al final del período en la que dicha reducción se atribuyó principalmente al decrecimiento de las concentraciones de nitrato y de aerosoles primarios.

Agami y Dayan (2021) evaluaron el impacto del brote de COVID-19 en la contaminación del aire en Israel enfocándose en las ciudades de Haifa y Gran Tel-Aviv (Gush Dan), dos regiones con alta contaminación atmosférica, en la que el período evaluado fue del 8 de marzo al 2 de mayo de los años 2019 y 2020. Los resultados arrojaron una disminución promedio en las concentraciones de $PM_{2.5}$ de alrededor de 10% en Haifa y alrededor de 18% en Gran Tel-Aviv.

Yao et al. (2020) evaluaron una correlación temporal entre la tasa de letalidad del COVID-19 y el material particulado en Wuhan en la que condujeron un análisis de series de tiempo para examinar las asociaciones temporales día a día. En los resultados observaron una alta tasa de letalidad del COVID-19 con concentraciones crecientes de material particulado inhalable en una escala temporal. Esta asociación puede afectar a paciente con progresión de la enfermedad de leve a grave y afectar su pronóstico.

Zoran, Savastru R., Savastru D. y Tautan, (2021) investigaron la correlación entre el grado de difusión acelerada y la letalidad del COVID-19 y la contaminación atmosférica en la superficie (específicamente por material particulado) en el área metropolitana de Milán, región de Lombardi, Italia. Sus resultados demostraron la fuerte influencia de los niveles promedio diarios en el suelo de las concentraciones de material particulado, asociado positivamente con la temperatura promedio del aire en la superficie e inversamente relacionado con la humedad relativa del aire en el brote de casos de COVID-19 en Milán.

Diversos investigadores, han encontrado la relación $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, NO_2 y O_3 y el incremento de COVID-19, a corto plazo en la atmósfera, con el objetivo de obtener indicios sobre el control de emisiones y sus efectos en la salud de la población. Es así que se encontró, que los efectos del $PM_{2.5}$ y PM_{10} repercuten sobre la gravedad del COVID-19, ocasionando la muerte de los pacientes, si estos continuaron ante la exposición de la contaminación atmosférica y que los efectos de esta enfermedad se presentarán a largo plazo (Lanchipa, Moreno & Luque, 2020).

Las poblaciones expuestas a una alta concentración de partículas $PM_{2.5}$ son más propensas a desarrollar enfermedades respiratorias crónicas favorables a los agentes infecciosos. La exposición a largo plazo a $PM_{2.5}$ desarrolla un estímulo inflamatorio crónico, especialmente en niños y población no saludable, mientras que una exposición a corto plazo a $PM_{2.5}$ también puede aumentar la susceptibilidad a las infecciones, porque la contaminación por partículas daña las vías respiratorias, facilitando potencialmente las infecciones virales. Además, la exposición humana a los contaminantes $PM_{2.5}$ debilita la respuesta inmunológica, lo que hace que el cuerpo humano sea menos eficaz en la lucha contra las enfermedades causadas por virus (Mehmood, Saifullah, Iqbal & Abrar, 2020).

2.11. Medidas de aislamiento adoptadas por el Gobierno contra la pandemia del SARS CoV-2

2.11.1. Año 2020

El Gobierno del entonces presidente de la República Martín Vizcarra decretó el domingo 15 de marzo una cuarentena general en el país, así como el cierre de sus fronteras durante un lapso de 15 días para combatir la pandemia del nuevo coronavirus. Estas medidas implican la restricción del derecho al libre tránsito dentro del país, así como el cierre de comercios y empresas, con la excepción de bancos, farmacias y locales que vendan productos de primera necesidad (Anónimo, 2020a). El presidente anunció la emisión de un decreto de urgencia en el marco de una Declaratoria de Estado de Emergencia Nacional (Anónimo, 2020b). Esta medida fue extendiéndose periódicamente.

El día miércoles 18 de marzo empezó a imponerse un horario rígido de 8:00 pm a 5:00 am para la inmovilización social obligatoria de toda la ciudadanía a nivel nacional, coloquialmente conocido como “toque de queda”. Esta medida quedó oficializada mediante el Decreto Supremo N° 046-2020-PCM publicada pasadas las 6:00 pm del mismo día (Anónimo, 2020c; Presidencia del Consejo de Ministros [PCM], 2020a).

El día jueves 26 de marzo, el presidente anunció la extensión de la cuarentena general por 13 días más, es decir, hasta el domingo 12 de abril en una conferencia de prensa brindada a la nación. En esta extensión se mantuvo el toque de queda de 8:00 pm a 5:00 am y las demás medidas adoptadas mencionadas anteriormente (TVPerú Noticias, 2020). Sin embargo, el 30 de marzo, el presidente anunció la ampliación de la duración del toque de queda, el cual empezaría a partir de las 6:00 pm y terminaría a las 5:00 am y regiría a partir del 1 de abril (ATV Noticias, 2020).

El día jueves 2 de abril, el presidente anunció la autorización de circulación de hombres solamente los días lunes, miércoles y viernes y las mujeres solamente los días martes, jueves y sábado mientras que el domingo era de circulación prohibida tanto para hombres como para mujeres. Dicha medida estuvo vigente desde el 03 de abril hasta el 10 de abril (Fowks, 2020). Sin embargo, esta medida fracasó ya que los resultados fueron poco favorables (Bazo,

2020). El 10 de abril, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 064-2020-PCM que eliminaba esta medida, pero se mantuvo la inmovilización social obligatoria los domingos durante todo el día. Asimismo, dicho decreto modificó el horario de toque de queda, el cual ahora sería de 6:00 pm a 4:00 am (EP, 2020; PCM, 2020b).

Posteriormente, el día miércoles 8 de abril, anunció una nueva extensión de la cuarentena general hasta el domingo 26 de abril en todo el país con el fin de minimizar los efectos adversos de la enfermedad, preservar la vida de los ciudadanos, además de asegurar las acciones dirigidas a la sociedad de carácter económico y laboral (Anónimo, 2020d).

No obstante, el 25 de abril, el Poder Ejecutivo oficializó la prórroga del estado de emergencia en el país para evitar más contagios y muertes por el nuevo coronavirus en el país hasta el domingo 10 de mayo. La ampliación del estado de emergencia se oficializó mediante el Decreto Supremo N° 075-2020-PCM y fue publicado en El Peruano. Con dicha prórroga se continuaron con las disposiciones de aislamiento e inmovilizaciones obligatorias en todo el país (Anónimo, 2020e; PCM, 2020c).

Siendo ya necesario el retorno de las actividades económicas, el presidente lanzó un plan para la reactivación económica que comprendió de cuatro fases estimando que cada fase de reactivación económica duraría aproximadamente un mes (Anónimo, 2020f). La Figura 9 muestra un resumen de las actividades a retornar en cada fase de reactivación económica.

Informe de situación



Figura 9. Esquema resumido de las actividades económicas a retornar en el Plan de Reactivación Económica. Adaptado de “Minería y construcción en Fase 1 para reinicio de actividades” por F. Castro, 2020, Rumbo minero

El 2 de mayo, el Gobierno oficializó la reanudación de forma gradual de 27 actividades en cuatro sectores económicos en la que estos rubros debían incorporar los protocolos necesarios para prevenir contagios y minimizar el riesgo de un repunte del coronavirus. Dicha orden fue oficializada a través del Decreto Supremo N° 080-2020-PCM que fue publicado un día después (Mag, 2020; PCM, 2020d). Dichas actividades se encuentran detalladas en el Anexo 1.

Después de iniciar la Fase 1 de reactivación económica, el viernes 8 de mayo, el presidente anunció una nueva ampliación de la cuarentena hasta el domingo 24 de mayo orientada a contener el avance del nuevo coronavirus en el país argumentando que la tasa de contagios bajó de tres a uno y que el gran reto era bajarla aún más (Anónimo, 2020h). Dicha medida quedó estipulada en el Decreto Supremo N° 083-2020-PCM, el cual también estableció que el horario de toque de queda sería ahora desde las 8:00 pm hasta las 4:00 am en todo el país, con excepción de las regiones Piura, Tumbes, Lambayeque, La Libertad y Loreto, en los que el horario de toque de queda sería desde las 4:00 pm hasta las 4:00 am (PCM, 2020e).

Posteriormente, el viernes 22 de mayo, el presidente anunció la prolongación de la cuarentena hasta el 30 de junio prorrogando así por quinta vez consecutiva la cuarentena iniciada el 16 de marzo. En esta prórroga se cambió el horario de toque de queda en la que ahora sería de 9:00 pm a 4:00 am en casi todo el país con la excepción de 8 regiones (Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Loreto, Ucayali, Ica y 3 provincias de Ancash) cuyo horario se mantenía desde las 6:00 pm (Calle, 2020). Esta fue la última prórroga de la cuarentena general.

El jueves 4 de junio, el Gobierno aprobó el inicio de la Fase 2 de reactivación económica ante el COVID-19, y con ello, desde el viernes 5 de junio, las disposiciones del Decreto Supremo N° 101-2020-PCM que fue publicado el sábado 6 de junio en Edición Extraordinaria del Diario Oficial El Peruano entraron en vigencia (Anónimo, 2020i; PCM, 2020f). Las actividades estipuladas se encuentran detalladas en el Anexo 2.

El viernes 26 de junio, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 116-2020-PCM que indicaba el levantamiento de la cuarentena general y el pase a una cuarentena focalizada en la que los menores de 14 años, mayores de 65 años y personas que presenten comorbilidades continuarían en aislamiento social obligatorio con las excepciones señaladas en dicho decreto. Asimismo, se mantuvo el toque de queda desde las 10:00 pm hasta las 4:00 am. Sin embargo, 7 regiones (Arequipa, Ica, Junín, Huánuco, San Martín, Madre de Dios y Áncash) siguieron en aislamiento social obligatorio con horario de toque de queda desde las 8:00 pm hasta las 4:00 am. Además, se levantó el aislamiento social obligatorio los días domingo (Bocanegra, 2020; PCM, 2020g).

El martes 30 de junio, el Gobierno publicó el Decreto Supremo N° 117-2020-PCM que aprobaba la reanudación de las actividades de la Fase 3 de reactivación económica, cuya implementación inició a partir del 1 de julio a nivel nacional, con la excepción de las actividades que se desarrollaban en las zonas urbanas de Arequipa, Ica, Junín, Huánuco, San Martín, Madre de Dios y Ancash. La reanudación de las actividades en estas zonas podía ser autorizada mediante Resolución Ministerial del sector competente (Anónimo, 2020j; PCM, 2020h). Las actividades estipuladas se encuentran detalladas en el Anexo 3.

El sábado 25 de julio, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 129-2020-PCM que estableció cuarentena en las regiones de Arequipa, Ica, Junín, Huánuco, San Martín, Madre de Dios, Áncash, Cajamarca (solamente las provincias de Cajamarca, Jaén y San Ignacio) y Cusco (solamente la provincia La Convención) en la que se mantuvo el horario de toque de queda de 8:00 pm a 4:00 am de lunes a sábado y todo el día los días domingo (PCM, 2020i).

El miércoles 12 de agosto, el presidente anunció nuevamente en una conferencia de prensa la implementación del toque de queda los domingos con el fin de evitar un rebrote de contagios de COVID-19 (France 24, 2020). Además, se emitió el Decreto Supremo N° 139-2020-PCM en el que especificó que horario de toque de queda de lunes a sábado sería de 10:00 pm a 4:00 am para áreas que no están en cuarentena mientras que en las áreas de cuarentena sería de 8:00 pm a 4:00 am. Una de las áreas en cuarentena fue la región de Arequipa (PCM, 2020j).

El viernes 28 de agosto, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 146-2020-PCM que estableció cuarentena para 18 regiones. Dicho confinamiento se llevó a cabo en todas las provincias para 4 regiones y solo en algunas provincias para las otras 14 regiones en las que en este grupo se encontraba la región Arequipa, cuyas provincias fueron Camaná, Islay, Cailloma y Castilla (PCM, 2020k).

El jueves 17 de septiembre, el presidente anunció en una conferencia de prensa la eliminación de la inmovilización social obligatoria los días domingo y la reducción del horario del toque de queda, el cual sería ahora desde las 11:00 pm hasta las 4:00 am. Dichas medidas entraron en vigor el domingo 21 de septiembre (Perú 21, 2020).

El sábado 26 de septiembre, el Gobierno publicó el Decreto Supremo N° 157-2020-PCM, mediante el cual estableció la aprobación e implementación de la Fase 4 de reactivación económica. Dicha implementación rigió a partir del jueves 1 de octubre, a nivel nacional, con excepción de las actividades que se desarrollaban en las zonas urbanas de las provincias declaradas en cuarentena focalizada, las cuales esta vez solo eran: Abancay, Huamanga y Huánuco. Sin embargo, la reanudación de las actividades en dichas zonas podía ser

autorizada mediante Resolución Ministerial del sector competente (Anónimo, 2020k; PCM, 2020l). Las actividades estipuladas se encuentran detalladas en el Anexo 4.

El lunes 5 de octubre, el presidente anunció en una conferencia de prensa la autorización de personas mayores de 65 años a salir de manera interdiaria (RPP Noticias, 2020). Dicha autorización quedó expresa en el Decreto Supremo N° 165-2020-PCM, el cual autoriza también a las personas con comorbilidades a salir recomendando a estas y a las personas mayores de 65 años salir con el debido cuidado (PCM, 2020m).

El domingo 29 de noviembre, el entonces presidente Francisco Sagasti emitió el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM en el cual flexibilizó el horario del toque de queda siendo ahora desde las 12:00 am hasta las 4:00 am de lunes a domingo (Anónimo, 2020l; PCM, 2020n).

El miércoles 16 de diciembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N°194-2020-PCM en la que oficializó la restricción del uso de vehículos particulares a nivel nacional durante 24, 25 y 31 de diciembre del 2020, así como el 1 de enero del 2021 (Oficina de Prensa e Imagen Institucional, 2020; PCM, 2020ñ).

El miércoles 30 de diciembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 206-2020-PCM que modificaba el horario del toque de queda en las regiones de Arequipa, Ica, Moquegua, Tacna, La Libertad, Lambayeque, Piura, Tumbes, Áncash (provincia de Santa), Junín y Huánuco. En estas regiones el horario de toque de queda sería de 10:00 pm a 4:00 am. Por otro lado, en Lima y Callao el horario de toque de queda sería de 11:00 pm a 4:00 am. Asimismo, se dispuso el cierre de playas en todas las regiones costeras (Anónimo, 2020m; PCM, 2020o).

2.11.2. Año 2021

El miércoles 13 de enero, la entonces presidente del Consejo de Ministros Violeta Bermúdez anunció cambios en el horario de toque de queda según los tres Niveles de Alerta (Nivel de Alerta Moderado, Nivel de Alerta Alto y Nivel de Alerta Muy Alto). La región de Arequipa

y la provincia de Lima Metropolitana fueron ubicadas en el Nivel de Alerta Alto en la que el toque de queda sería ahora desde las 9:00 pm hasta las 4:00 am (Digital Noticias, 2021). Dicha medida fue oficializada a través del Decreto Supremo N° 002-2021-PCM, el cual entró en vigor el viernes 15 de enero (PCM, 2021a).

El martes 26 de enero, el presidente brindó un mensaje a la nación anunciando que 10 regiones entrarían en cuarentena a partir del domingo 31 de enero (Anónimo, 2021a). Dicha medida fue oficializada en el Decreto Supremo N° 008-2021-PCM, el cual estableció esta vez cuatro Niveles de Alerta (Nivel de Alerta Moderado, Nivel de Alerta Alto, Nivel de Alerta Muy Alto y Nivel de Alerta Extremo). Solamente las regiones que se encontraban en el Nivel de Alerta Extremo entrarían en cuarentena. Toda la región de Lima se encontraba en este Nivel de Alerta. Asimismo, las otras regiones que se encontraban en los otros Niveles de Alerta solo tuvieron una variación en el horario de toque de queda. La región de Arequipa se encontraba en el Nivel de Alerta Muy Alto, el cual establecía el horario de toque de queda desde las 9:00 pm hasta las 4:00 am. Además, se dispuso la prohibición de autos particulares durante todos los días para las regiones en Nivel de Alerta Extremo y solamente sábados y domingos para las regiones en Nivel de Alerta Muy Alto (PCM, 2021b).

El sábado 13 de febrero, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 023-2021-PCM oficializando así la ampliación de la cuarentena en 32 provincias que fueron clasificadas en el Nivel de Alerta Extremo (Anónimo, 2021b). En dicho decreto se mantuvo a la provincia de Lima Metropolitana en el Nivel de Alerta Extremo, pero se incluyó a 4 provincias de la región de Arequipa (Arequipa, Camaná, Islay y Caylloma). Además, se mantuvo la prohibición de autos particulares durante todos los días para las regiones en Nivel de Alerta Extremo y solamente sábados y domingos para las regiones en Nivel de Alerta Muy Alto (PCM, 2021c).

El miércoles 24 de febrero, la presidente del Consejo de Ministros anunció en una conferencia de prensa el levantamiento de la cuarentena en las provincias con Nivel de Alerta Extremo y la imposición de toques de queda a partir de las 9:00 pm hasta las 4:00 am de lunes a sábado y todo el día los domingos. Dichas medidas entraron en vigor desde el 1 de marzo hasta el 14 de marzo. La provincia de Lima Metropolitana se mantuvo en el Nivel de

Alerta Extremo y toda la región de Arequipa pasó a Nivel de Alerta Muy Alto en la que las provincias que se encontraban en este Nivel de Alerta tendrían el mismo horario de toque de queda que las provincias en Nivel de Alerta Extremo con la diferencia de que sería de lunes a domingo (Noticias Perú, 2021). Asimismo, se dispuso la prohibición del uso de vehículos particulares los domingos en las provincias con Niveles de Alerta Alto, Muy Alto y Extremo. Dicha medida fue oficializada el viernes 26 de febrero a través del Decreto Supremo N° 036-2021-PCM (PCM, 2021d).

El viernes 12 de marzo, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 046-2021-PCM en la que movió a la provincia de Lima Metropolitana a Nivel de Alerta Muy Alto y mantuvo a la provincia de Arequipa en ese mismo Nivel de Alerta. En el mencionado Nivel de Alerta, los toques de queda siguieron siendo en el mismo horario y en los mismos días. Dicha medida entró en vigencia desde el 15 de marzo hasta el 28 de marzo. Además, se mantuvo la prohibición del uso de vehículos particulares los domingos (PCM, 2021e).

El miércoles 17 de marzo, el Gobierno anunció un conjunto de medidas extraordinarias para que se cumplan durante la Semana Santa 2021 con el objetivo de que no se incremente el número de contagios en el país (Anónimo, 2021c). Los días jueves 1, viernes 2, sábado 3 y domingo 4 de abril solo se permitieron salidas peatonales o en bicicleta para hacer compras de productos de primera necesidad. Asimismo, se prohibió el uso de vehículos particulares para esos días (Anónimo, 2021d). Dicha medida quedó oficializada a través del Decreto Supremo N° 058-2021-PCM el viernes 26 de marzo (PCM, 2021f).

El martes 30 de marzo, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 059-2021-PCM en el que autorizaba la circulación de vehículos particulares, a nivel nacional, exclusivamente para trasladarse a ejercer el derecho de sufragio en las elecciones generales del 11 de abril (PCM, 2021g).

El viernes 16 de abril, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 076-2021-PCM, el cual movió a la provincia de Lima Metropolitana a un Nivel de Alerta Extremo estableciendo así nuevamente toque de queda los domingos durante todo el día. La región de Arequipa se

mantuvo en Nivel de Alerta Muy Alto con la excepción de la provincia de Caylloma. Se mantuvo la prohibición de los vehículos particulares los domingos. Dicha medida rigió hasta el domingo 9 de mayo (PCM, 2021h).

El viernes 7 de mayo, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 092-2021-PCM en el que movió a la región de Lima a un Nivel de Alerta Muy Alto eliminando así nuevamente el toque de queda los domingos. Por su parte, la región de Arequipa se mantuvo en el Nivel de Alerta Muy Alto, pero esta vez con la excepción de la provincia de Islay. Se mantuvo la prohibición de los vehículos particulares los domingos. Esta medida estuvo vigente hasta el domingo 30 de mayo (PCM, 2021i).

El miércoles 26 de mayo, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 105-2021-PCM en el que mantuvo a la región de Lima en un Nivel de Alerta Muy Alto y también a la región de Arequipa con la excepción de las provincias de Caylloma e Islay manteniéndose así los toques de queda de 9:00 pm a 4:00 am de lunes a domingo y la prohibición de los vehículos particulares los domingos. Además, se autorizó la circulación de vehículos particulares, a nivel nacional, exclusivamente para trasladarse a ejercer el derecho de sufragio en las elecciones generales del 6 de junio. Dicha medida fue programada para regir hasta el domingo 20 de junio (PCM, 2021j). No obstante, hubo un cambio el viernes 11 de junio. El Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 117-2021-PCM que movió tres provincias de Arequipa al Nivel de Alerta Extremo las cuales son Arequipa, Caravelí y Castilla siendo ahora 5 provincias de la región de Arequipa que se encontraban en el Nivel de Alerta Extremo en las que tendrían toque de queda los domingos durante todo el día. Dicha medida rigió desde el lunes 14 de junio hasta el domingo 20 de junio (PCM, 2021k).

El viernes 18 de junio, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 123-2021-PCM en el que movió una provincia de Arequipa al Nivel de Alerta Extremo la cual es la provincia de Camaná siendo ahora 6 provincias de la región de Arequipa que se encontraban en el Nivel de Alerta Extremo en las que se mantendría el toque de queda de 9:00 pm a 4:00 pm de lunes a sábado y durante todo el día los domingos. Por otro lado, se movió a la región de Lima al Nivel de Alerta Alto flexibilizando así el horario de toque de queda siendo ahora de lunes a domingo de 11:00 pm a 4:00 am. Se mantuvo la prohibición de los vehículos particulares los

domingos. Dicha medida rigió desde el lunes 21 de junio hasta el domingo 11 de julio (PCM, 2021l).

El viernes 9 de julio, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 131-2021-PCM en el que ubicó a toda la región de Arequipa en el Nivel de Alerta Muy Alto flexibilizando así su horario de toque de queda en la que ahora sería de 10:00 pm a 4:00 am de lunes a domingo. Además, se mantuvo a la región de Lima en el Nivel de Alerta Alto, pero también se flexibilizó el horario de toque de queda en la que ahora sería de 12:00 am a 4:00 am de lunes a domingo. Asimismo, se eliminó la prohibición del uso de vehículos particulares los domingos para las regiones que se encontraban en este Nivel de Alerta, pero se mantuvo para las regiones que se encontraban en un Nivel de Alerta Muy Alto y Extremo. Dicha medida fue programada para regir desde el lunes 12 de julio hasta el domingo 8 de agosto, pero solo rigió hasta el domingo 25 de julio (PCM, 2021m).

El viernes 23 de julio, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 144-2021-PCM en el que mantuvo a la región de Arequipa en el Nivel de Alerta Muy Alto y a la provincia de Lima Metropolitana en el Nivel de Alerta Alto manteniéndose así los horarios de toque de queda respectivos y la prohibición de uso de vehículos particulares para los Niveles de Alerta respectivos. El resto de provincias de la región de Lima se movieron al Nivel de Alerta Moderado. Dicha medida estuvo vigente desde el lunes 26 de julio hasta el domingo 22 de agosto (PCM, 2021n).

El domingo 22 de agosto, el Gobierno, esta vez al mando del presidente Pedro Castillo, emitió el Decreto Supremo N° 149-2021-PCM en el que se movió a las provincias de Lima Metropolitana y Arequipa al Nivel de Alerta Moderado en la que el horario de toque de queda seguiría siendo desde las 12:00 am hasta las 4:00 am y eliminándose también la prohibición de los vehículos particulares los domingos en estas dos provincias. Dicha medida estuvo vigente desde el lunes 23 de agosto hasta el domingo 5 de septiembre (PCM, 2021ñ).

El viernes 3 de septiembre, el Gobierno informó que el toque de queda en Lima y Callao sería solo de tres horas (Anónimo, 2021e). Esta medida quedó oficializada a través del

Decreto Supremo N° 151-2021-PCM. Solamente 14 provincias fueron ubicadas en el Nivel de Alerta Alto mientras que el resto en el Nivel de Alerta Moderado. En este Nivel de Alerta el horario de toque de queda pasó a ser de 1:00 am a 4:00 am mientras que en el Nivel de Alerta Alto pasó a ser de 11:00 pm a 4:00 am. Se eliminó completamente la prohibición de los vehículos particulares. Dicha medida entró en vigencia desde el lunes 6 de septiembre hasta el domingo 19 de septiembre (PCM, 2021o).

El jueves 16 de septiembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 152-2021-PCM en el que ubicaba solamente a 2 provincias en el Nivel de Alerta Alto y al resto en el Nivel de Alerta Moderado manteniéndose los horarios de toque de queda para cada Nivel de Alerta. Dicha medida rigió desde el lunes 20 de septiembre hasta el domingo 3 de octubre (PCM, 2021p).

El viernes 1 de octubre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 159-2021-PCM en el que ubicaba a todas las provincias del Perú en el Nivel de Alerta Moderado y mantenía los horarios de toque de queda estipulados en el Decreto Supremo N° 152-2021-PCM. Cabe recalcar que el horario de toque de queda en el Nivel de Alerta Moderado era de 1:00 am a 4:00 am. Dicha medida estuvo vigente desde el lunes 4 de octubre hasta el domingo 17 de octubre (PCM, 2021q).

El miércoles 13 de octubre, el entonces ministro de Salud Hernando Cevallos anunció en una conferencia de prensa una modificación del horario de toque de queda, el cual sería ahora de 2:00 am a 4:00 am (ATV Noticias, 2021). Dicha medida quedó oficializada en el Decreto Supremo N° 163-2021-PCM en el que mantuvo a todas las provincias del Perú en el Nivel de Alerta Moderado. Cabe precisar que el horario de toque de queda anunciado por el ministro de Salud fue solamente para el Nivel de Alerta Moderado. Dicha medida rigió desde el lunes 18 de octubre hasta el domingo 31 de octubre (PCM, 2021r).

El viernes 29 de octubre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 167-2021-PCM en el que mantenía el horario de toque de queda de 2:00 am a 4:00 am (Anónimo, 2021f). Dicho decreto especificaba que ese horario solo era para las provincias en Nivel de Alerta

Moderado, en las cuales se mantuvo a las regiones de Lima y Arequipa. Dicha medida estuvo vigente desde el lunes 1 de noviembre hasta el domingo 14 de noviembre (PCM, 2021s).

El sábado 13 de noviembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 168-2021-PCM en el que mantuvo a las provincias de Lima Metropolitana y Arequipa en el Nivel de Alerta Moderado con el horario de toque de queda de 2:00 am a 4:00 am. Dicha medida entró en vigencia desde el lunes 15 de noviembre hasta el domingo 28 de noviembre (PCM, 2021t).

El sábado 27 de noviembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 174-2021-PCM en el que mantuvo nuevamente a las provincias de Lima Metropolitana y Arequipa en el Nivel de Alerta Moderado con el horario de toque de queda de 2:00 am a 4:00 am. Dicha medida rigió desde el lunes 29 de noviembre hasta el domingo 12 de diciembre (PCM, 2021u).

El jueves 9 de diciembre, el Gobierno emitió el Decreto Supremo N° 179-2021-PCM en el que mantuvo una vez más a las provincias de Lima Metropolitana y Arequipa en el Nivel de Alerta Moderado con el horario de toque de queda de 2:00 am a 4:00 am. Además, estableció excepcionalmente toque de queda de 1:00 am a 4:00 am los días sábado 25 de diciembre del 2021 y 1 de enero del 2022 en las provincias de Nivel de Alerta Moderado. Dicha medida fue programada para regir hasta el domingo 2 de enero del 2022, pero fue modificada el jueves 23 de diciembre (PCM, 2021v).

El ministro de Salud anunció el cambio del horario de toque de queda para las fiestas de Navidad y Año Nuevo, el cual sería a partir de las 11:00 pm del 24 y 31 de diciembre y no a la 1:00 am del 25 de diciembre y 1 de enero. Esta modificación fue hecha con el argumento de evitar las reuniones sociales y aglomeraciones (Anónimo, 2021g). Dicha medida fue estipulada en el N° 186-2021-PCM, el cual también mantuvo otra vez a las provincias de Lima Metropolitana y Arequipa en el Nivel de Alerta Moderado con el horario de toque de queda de 2:00 am a 4:00 am (PCM, 2021w).

III.METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área en estudio

Sobre Lima Metropolitana se tiene lo siguiente:

Es la capital del Perú. Se ubica en la costa central. Limita al oeste con la provincia constitucional del Callao y el Océano Pacífico; al norte con la provincia de Huaral, al este con la provincia de Canta y provincia de Huarochirí, al sur con la provincia de Cañete. Esta región es el área metropolitana más grande, extensa y poblada del país. Debido a su ubicación geográfica tiene un clima húmedo, la temperatura promedio en todo el año es 18 °C.

Representa cerca del 28% de la población nacional, seguida de Arequipa con el 2.7% y Trujillo con el 2.5%, cuenta con la mayor concentración urbana del país, lo que ha obligado a establecer mecanismos de gestión territorial; es así que Lima viene configurando como una región con cuatro centros (centro, sur, este y norte) (Sistema Nacional de Evaluación, Acreditación y Certificación de la Calidad Educativa, 2020).

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2014) distingue cuatro zonas en la provincia de Lima Metropolitana. La Figura 10 detalla los distritos que pertenecen a cada zona.

Lima Norte	Lima Este	Lima Centro	Lima Sur
<ul style="list-style-type: none"> • Ancón • Carabaylo • Comas • Independencia • Los Olivos • Puente Piedra • San Martín de Porres • Santa Rosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Ate • Chaclacayo • Cieneguilla • El Agustino • La Molina • Lurigancho • San Juan de Lurigancho • San Luis • Santa Anita 	<ul style="list-style-type: none"> • Barranco • Breña • Jesús María • La Victoria • Lima Cercado • Lince • Magdalena del Mar • Miraflores • Pueblo Libre • Rímac • San Borja • San Isidro • San Miguel • Santiago de Surco • Surquillo 	<ul style="list-style-type: none"> • Chorrillos • Lurín • Pachacámac • Pucusana • Punta Hermosa • Punta Negra • San Bartolo • San Juan de Miraflores • Santa María del Mar • Villa El Salvador • Villa María del Triunfo

Figura 10. Diagrama que distingue los distritos de cada zona de Lima Metropolitana. Adaptado de “Una mirada a Lima Metropolitana” por el Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2014, p. 9.

Acerca de Arequipa se tiene lo siguiente:

Se ubica en la parte central y occidental de América del Sur, en una posición centrada respecto a la macrorregión sur del Perú y en el extremo sureste del departamento de Arequipa. Su capital es la ciudad de Arequipa, ubicada en el distrito del mismo nombre.

El ámbito territorial de la provincia de Arequipa tiene una extensión aproximada de 9 689.06 km² representando el 16.5% del área del total del departamento de Arequipa y el 0.81% del área total nacional. Su población es de 969 284 habitantes, lo que la ubica como la provincia que concentra la mayor cantidad de pobladores en el departamento de Arequipa (Municipalidad Provincial de Arequipa, 2016).

En la ciudad de Lima Metropolitana se utilizarán 3 estaciones de la red de SENAMHI (Carabaylo, Campo de Marte y San Juan de Lurigancho) en donde el monitoreo de calidad de aire se realiza con equipos automáticos. Asimismo, en la ciudad de Arequipa se utilizará una estación de la DIRESA de Arequipa (UMA2) cuyo monitoreo también se lleva a cabo con equipos automáticos.

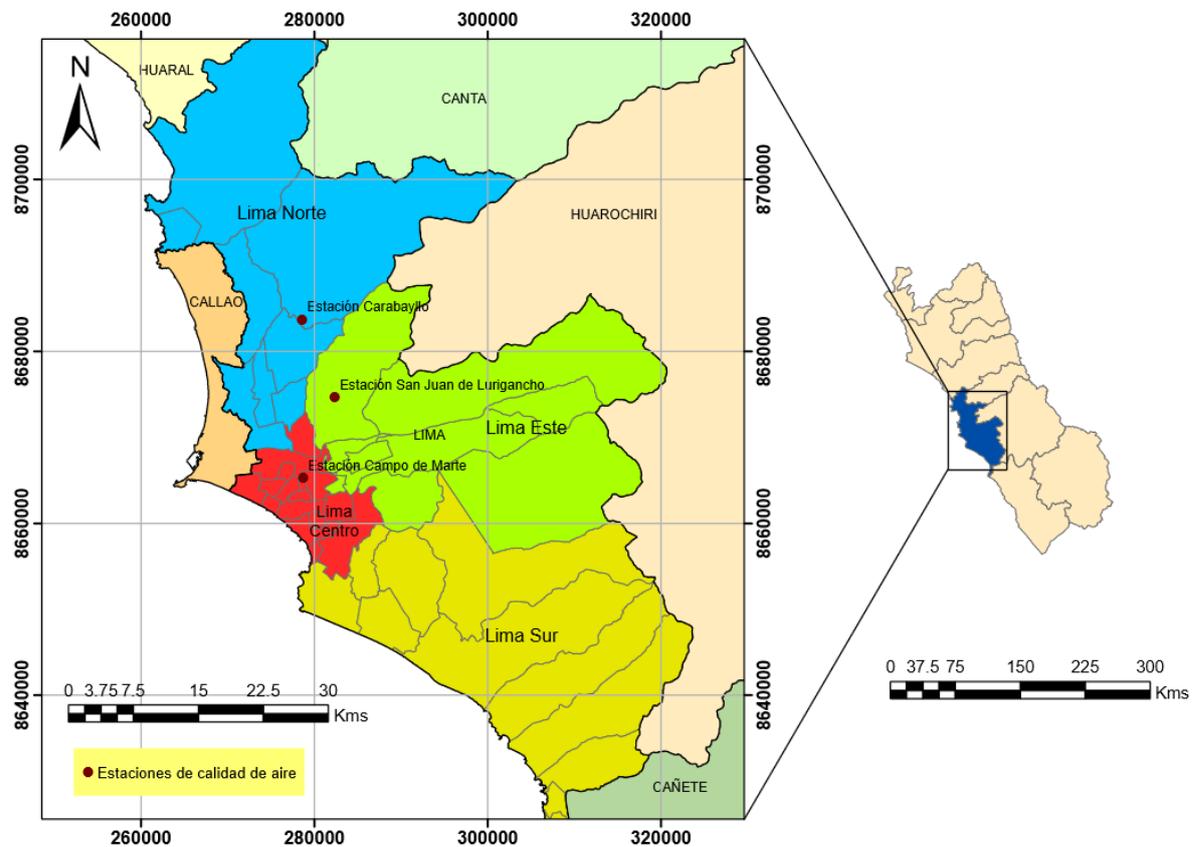


Figura 11: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de Lima Metropolitana

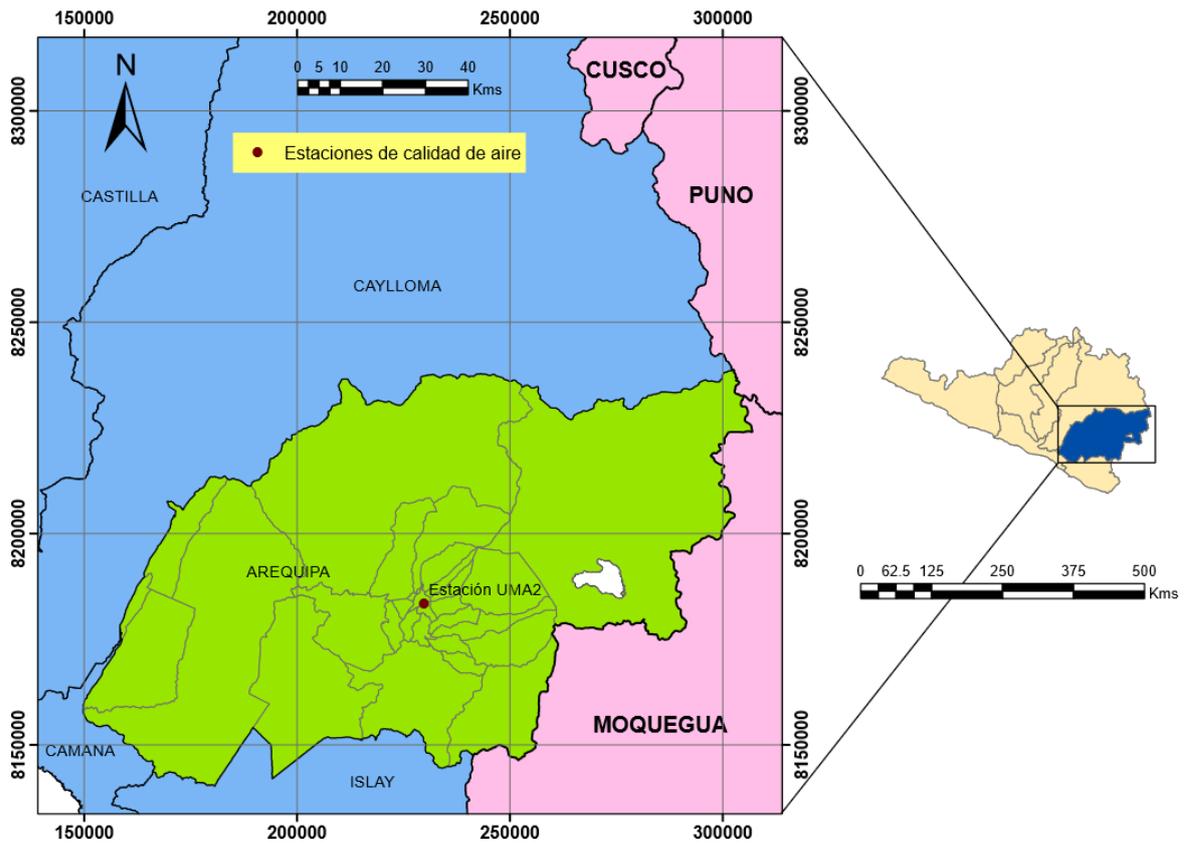


Figura 12: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de la ciudad de Arequipa

3.2. Materiales

Para la realización de la tesis se utilizó:

a. Equipos

Una impresora

Una laptop

b. Programas

Microsoft Excel 2016

Microsoft Word 2016

Minitab 19

R Studio

c. Datos

Datos de concentraciones de PM_{2.5} validados de la red de SENAMHI de las estaciones de Carabayllo, Campo de Marte y San Juan de Lurigancho para los años 2019, 2020 y 2021 que fueron obtenidos a través de una petición formal a la Gerencia General de SENAMHI

Datos meteorológicos validados de la red de SENAMHI de las estaciones de Carabayllo, Campo de Marte y San Juan de Lurigancho para los años 2019, 2020 y 2021 que fueron obtenidos a través de una petición formal a la Gerencia General de SENAMHI

Datos de concentraciones de PM_{2.5} de la red de la DIRESA de Arequipa de la estación UMA2 para los años 2019, 2020 y 2021 (estos datos estaban parcialmente validados) del portal web de la DIRESA de Arequipa

Datos validados de humedad relativa de la estación meteorológica La Pampilla para los años 2019, 2020 y 2021 obtenidos a través de una petición formal a la Gerencia General de SENAMHI

Datos validados de temperatura y velocidad de viento de la estación meteorológica San José de Uzuna para los años 2019, 2020 y 2021 (se escogió esta estación por ser la más cercana a la ciudad con datos de temperatura y velocidad de viento) obtenidos a través de una petición formal a la Gerencia General de SENAMHI

Tabla 5: Características generales de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Lima Metropolitana y Arequipa usadas en este estudio

Provincia	Estación	Distrito	Operador	Coord. UTM (m-N)	Coord. UTM (m-E)	Altitud (msnm)
Lima Metropolitana	San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	SENAMHI	8674718 ^a	282272 ^a	240
	Campo de Marte	Jesús María	SENAMHI	8664818 ^a	277601 ^a	123
	Carabayllo	Carabayllo	SENAMHI	8683451 ^a	278498 ^a	190
Arequipa	UMA2	Arequipa	DIRESA	8183477 ^b	229750 ^b	2326

Nota: ^aZona 18S, ^bZona 19S

Tabla 6: Características generales de las estaciones meteorológicas de Lima Metropolitana y Arequipa usadas en este estudio

Provincia	Estación	Distrito	Operador	Coord. UTM (m-N)	Coord. UTM (m-E)	Altitud (msnm)
Lima Metropolitana	San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	SENAMHI	8674718 ^a	282272 ^a	240
	Campo de Marte	Jesús María	SENAMHI	8664818 ^a	277601 ^a	123
	Carabayllo	Carabayllo	SENAMHI	8683451 ^a	278498 ^a	190
Arequipa	La Pampilla	Arequipa	SENAMHI	8183600 ^b	229317 ^b	2326
	San José de Uzuna	Polobaya	SENAMHI	8165352 ^b	251560 ^b	3269

Nota: ^aZona 18S, ^bZona 19S

3.3. Análisis y procesamiento de datos

Todas las estaciones de calidad de aire de Lima Metropolitana y Arequipa utilizaron métodos automáticos para la medición de concentración de PM_{2.5}. En las tres estaciones de Lima Metropolitana se usó la técnica de atenuación de rayos beta con Monitor 5014i de la marca “THERMO SCIENTIFIC” mientras que la estación UMA2 de Arequipa utilizó la técnica de microbalanza oscilatoria con monitor TEOM 1440A de la marca “RUPPRECHT & PATASHNICK”.

Las estaciones de Lima Metropolitana también usaron métodos automáticos para la medición de las variables meteorológicas, así como la estación San José de Uzuna. Sin embargo, la estación La Pampilla utilizó no utilizó métodos automáticos dado que se trataba de una estación meteorológica convencional.

Dado que existe una diferencia de altitudes entre la estación San José de Uzuna (3269 msnm) y la estación La Pampilla (2326 msnm) se usó la siguiente ecuación para estimar la temperatura en la altitud de la estación La Pampilla:

$$T = T_o - 6.5(Z - Z_o)$$

Donde

- T es la temperatura final (en °C)
- T_o es la temperatura inicial (en °C)
- Z es la altitud final (en km)
- Z_o es la altitud inicial (en km)

3.3.1. Análisis de la variación horaria y diaria de PM_{2.5}

Se calcularon promedios de todos los días para una hora determinada con el fin de obtener promedios para cada hora del día. Luego, con los promedios de cada hora se elaboraron en R Studio gráficos de variación horaria acoplados con diagramas de cajas para cada hora en los tres años en estudio. No se comparó con algún estándar dado que no existen estándares nacionales ni internacionales de concentraciones de PM_{2.5} a nivel horario.

Con respecto a la variación diaria, se calcularon promedios de las 24 horas de cada día. Posteriormente, con los promedios diarios se elaboraron gráficos de variación diaria para cada año en la que cada gráfico tuvo incluida la variación diaria de las cuatro estaciones en estudio y una comparación de las concentraciones medias de PM_{2.5} a lo largo de la variación con la guía de la OMS (24 horas) y el ECA (24 horas). Cabe recalcar que en la comparación con el ECA se consideró el percentil 98 como la cantidad máxima de excesos permitidos dado que ninguna estación contó datos para los 365 días del año (366 en el caso del año 2020). Después, se hicieron diagramas de cajas en Minitab 19 para cada estación en la que en cada diagrama había tres cajas (una para cada año) y una comparación con la guía de la OMS (anual) y el ECA (anual). Por otro lado, se determinó la media, máximo y mínimo para cada variable meteorológica de cada año en cada estación en la que fueron comparados entre sí.

3.3.2. Análisis de la variación mensual y estacional de PM_{2.5}

Con respecto a la variación mensual, se calculó el promedio de todas las horas de los días de un determinado mes. Con los promedios mensuales se elaboró un gráfico en Excel para cada año en la que cada gráfico tuvo incluida la variación mensual de las cuatro estaciones en estudio y una comparación de las concentraciones medias de PM_{2.5} entre sí a lo largo de la variación con el fin de observar los comportamientos y tendencias. Esta vez no se comparó con algún estándar dado que no existen estándares nacionales ni internacionales de concentraciones de PM_{2.5} a nivel mensual.

En el caso de la variación estacional, se calculó el promedio para cada estación del año de manera similar al cálculo de las concentraciones medias mensuales de PM_{2.5}. Se consideró verano desde el mes de diciembre hasta febrero, otoño desde el mes de marzo hasta mayo, invierno desde el mes de junio a agosto y primavera desde el mes de septiembre a noviembre. Con los promedios obtenidos de todas las estaciones se elaboró un gráfico en Excel para cada año en la que cada gráfico tuvo incluida la variación estacional de las cuatro estaciones en estudio y una comparación de las concentraciones medias de PM_{2.5} entre sí a lo largo de la variación con el fin de observar los comportamientos y tendencias. En este caso tampoco se comparó con algún estándar dado que no existen estándares nacionales ni internacionales de concentraciones de PM_{2.5} a nivel estacional.

3.3.3. Determinación de la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5}

Se consideró los siguientes horarios para los períodos diurno y nocturno: 6:00 a 17:59 para el período diurno y 18:00 a 5:59 para el período nocturno. Se calculó el promedio a las concentraciones que abarquen cada período para así determinar la concentración diurna y nocturna.

Para determinar la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5} a nivel diario se calculó la concentración diurna y nocturna para todos los días. Posteriormente, se elaboró un gráfico en Excel para cada año en la que cada gráfico tuvo la variación diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} de las cuatro estaciones. Posteriormente, se elaboraron diagramas de cajas en Minitab 19 para cada estación con sus respectivos períodos (diurno y nocturno) en la que en cada

diagrama hay seis cajas (dos para cada año). Luego, se calculó el promedio de todas las concentraciones diurnas y nocturnas de cada año y se elaboró un gráfico en Excel para cada año.

Con respecto a la concentración diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ a nivel semanal, se determinó la concentración diurna y nocturna para todos los días. Luego se agruparon las concentraciones por día de la semana y se les calculó el promedio obteniendo así 7 concentraciones medias en total tanto para el período diurno como para el período nocturno. Con dichas concentraciones medias se elaboró un gráfico en Excel para cada año en la que cada gráfico tuvo la variación semanal diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ de las cuatro estaciones y la comparación de dichas concentraciones con la guía de la OMS (24 horas) y el ECA (24 horas).

Con respecto a la concentración diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ a nivel mensual y estacional, se determinó la concentración diurna y nocturna para todos los días. Después se agruparon las concentraciones por cada mes y se les sacó el promedio obteniendo así hasta 12 concentraciones medias en total para la variación mensual y 4 concentraciones medias en total para la variación estacional dependiendo de la disponibilidad de datos que contenga la estación. Con dichas concentraciones medias se elaboró un gráfico en Excel para cada año y tipo de variación. Esta vez no se comparó con algún estándar dado que no existen estándares nacionales ni internacionales de concentraciones de $PM_{2.5}$ a nivel mensual y estacional.

3.3.4. Evaluación de la influencia de las medidas adoptadas por el Gobierno

Se escogió un período determinado, el cual fue desde el 15 de marzo hasta el 30 de abril de los tres años en estudio dado que en el año 2020 abarcó los primeros días de la cuarentena impuesta por el Gobierno y a la vez fueron los días en que hubo mayor cumplimiento de la misma. Dicho período se evaluó en las estaciones Campo de Marte, San Juan de Lurigancho y UMA2. Para hacer la evaluación se tomaron las concentraciones medias diarias de los días que abarcaron este período.

Una vez definido el período, se elaboraron gráficos en Excel de variación temporal para cada estación en la que cada gráfico tuvo incluida la variación temporal de cada uno de los tres años durante el período en estudio. Posteriormente se elaboraron diagramas de cajas en Minitab 19 para cada estación en la que en cada diagrama hay tres cajas (una para cada año). Tanto los gráficos en Excel como los diagramas de cajas tuvieron incluida la guía de la OMS (24 horas) y el ECA (24 horas).

Asimismo, se elaboró una tabla con los siguientes estadísticos descriptivos para cada año y cada estación: máximo, percentil 90, mediana, media, percentil 10 y mínimo. Además, se hizo una comparación entre la variación de cada estadístico descriptivo entre dos años (2020-2019, 2021-2020 y 2021-2019). Dichas variaciones fueron porcentuales y entre diferencia de un mismo estadístico descriptivo de dos años distintos.

El cálculo de la variación de un estadístico descriptivo entre dos años y la variación porcentual se realizó de la siguiente manera:

$$VED = ED_a - ED_b$$

$$VPED = VED \times 100\%$$

Donde

- VED es la variación de un determinado estadístico descriptivo (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- VPED es la variación porcentual de un determinado estadístico descriptivo (en %)
- ED_a es un determinado estadístico descriptivo del año “a” (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- ED_b es un determinado estadístico descriptivo del año “b” (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- a y b son años en estudio y a es mayor que b

Además, se realizó una comparación estadística de las concentraciones medias de $\text{PM}_{2.5}$ en Minitab 19 mediante una prueba *t* entre las concentraciones medias de dos determinados años (2020 – 2019, 2021 – 2020 y 2021 - 2019) a un nivel de significancia de 5% con el

objetivo de verificar si las concentraciones medias variaron significativamente. Las pruebas t respectivas se encuentran detalladas en el Anexo 5. Las hipótesis fueron las siguientes:

- H_0 : Las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ son estadísticamente iguales
- H_1 : Las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ son estadísticamente diferentes

Por otro lado, se determinó la media, mínimo y máximo para cada variable meteorológica en el período de estudio mencionado al principio de este punto. Dichos estadísticos se determinaron para cada estación y año y fueron comparados entre sí.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variación horaria y diaria de las concentraciones de PM_{2.5}

4.1.1. Variación horaria

La Figura 13 muestra la variación de concentración media horaria de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2019 siendo las estaciones San Juan de Lurigancho y UMA2 las que registran en promedio mayores variaciones a lo largo del día.

En las tres estaciones de Lima Metropolitana, se puede observar que las concentraciones medias de la estación San Juan de Lurigancho son generalmente mayores que en las otras dos estaciones. Además, se presentan dos intervalos con picos máximos: 8:00 a 10:00 y 21:00 a 23:00 en la que ambos están asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren también en dos intervalos: 3:00 a 5:00 y 14:00 a 19:00 y según Pacsi (2016), están relacionadas probablemente a la disminución de las emisiones de fuentes móviles. El comportamiento de la variación horaria en las estaciones Campo de Marte y Carabayllo es similar a los estudios realizados por Silva et al. (2017) y Espinoza (2018).

En la estación UMA2, las concentraciones medias son por lo general menores que las estaciones de Lima Metropolitana. Su comportamiento tiene un ligero parecido al de la estación San Juan de Lurigancho. Sus dos picos máximos se presentan a las 8:00 y 21:00 mientras que sus dos picos mínimos se presentan a las 4:00 y 14:00. La razón de sus concentraciones medias inferiores a las estaciones de Lima Metropolitana se debe al escaso parque automotor dado que según Rivera (2020), la cantidad de vehículos en la región Arequipa es casi un décimo de la cantidad de vehículos en Lima Metropolitana.

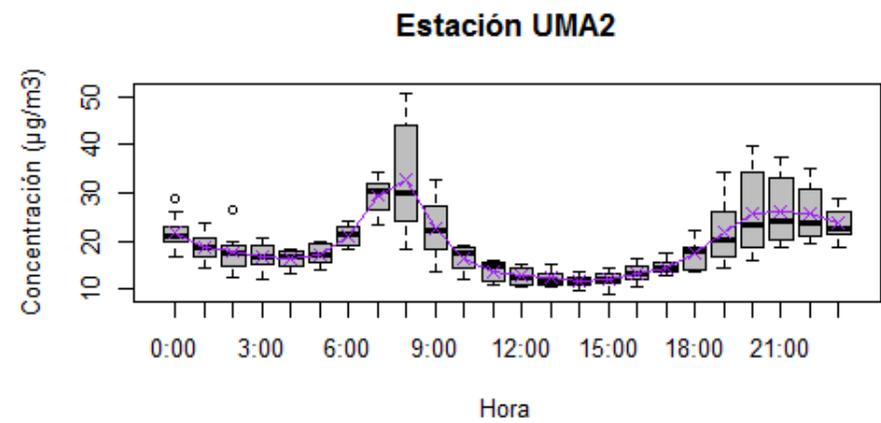
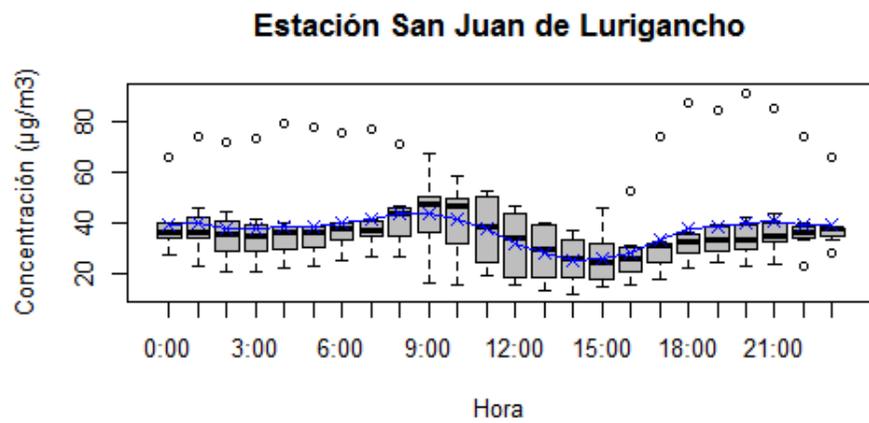
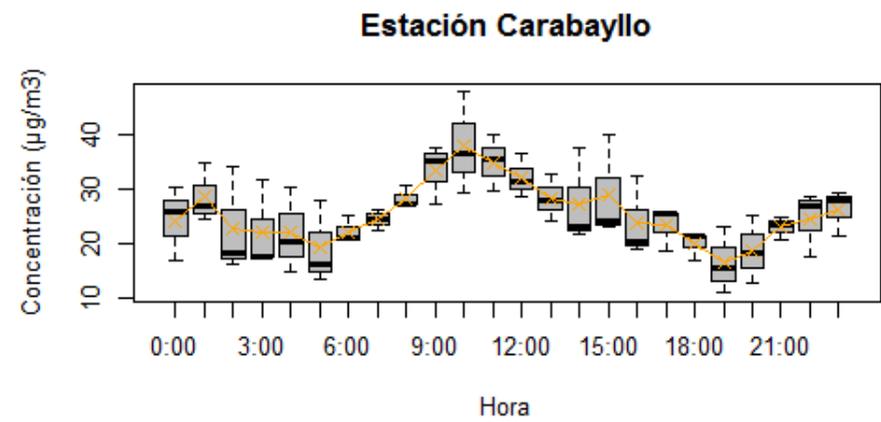
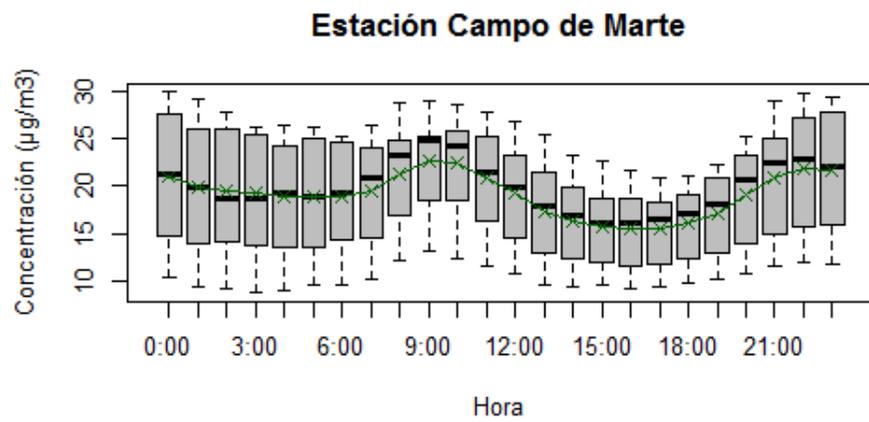


Figura 13. Variación de la concentración media horaria de $\text{PM}_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 14 muestra la variación de concentración media horaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2020 siendo la estación de San Juan de Lurigancho la que registra mayor variación y la estación de Campo de Marte la que registra menor variación a lo largo del día.

En las tres estaciones de Lima Metropolitana, se puede observar que las concentraciones medias de la estación San Juan de Lurigancho son generalmente mayores que en las otras dos estaciones hasta antes de las 17:00. En comparación con las concentraciones medias del año 2019, las de este año son generalmente más bajas. Esto se puede explicar por las medidas de confinamiento impuestas por el Gobierno que empezaron a partir del 15 de marzo del 2020. Las medidas más resaltantes fueron la cuarentena y los toques de queda en las noches. A diferencia del año 2019, esta vez no se presentan dos picos máximos sino solamente uno, el cual se encuentra entre las 9:00 y 10:00. A partir de las 18:00, el crecimiento de las concentraciones medias es minúsculo. Este comportamiento inusual se explica por los toques de queda que el Gobierno impuso con el fin de atenuar los contagios del SARS CoV-2.

En la estación UMA2, las concentraciones medias siguen siendo en general menores que las estaciones de Lima Metropolitana. Su comportamiento se parece mucho al del año 2019 con la diferencia de que sus concentraciones son menores que en ese año. Sus picos máximos son casi a la misma hora del año 2019 (7:00 y 20:00). A partir de las 18:00, presenta concentraciones medias mayores que las estaciones de Lima Metropolitana a pesar de que la región Arequipa tuvo toques de queda ligeramente más severos que Lima Metropolitana en el año 2020.

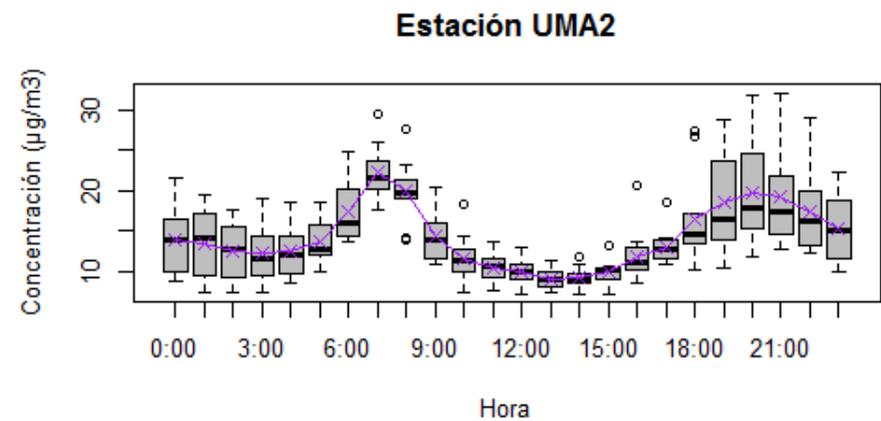
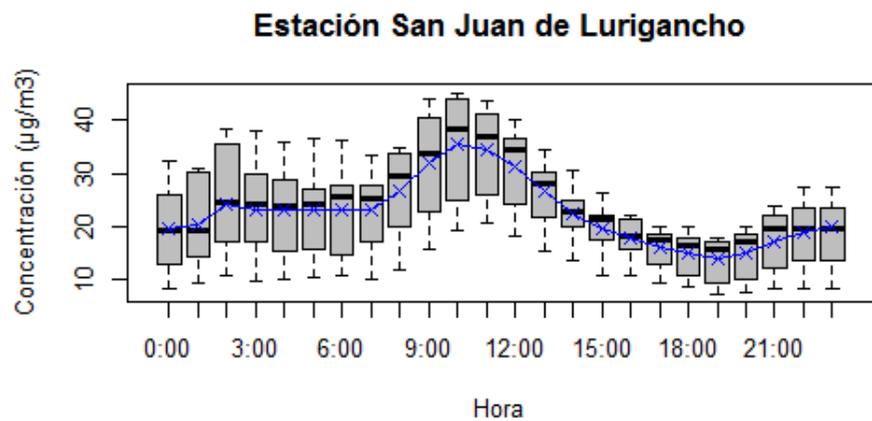
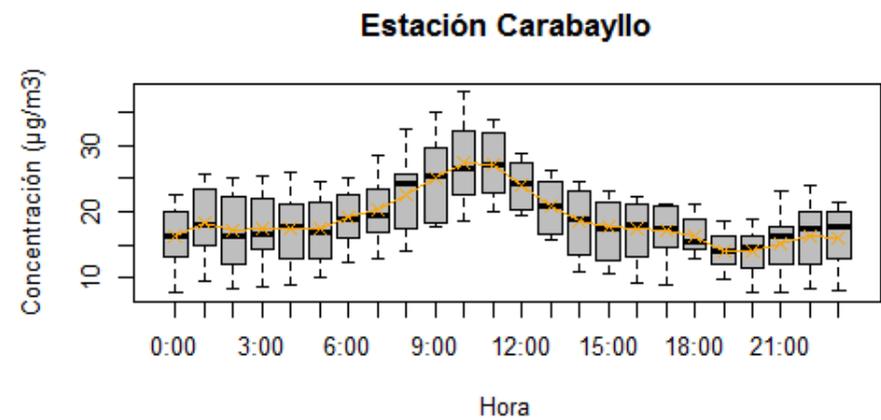
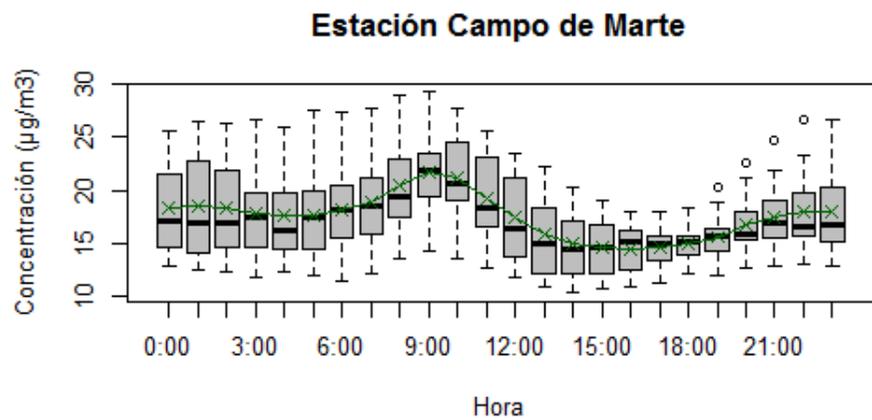


Figura 14. Variación de la concentración media horaria de $\text{PM}_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020.

La Figura 15 muestra la variación de concentración media horaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2021 siendo la estación de San Juan de Lurigancho la que registra mayor variación a lo largo del día mientras que las estaciones Campo de Marte registra menor variación.

En las tres estaciones de Lima Metropolitana, se puede observar que las concentraciones medias de la estación San Juan de Lurigancho son generalmente mayores que en las otras dos estaciones como en el año 2019. En comparación con las concentraciones medias del año 2020, las de este año son generalmente más altas a excepción de la estación Campo de Marte. Esto se debe a que las medidas de aislamiento social impuestas por el Gobierno fueron más flexibles en comparación con el año 2020. En el año 2021, las medidas más resaltantes fueron los toques de queda, las cuales fueron menos rigurosas que las implementadas en el año 2020. El comportamiento de la variación horaria de las tres estaciones es similar a la del año 2020. No obstante, a partir de las 18:00 se puede observar aumentos de concentraciones medias más amplias que en el año 2020 en las estaciones de Carabayllo y San Juan de Lurigancho. Este comportamiento no se observó en la estación Campo de Marte debido a que solo se dispuso datos de concentración de esa estación hasta la segunda semana de julio.

En la estación UMA2, se puede observar que las concentraciones medias son ligeramente menores que en el año 2020. Esto se puede explicar por la cantidad escasa de datos que se tuvo para esta estación en el año 2021. Solo se dispuso de datos de calidad de aire hasta el mes de abril. En ese lapso de tiempo, los toques de queda fueron más rigurosos que los que hubo posteriormente y, además, cabe destacar que en este lapso de tiempo hay otra medida de aislamiento social que también toma relevancia: la prohibición de vehículos particulares los días domingo. Asimismo, la ciudad de Arequipa estuvo en cuarentena durante las dos últimas semanas de febrero. Las medidas de aislamiento social fueron más severas en esos meses debido a que el país se encontraba atravesando la segunda ola de contagios de SARS CoV-2, el cual según Anónimo (2022) terminó a finales de julio.

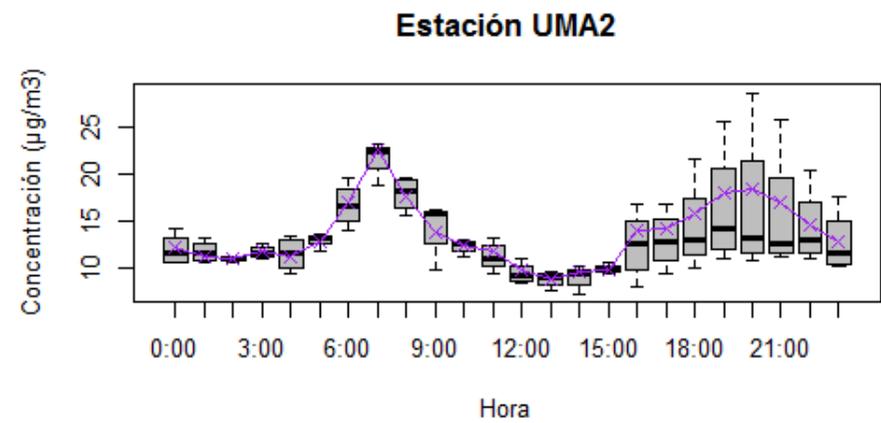
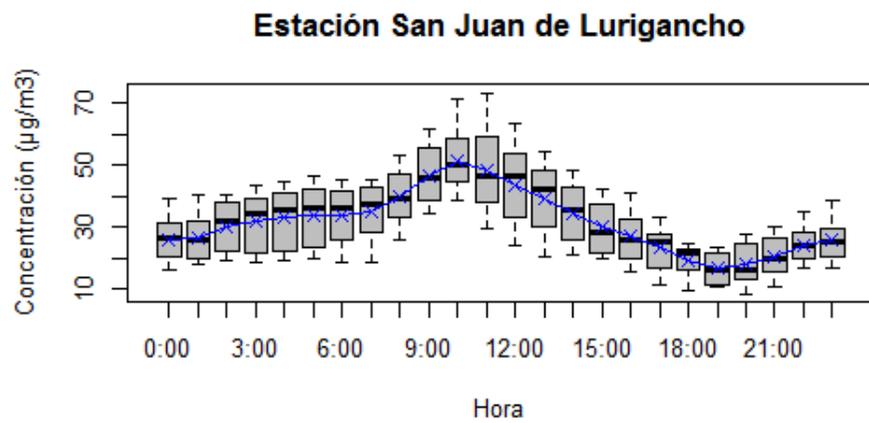
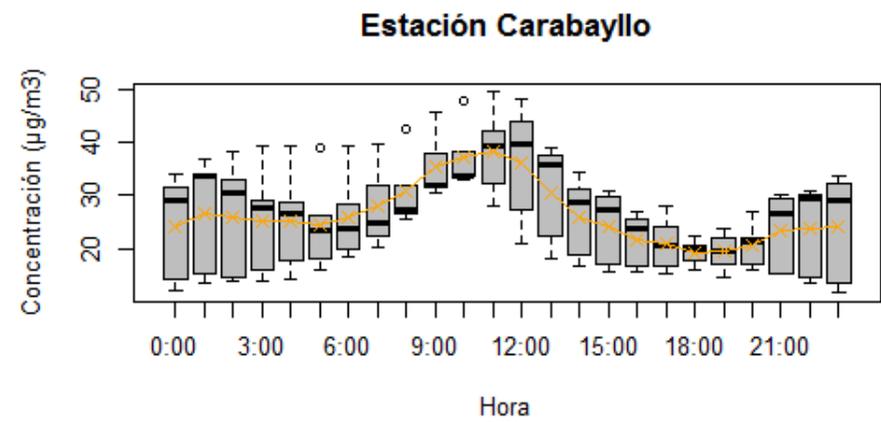
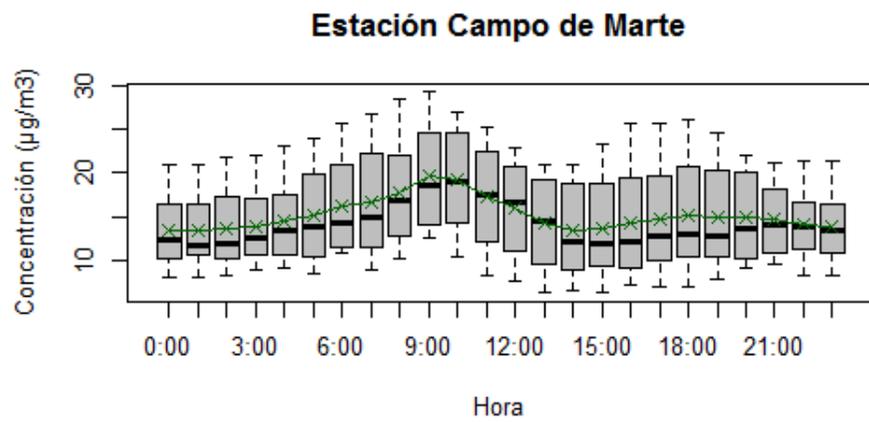


Figura 15. Variación de la concentración media horaria de $\text{PM}_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021.

La Tabla 7 muestra las concentraciones medias horarias máximas y mínimas durante el período de 24 horas en cada año y cada estación. Asimismo, muestra la concentración media de todo el año en cada estación e indica la hora exacta en que se registraron las concentraciones medias horarias máximas y mínimas. En cada estación, la concentración media horaria máxima fue registrada casi a la misma hora en los tres años mientras que la concentración media horaria mínima fue registrada casi a la misma hora en los tres años solo en las estaciones Carabayllo y UMA2.

Tabla 7: Concentraciones medias horarias de PM_{2.5} registradas en un período de 24 horas para los años 2019 - 2021

	Estación Campo de Marte			Estación Carabayllo		
	Mín.	Máx.	Media (24 horas)	Mín.	Máx.	Media (24 horas)
Año 2019	15.50 (16:00)	22.75 (9:00)	19.50	16.54 (19:00)	37.84 (10:00)	24.01
Año 2020	14.38 (16:00)	21.65 (9:00)	17.09	14.03 (19:00)	27.40 (10:00)	18.81
Año 2021	13.29 (0:00)	19.55 (9:00)	16.14	19.27 (18:00)	38.20 (11:00)	27.23
	Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (24 horas)	Mín.	Máx.	Media (24 horas)
Año 2019	25.23 (14:00)	43.85 (9:00)	35.64	11.65 (14:00)	32.77 (8:00)	19.12
Año 2020	13.74 (19:00)	35.53 (10:00)	22.32	9.09 (13:00)	22.25 (7:00)	13.83
Año 2021	16.89 (19:00)	51.68 (10:00)	31.68	8.91 (13:00)	22.61 (7:00)	13.63

4.1.2. Variación diaria

La Figura 16 muestra la variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2019 siendo la estación Carabayllo la que tiene una escasa cantidad de datos de concentraciones de $PM_{2.5}$ mientras que la estación Campo de Marte tiene la mayor cantidad de datos.

La estación que presentó la mayor cantidad de concentraciones medias diarias que superan el ECA es la estación San Juan de Lurigancho en la que todas las estaciones presentaron concentraciones medias diarias superiores a la guía de la OMS. Asimismo, las 4 estaciones presentaron concentraciones medias diarias inferiores a la guía de la OMS en la que las estaciones Campo de Marte y UMA2 son las estaciones que presentan las mayores cantidades de concentraciones medias que cumplen dicho estándar. Las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho incumplieron con el ECA ya que registraron una cantidad de valores superiores a dicho estándar mayor al percentil 98. Todas las estaciones incumplieron la guía de la OMS porque tuvieron muchas concentraciones medias que excedieron dicho estándar superando así la cantidad máxima equivalente al percentil 99 que establece dicha normativa internacional. Tanto las estaciones Campo de Marte como San Juan de Lurigancho tuvieron una variación de concentraciones medias cuyo comportamiento es similar al estudio realizado por Sánchez y Ordoñez (2016).

La estación UMA2 presentó concentraciones que en general son superiores a la guía de la OMS durante todo el año cuyos valores oscilan mayormente entre $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque en los últimos días del año se registran concentraciones por arriba de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, esta estación tiene la mayor cantidad de concentraciones que cumplen con la guía de la OMS y no presenta alguna concentración que supere el ECA. Las concentraciones más bajas registraron valores por debajo de los $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración más alta registra un valor de $39.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, se puede observar que las concentraciones son por lo general menores que las concentraciones de las estaciones de Lima Metropolitana. La explicación de esto se debe a la inmensa cantidad del parque automotor en Lima Metropolitana tal como se señaló en el punto 4.1.1.

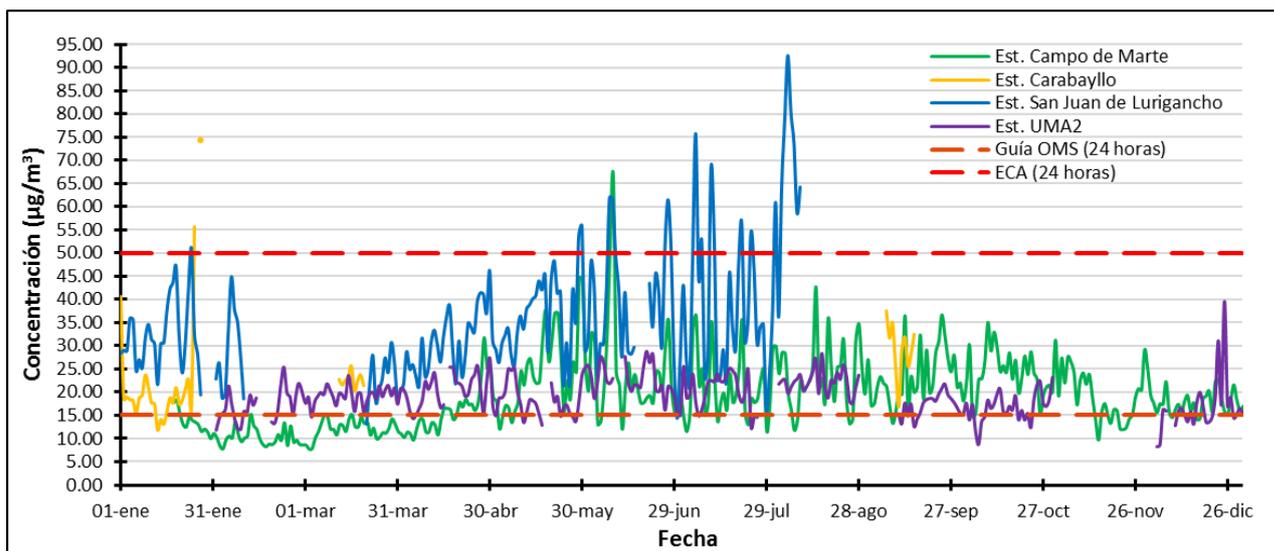


Figura 16. Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019.

La Figura 17 muestra la variación de concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2020. Se puede observar que todas las estaciones presentaron concentraciones que superan la guía de la OMS mientras que solamente las estaciones Campo de Marte y UMA2 no presentaron valores superiores al ECA. Las 4 estaciones presentaron en promedio una gran cantidad de datos a diferencia del año 2019 y también cumplieron con la normativa nacional ya que ninguna registró una cantidad de concentraciones medias superiores al ECA que sean mayores al percentil 98. Sin embargo, en este año también incumplieron la guía de la OMS al registrar una cantidad de concentraciones medias superiores a dicho estándar mayor al percentil 99.

Desde mediados de marzo hasta inicios de mayo se pueden observar concentraciones medias menores que en el año 2019 evidenciándose así el efecto de la cuarentena general impuesta por el Gobierno en las concentraciones medias diarias de $PM_{2.5}$ mientras que a partir de mayo las concentraciones medias empezaron a aumentar. Este aumento se pudo dar por dos razones: (1) el inicio de la Fase 1 de Reactivación Económica que fue el inicio de la restauración de las actividades económicas en el Perú y (2) un fuerte desacato de la cuarentena general establecida por el Gobierno, el cual a inicios del mes un 40% de peruanos había incumplido las restricciones en zonas cercanas a los mercados y centros comerciales

(Anónimo, 2020g). Este desacato fue muy evidente especialmente en la ciudad de Lima Metropolitana.

Por otro lado, las medidas de aislamiento no parecen haber influenciado mucho en las concentraciones medias ya que en la estación UMA2 se puede ver que las concentraciones medias se mantuvieron casi constantes desde mayo hasta inicios de noviembre mientras que la ciudad de Arequipa estuvo en cuarentena hasta finales de agosto.

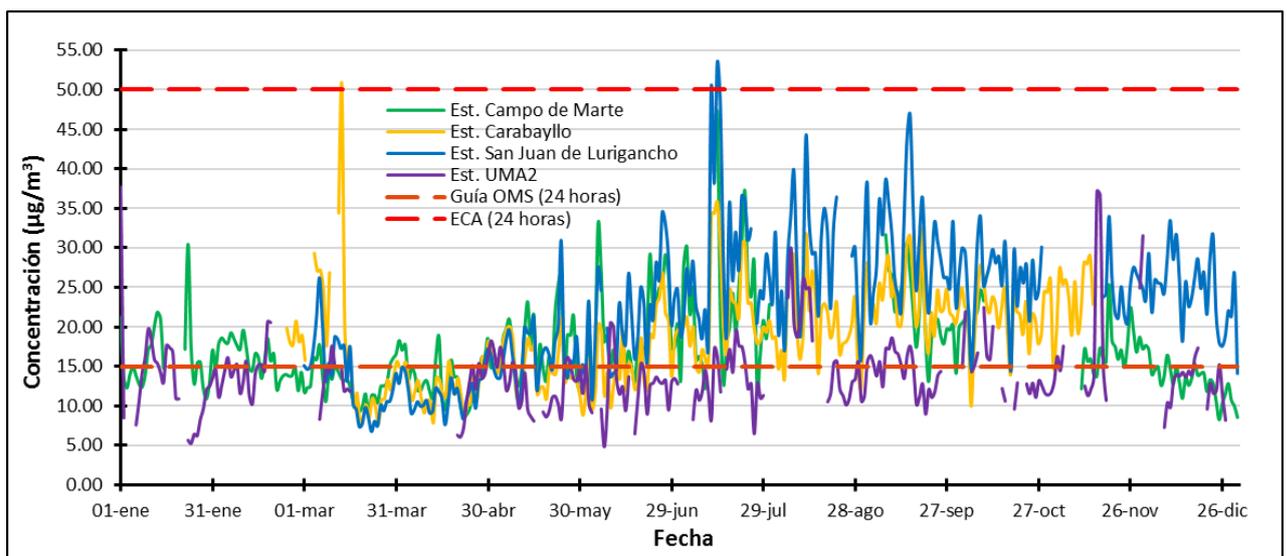


Figura 17. Variación de la concentración media diaria de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020.

La Figura 18 muestra la variación de concentración media diaria de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2021. Todas las estaciones presentaron concentraciones que superan la guía de la OMS mientras que las estaciones Campo de Marte y UMA2 no presentaron concentraciones que superen el ECA cumpliendo así con la normativa nacional. Las estaciones Carabayllo y UMA2 presentaron una cantidad escasa de datos a diferencia del año 2020. Al igual que en los otros dos años, todas las estaciones incumplieron con la guía de la OMS al registrar una cantidad de concentraciones medias superiores a dicho estándar mayor al percentil 99.

Asimismo, se puede observar un incremento de concentraciones medias de $PM_{2.5}$ respecto al año 2020, evidenciándose así el efecto de la implementación del Plan de Reactivación Económica. Además, se puede observar que la cuarentena impuesta por el Gobierno para todo el mes de febrero en la ciudad de Lima Metropolitana casi no tuvo efectos en las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ con la tal vez excepción de la estación San Juan de Lurigancho en la que se puede ver un ligero decrecimiento en los primeros días de febrero. Lo mismo se puede observar para la ciudad de Arequipa, a la cual también se le impuso una cuarentena durante la segunda mitad de febrero, en la que no tuvo efectos en las concentraciones medias de $PM_{2.5}$.

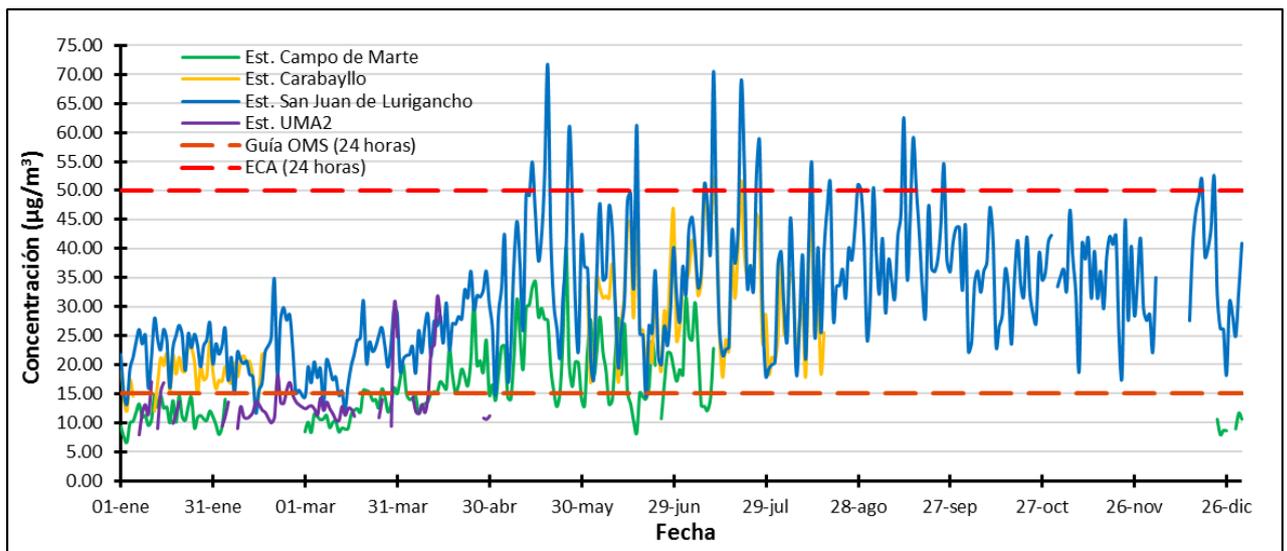


Figura 18. Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021.

En la Figura 19 se puede observar que en la estación Campo de Marte, la concentración media es mayor en el año 2019 y menor en el año 2021. Todas las concentraciones medias superaron la guía de la OMS con valores cercanos a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el año 2020 se presentaron la mayor cantidad de datos atípicos mientras que en el año 2021 se presentaron la menor cantidad de datos atípicos. Todos los datos atípicos superaron el ECA. En el año 2019 se presentó el mayor dato atípico con un valor de $66.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los siguientes estadísticos: primer cuartil, tercer cuartil y mediana son mayores en el año 2019 y menores en el año 2021 en la que todas cumplieron con el ECA, lo cual indica que las concentraciones del año 2019 fueron en general mayores que las de los otros dos años. Los tres extremos superiores

superaron el ECA y los tres extremos inferiores superaron la guía de la OMS. La disminución de la concentración media en el 2020 indica el efecto de las medidas de aislamiento social impuesta por el Gobierno explicadas en el punto 2.11.1. mientras que la disminución de la concentración media en el 2021 se debe a que no se contaron con datos para los últimos 6 meses del año, en los cuales las medidas de aislamiento social fueron muy flexibles y abarcaron casi toda la estación de invierno.

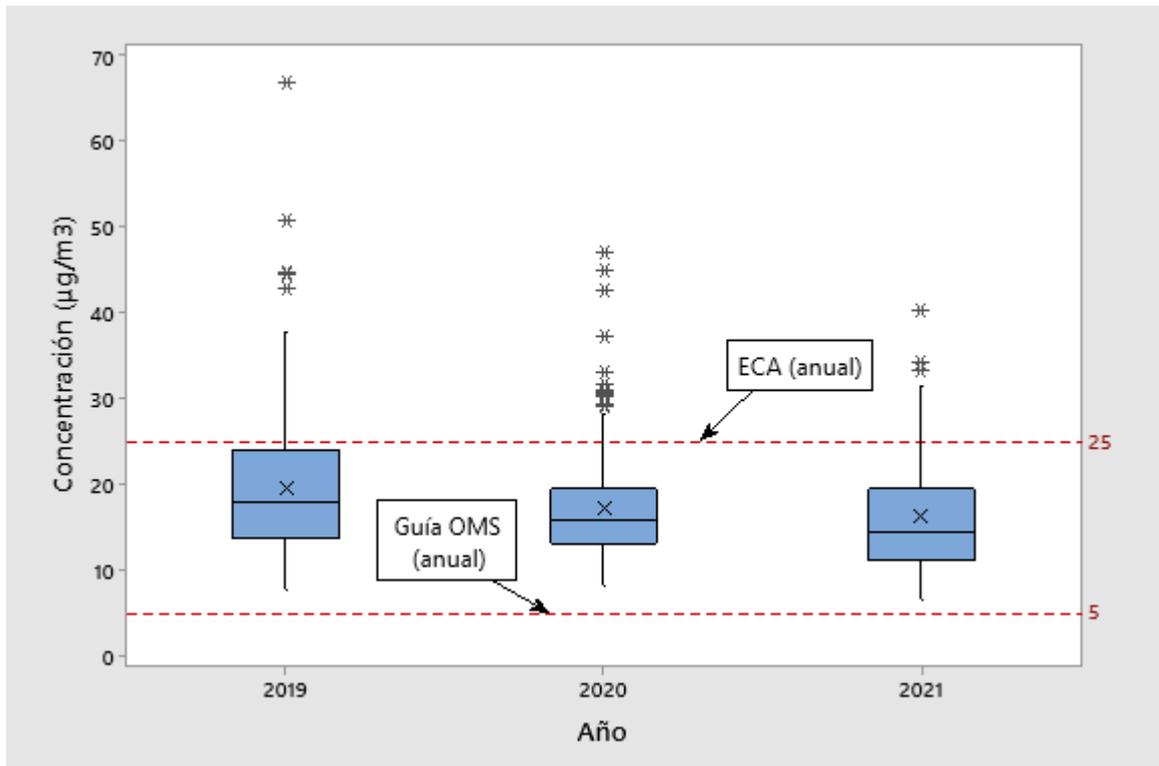


Figura 19. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de la estación Campo de Marte en los tres años en estudio.

En la Figura 20 se puede observar que en la estación Carabayllo, la concentración media es mayor en el año 2021 y menor en el año 2020. Las concentraciones medias de los años 2019 y 2020 superaron el ECA mientras que la concentración media del año 2021 superó dicho estándar. En los años 2019 y 2020 se registraron valores atípicos, las cuales superaron el ECA. En el año 2021 no se registraron datos atípicos. Los siguientes estadísticos: primer cuartil, tercer cuartil y mediana son mayores en el año 2021 y menores en el año 2020. Además, el tercer cuartil del año 2020 cumple con el ECA con un valor de $22.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El rango intercuartil fue el más pequeño en el año 2019 y el más grande en el año 2021, lo cual

podría explicarse debido a la escasez de datos en esta estación para el año 2019. No obstante, se puede apreciar el efecto de las medidas de aislamiento social en el diagrama del año 2020 y la Reactivación Económica en el diagrama del año 2021.

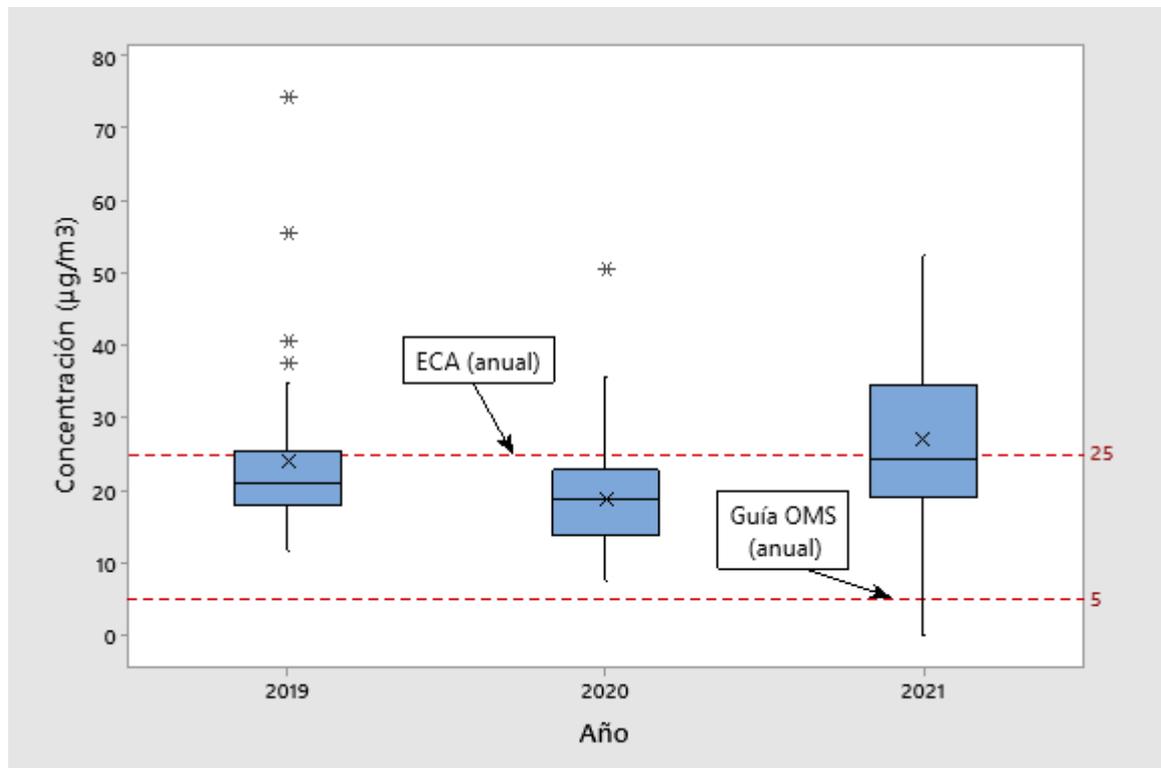


Figura 20. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de la estación Carabayllo en los tres años en estudio.

En la Figura 21 se puede observar que en la estación San Juan de Lurigancho, la concentración media es mayor en el año 2019 y menor en el año 2020. Todas las concentraciones medias superaron la guía de la OMS con un valor de $35.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el mayor y $22.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el menor siendo esta última la única que cumplió el ECA. En los tres años se registraron valores atípicos siendo el año 2019 en el que se registró la mayor cantidad. Todos los valores atípicos superaron el ECA en la que el mayor de todos registra un valor de $92.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los siguientes estadísticos: primer cuartil, tercer cuartil y mediana son mayores en el año 2019 y menores en el año 2020. Además, estos tres estadísticos descriptivos superan la guía de la OMS. La mediana del año 2020 es la única que cumple con el ECA mientras que el primer cuartil del año 2019 es la única en superar el ECA. Asimismo, el rango intercuartil es similar en los tres años. Los siguientes parámetros del año

2019: primer cuartil, tercer cuartil, media y mediana hubieran sido mayores si se hubieran contado con más datos dado que no se tuvo datos para los últimos cinco meses de ese año. Sin embargo, los parámetros de los diagramas de cajas permiten visualizar el efecto de las medidas de aislamiento social en los años 2020 y 2021, y la Reactivación Económica en el año 2021.

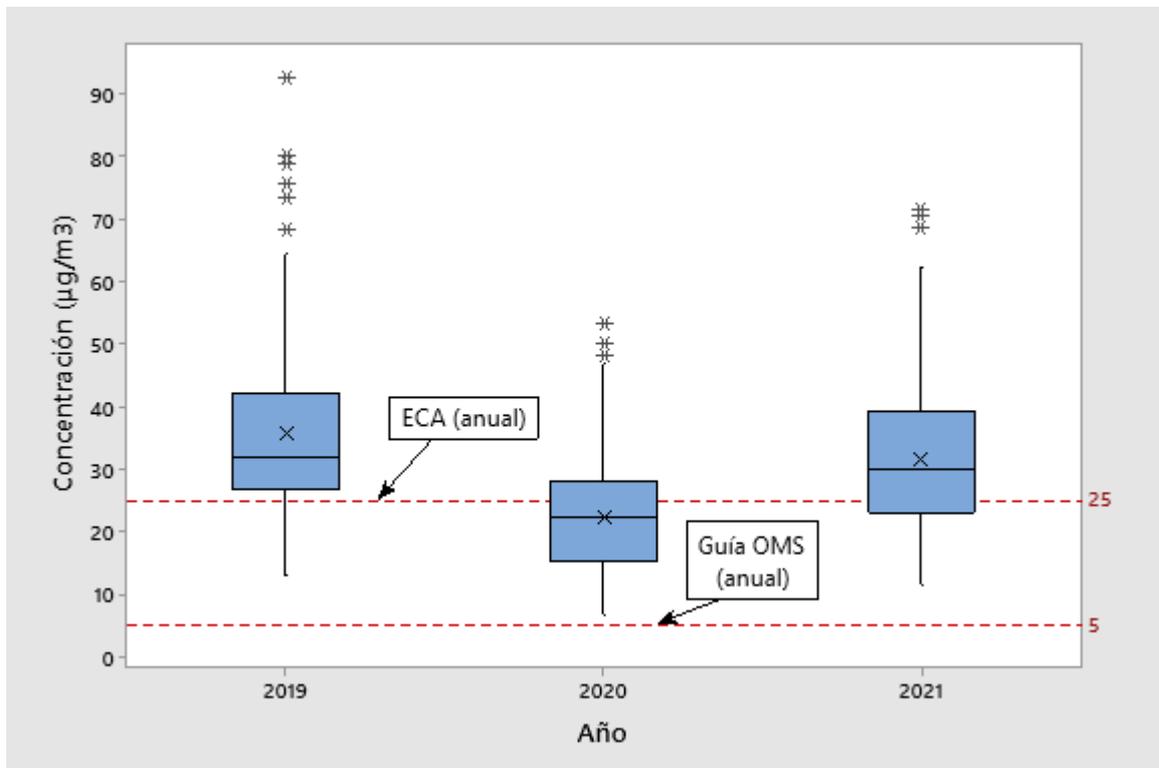


Figura 21. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de la estación San Juan de Lurigancho en los tres años en estudio.

En la Figura 22 se puede observar que en la estación UMA2, la concentración media es mayor en el año 2019 y menor en el año 2021 en la que ambas cumplen con el ECA con valores de $19.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $13.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En los tres años se registraron valores atípicos en la que en el año 2020 se registró la mayor cantidad y en el año 2019 se registró la menor cantidad. En todos los años se tuvieron valores atípicos que superaron el ECA en la que el mayor registrado fue el del año 2019, el cual fue el único dato atípico registrado en ese año, con un valor de $39.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. También, se puede observar que dichos valores atípicos son generalmente menores que los de las estaciones de Lima Metropolitana indicando así que las concentraciones de Lima Metropolitana son generalmente mayores a

las de Arequipa. Los siguientes estadísticos: rango intercuartil, primer cuartil, tercer cuartil y mediana son mayores en el año 2019 y menores en el año 2021, lo cual se debe a que en el año 2021 solo se tuvo datos hasta el mes de abril. Estos tres estadísticos descriptivos cumplieron con el ECA, pero superaron la guía de la OMS en los tres años. Asimismo, se puede observar la influencia de las medidas de aislamiento social en el diagrama de cajas del año 2020 dado que los parámetros de dicho diagrama de cajas son menores que los del año 2019.

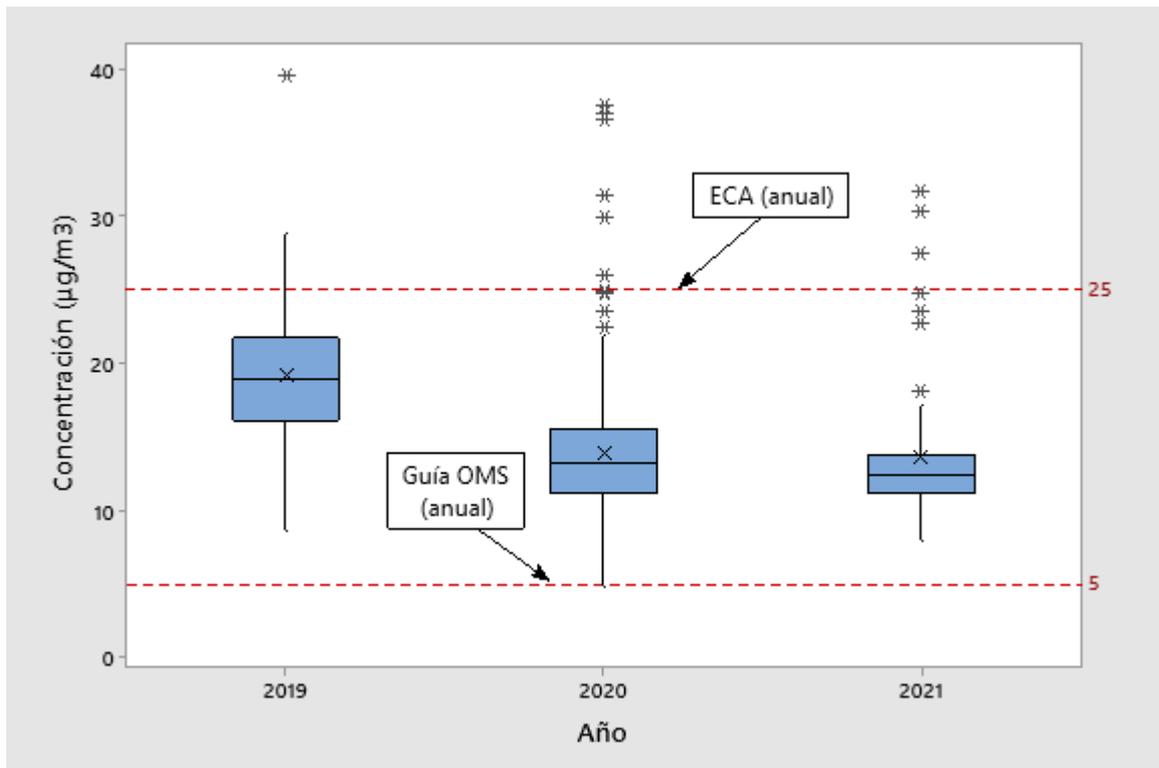


Figura 22. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de la estación UMA2 en los tres años en estudio.

La Tabla 8 muestra el mínimo, máximo, la media y desviación estándar de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento para los tres años en estudio. Se puede observar que la temperatura media de la estación UMA2 es menor que la de todas las estaciones de Lima en los tres años alcanzando valores inferiores a los 17 °C mientras que las demás estaciones registraron promedios cercanos a 19 °C y 20 °C. La humedad relativa media también es menor que la de todas las estaciones de Lima con valores por debajo de 75% mientras que las demás estaciones registraron promedios cercanos a 80%.

La velocidad media del viento es mayor en la estación UMA2 que en las demás estaciones alcanzando valores superiores a los 2.8 m/s. Las estaciones de Lima Metropolitana registraron velocidades medias del viento inferiores a 2 m/s con la excepción de la estación Campo de Marte que registró promedios superiores a dicho valor, pero inferiores a los promedios registrados en la estación UMA2.

Tabla 8: Estadísticos básicos pertenecientes a las variables meteorológicas para los años 2019 - 2021

2019						
	Estación Campo de Marte			Estación Carabayllo		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	13.91	26.80	19.21 ± 3.38	14.24	28.37	21.22 ± 3.78
Humedad relativa (%)	63	96	83 ± 5	49	99	77 ± 9
Velocidad del viento (m/s)	1.21	3.24	2.34 ± 0.41	0.59	2.22	1.50 ± 0.23
	Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	13.74	28.31	20.30 ± 3.76	12.90	20.37	16.82 ± 1.37
Humedad relativa (%)	23	99	80 ± 10	52	95	69 ± 9
Velocidad del viento (m/s)	0.80	2.61	1.81 ± 0.34	1.65	5.11	2.91 ± 0.49
2020						
	Estación Campo de Marte			Estación Carabayllo		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	14.30	25.93	19.08 ± 3.22	14.25	26.97	19.53 ± 3.48
Humedad relativa (%)	61	92	82 ± 4	55	95	79 ± 7
Velocidad del viento (m/s)	1.02	3.21	2.26 ± 0.38	0.30	2.41	1.57 ± 0.24
	Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	14.13	26.62	20.02 ± 3.59	11.27	20.32	16.51 ± 1.68
Humedad relativa (%)	42	100	79 ± 12	54	95	74 ± 11
Velocidad del viento (m/s)	1.04	3.00	1.90 ± 0.31	1.58	5.28	2.85 ± 0.50
2021						
	Estación Campo de Marte			Estación Carabayllo		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	14.37	24.81	18.47 ± 2.75	14.76	26.30	18.36 ± 2.83
Humedad relativa (%)	68	93	84 ± 5	33	98	83 ± 9
Velocidad del viento (m/s)	0.60	3.29	2.16 ± 0.42	0.70	2.62	1.40 ± 0.28
	Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	14.43	26.72	19.38 ± 3.35	12.28	20.31	16.18 ± 1.56
Humedad relativa (%)	40	100	75 ± 13	55	86	67 ± 7
Velocidad del viento (m/s)	0.90	2.47	1.85 ± 0.29	1.92	6.03	2.91 ± 0.50

4.2. Variación mensual y estacional de las concentraciones de PM_{2.5}

4.2.1. Variación mensual

La Figura 23 muestra la variación de concentración media mensual de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2019 siendo las estaciones Campo de Marte y UMA2 las que presentaron mayor cantidad de registros de concentraciones medias. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales.

En la estación de Carabayllo se registran concentraciones medias que oscilan entre 20 µg/m³ y 30 µg/m³. Al tener poca cantidad de datos de concentraciones solo tiene concentraciones de enero, marzo y septiembre, siendo este último el que registra la mayor concentración media.

En la estación Campo de Marte se registran concentraciones similares cuyos valores oscilan entre 10 µg/m³ y 25 µg/m³. El comportamiento de la variación mensual de la concentración media en esta estación es similar al estudio realizado por Espinoza (2018) con la excepción del primer mes.

La estación San Juan de Lurigancho registra concentraciones medias más elevadas que las demás estaciones en la que cuyos valores están entre 20 µg/m³ y 40 µg/m³. Sin embargo, solo se tuvieron registros hasta el mes de julio dado que según el SENAMHI (2019), después entró en mantenimiento. La variación de la concentración media mensual tiene un comportamiento similar al estudio realizado por Espinoza (2018) con la excepción de los dos primeros meses.

En la estación UMA2, las concentraciones medias oscilan entre 15 µg/m³ y 25 µg/m³. Su comportamiento es diferente a las estaciones de Lima Metropolitana. Las concentraciones medias prácticamente oscilan poco. No se presenta un drástico incremento como en las estaciones Campo de Marte y UMA2 en los meses de marzo y abril.

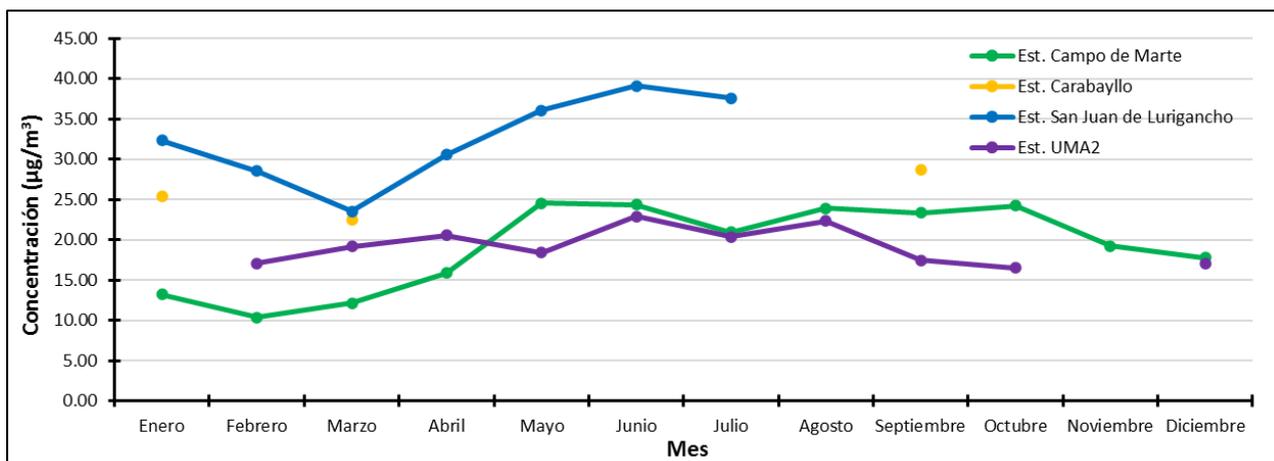


Figura 23. Variación de la concentración media mensual de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 24 muestra la variación de concentración media mensual de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020 en la que todas las estaciones presentan una cantidad abundante de datos para casi todos los meses. Solamente no se contó con datos para enero y diciembre en la estación Carabayllo y para agosto en la estación Campo de Marte. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales.

Con la excepción de la estación de San Juan de Lurigancho, las demás estaciones registran concentraciones medias que oscilan entre 10 µg/m³ y 25 µg/m³ mientras que la estación restante registra una concentración media por encima de 30 µg/m³. Tanto las estaciones Carabayllo como San Juan de Lurigancho presentan concentraciones medias menores a las del año 2019 en todos los meses (considerando solo los meses en que se tienen datos para ambos años). La estación Campo de Marte presenta también concentraciones medias menores a las del año 2019 excepto en cuatro meses. La explicación de este resultado se explica por las medidas de aislamiento establecidas por el Gobierno siendo las más destacadas en el año 2020 la cuarentena y los toques de queda en las noches como se mencionó en el punto 4.1.1.

En la estación UMA2, las concentraciones medias presentan concentraciones medias menores a las del año 2019 en todos los meses evidenciándose así las medidas de aislamiento

adoptadas por el Gobierno mencionadas en el párrafo anterior. Cabe recalcar que la ciudad de Arequipa estuvo en cuarentena hasta finales de agosto, sin embargo, la concentración media de dicho mes registró un aumento drástico. A partir de octubre se observa otro incremento de las concentraciones medias evidenciándose así el proceso de reactivación económica en la ciudad en la que las actividades de la Fase 3 de Reactivación Económica estuvieron suspendidas en las zonas urbanas de toda la región Arequipa hasta el mes de septiembre salvo autorización mediante Resolución Ministerial.

Además, en marzo y abril, todas las estaciones tuvieron sus concentraciones medias más bajas evidenciando así el efecto producido por la cuarentena general en las concentraciones de $PM_{2.5}$. Asimismo, las concentraciones medias de las estaciones de Lima Metropolitana empiezan a crecer en mayo, haciendo así evidente el efecto del retorno gradual de las actividades económicas, especialmente a partir de la Fase 2 de Reactivación Económica.

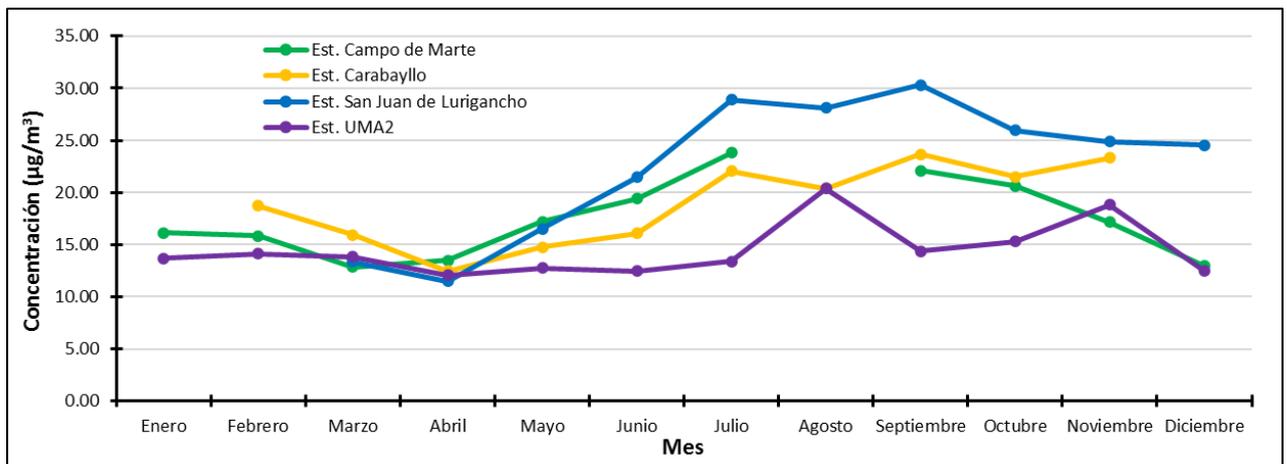


Figura 24. Variación de la concentración media mensual de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

La Figura 25 muestra la variación de concentración media mensual de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2021 en la que tres estaciones presentan una cantidad escasa de registros. En este año no se contó con datos para varios meses en las estaciones Campo de Marte y Carabayllo. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales.

Tanto las estaciones Carabayllo como San Juan de Lurigancho presentan concentraciones medias mayores a las del año 2020 en todos los meses (considerando solo los meses en que se tienen datos para ambos años). La estación Campo de Marte presenta también concentraciones medias mayores a las del año 2020 excepto en dos meses. La explicación radica en que en este año las medidas de aislamiento fueron menos rigurosas que en el año 2020 siendo esta vez las más resaltantes los toques de queda como se mencionó en el punto 4.1.1.

La estación UMA2 solo presentó registros de datos hasta el mes de abril. Solamente la concentración media de abril fue mayor a la del año 2020 mientras que en los tres meses anteriores fue ligeramente menor. Sin embargo, cabe recalcar que las medidas de aislamiento social iniciaron el 15 de marzo del 2020 por lo que es normal que, en enero y febrero, las concentraciones medias mensuales del año 2021 sean menores que en el año 2020. Junto con la estación San Juan de Lurigancho, se puede observar concentraciones medias similares en los febrero y marzo, indicando así que la cuarentena, que duró un mes en Lima Metropolitana y 15 días en Arequipa, no tuvo mucho impacto en las concentraciones de PM_{2.5}.

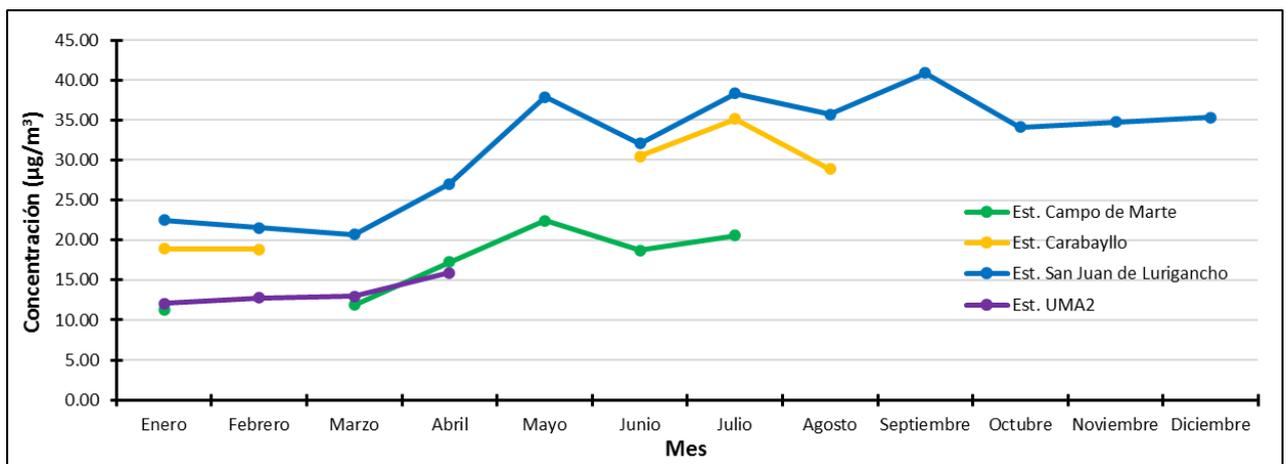


Figura 25. Variación de la concentración media mensual de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

4.2.2. Variación estacional

La Figura 26 muestra la variación de concentración media estacional de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en estudio para el año 2019 en la que la estación Carabayllo no registró datos para los meses que abarcan la estación de invierno y la estación San de Lurigancho no registró datos para los meses que abarcan la estación de primavera. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales.

En la estación Campo de Marte, la concentración media de verano registra el valor más bajo de todas las concentraciones medias mientras que la concentración media de invierno registra el valor más alto. Dichas concentraciones oscilan entre $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este año la variación de la concentración media estacional tuvo un comportamiento distinto al del estudio realizado por Espinoza (2018). En la estación Carabayllo, la concentración media de primavera es la mayor de todas y la concentración media de otoño es la más baja. En la estación San Juan de Lurigancho, se tiene un comportamiento similar a la estación Campo de Marte. Tanto en la estación Campo de Marte y San Juan de Lurigancho se puede ver que en invierno se presentan las concentraciones medias más altas. La razón se debe a que según SENAMHI (2019), el Anticiclón del Pacífico Sur tuvo una orientación hacia el noreste originando descensos de masas de aire fríos, incremento de vientos y afloramiento de aguas frías generándose condiciones atmosféricas estables. Esto fue un impedimento para la dispersión de contaminantes.

En la estación UMA2 se tiene una peculiaridad. A diferencia de las otras estaciones de calidad de aire, la concentración media de primavera es la más baja, sin embargo, el comportamiento de la variación estacional es parecido a la estación Campo de Marte. Además, las concentraciones medias son por lo general menores que las de las estaciones de Lima Metropolitana evidenciándose una vez más la influencia del parque automotor en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las estaciones de Lima Metropolitana explicado en el punto 4.1.1.

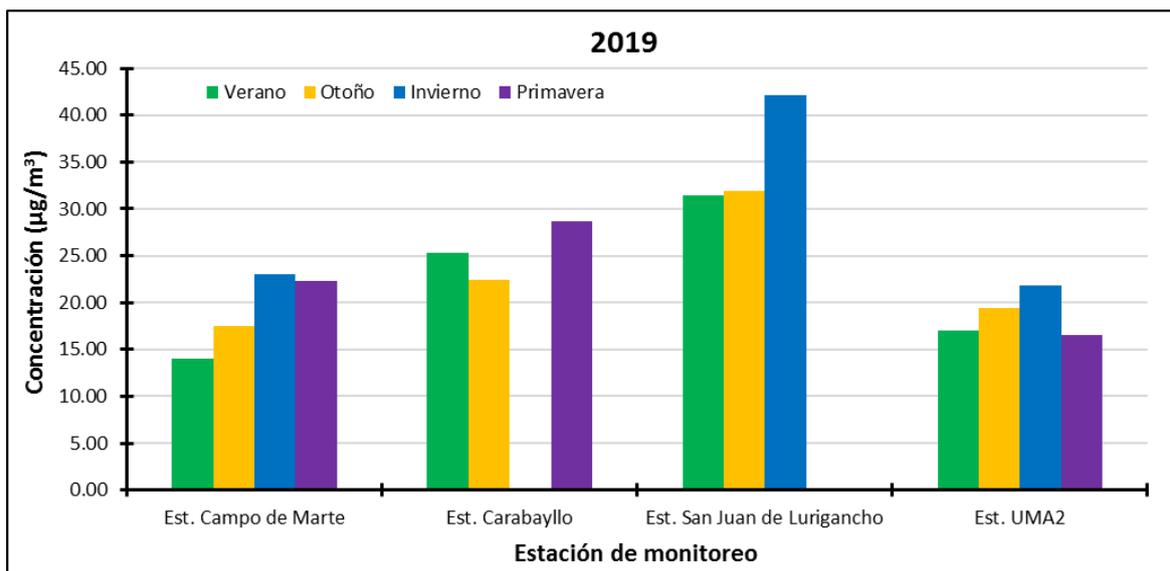


Figura 26. Variación de la concentración media estacional de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 27 muestra la variación de concentración media estacional de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020 en la que esta vez todas las estaciones de calidad de aire contaron con registro de datos para todas las estaciones del año. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales.

Tanto las estaciones de Lima Metropolitana como las de Arequipa tuvieron comportamientos similares en su variación estacional. Asimismo, las concentraciones medias son menores que las del año 2019 evidenciando así los efectos de la cuarentena general y los toques de queda impuestos por el Gobierno.

Asimismo, en todas las estaciones de calidad de aire, la concentración media más baja se dio en otoño. Cabe recalcar que la cuarentena general abarcó casi toda la estación de otoño por lo que esto explicaría las bajas concentraciones medias en otoño. Además, en todas las estaciones, especialmente las de Lima Metropolitana, se tuvo un fuerte incremento de las concentraciones medias en invierno con respecto a otoño. Esto se puede explicar por la implementación de la Fase 2 y Fase 3 de la Reactivación Económica y la finalización de la cuarentena en Lima Metropolitana mientras que la ciudad de Arequipa estuvo en cuarentena hasta finales de agosto.

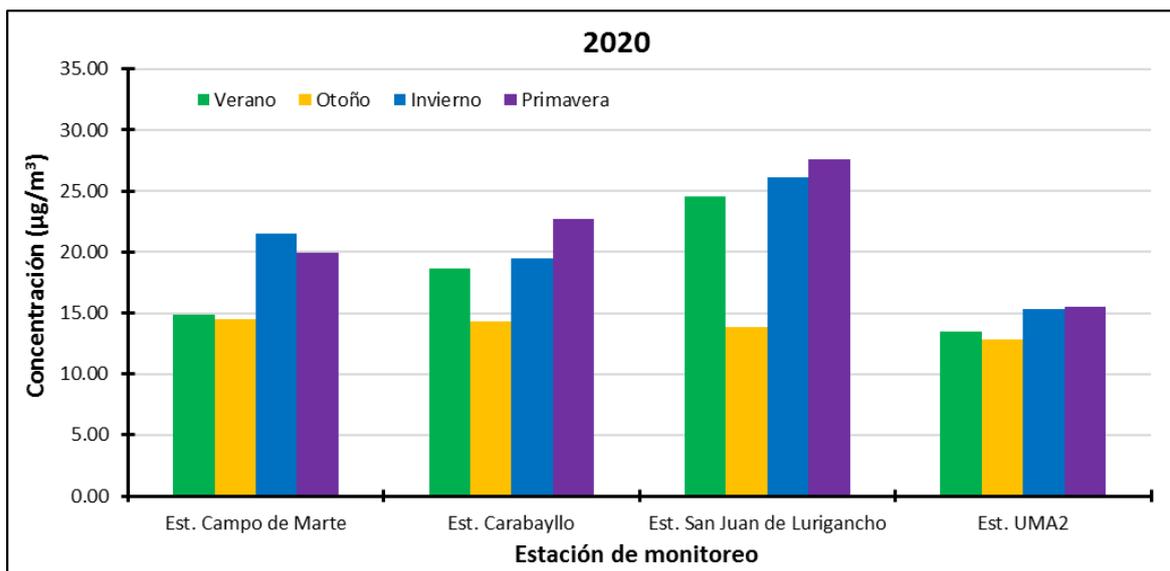


Figura 27. Variación de la concentración media estacional de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

La Figura 28 muestra la variación de concentración media estacional de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2021 en la que solo la estación San Juan de Lurigancho presenta datos para todas las estaciones del año. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales.

Se puede observar que la mayoría de concentraciones medias son mayores que las del año 2020. Dichas concentraciones podrían explicarse debido a la Reactivación Económica dado a que en el 2021 ya se habían reanudado las actividades económicas y, además, las medidas de aislamiento social del año 2021 fueron en general más flexibles que las del año 2020.

Asimismo, en todas las estaciones de calidad de aire, la concentración media más baja se dio en verano. Cabe recalcar que, en verano, el Gobierno impuso un mes de cuarentena en Lima Metropolitana, la cual se dio en febrero, y dos semanas de cuarentena en Arequipa, la cual se dio en las dos últimas semanas de febrero. Esto podría explicar las bajas concentraciones medias en verano. Además, se tuvo los toques de queda más estrictos del año en los 6 primeros meses y se prohibió los autos particulares en la que dicha prohibición fue todos los días durante la cuarentena y sábados y/o domingos durante otros cinco meses.

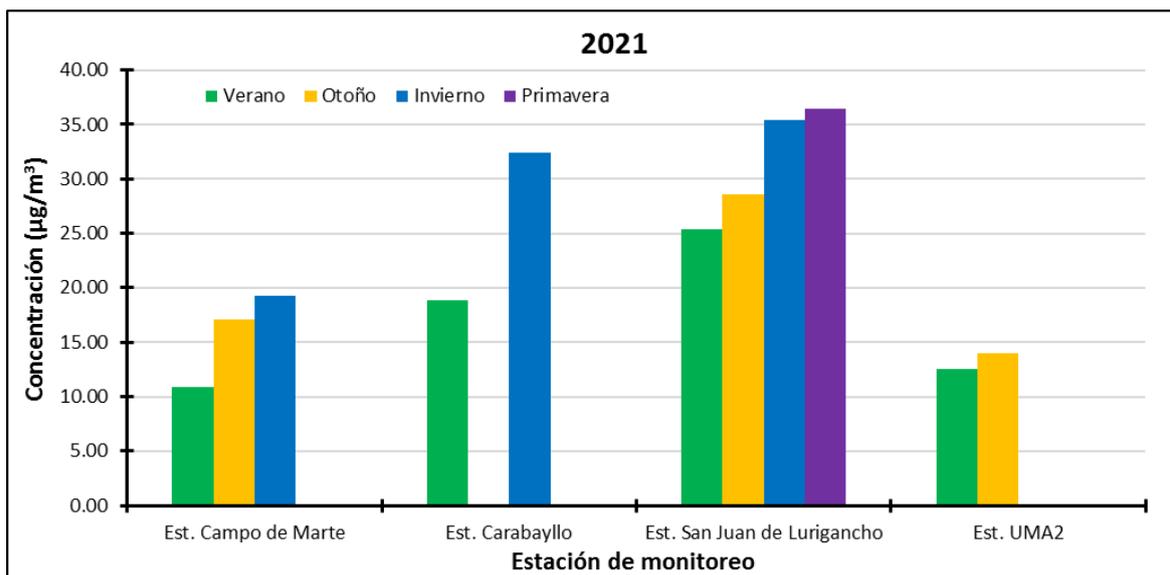


Figura 28. Variación de la concentración media estacional de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

4.3. Concentración diurna y nocturna de PM_{2.5}

4.3.1. Variación diaria

La Figura 29 muestra la variación de concentración diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2019 y la Figura 30 muestra el promedio de concentración diurna y nocturna de todo el año para cada estación. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios de 12 horas.

Se puede observar que en todo el año las concentraciones diurnas y nocturnas de las estaciones de Lima Metropolitana son generalmente mayores que las de Arequipa. En este tipo de variación también se comprueba la influencia del parque automotor en las concentraciones de PM_{2.5} de las estaciones de Lima Metropolitana. Asimismo, salvo en la estación Carabayllo, las concentraciones medias nocturnas son mayores que las concentraciones medias diurnas. Dicha tendencia es similar al estudio realizado en Chile por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA, 2003) en la comuna de Pudahuel ubicada ciudad de Santiago.

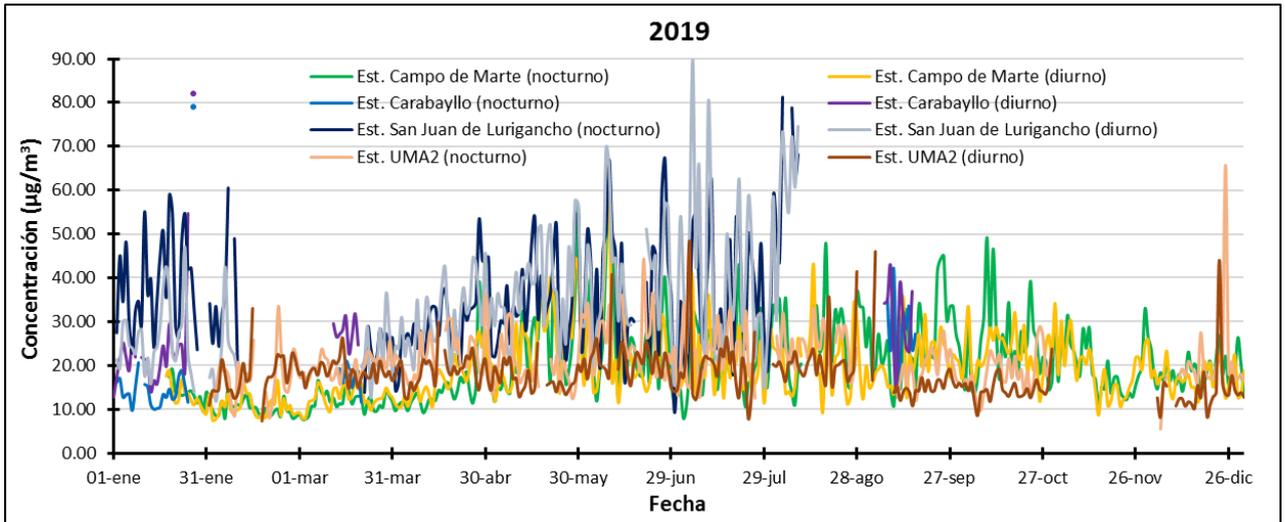


Figura 29. Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

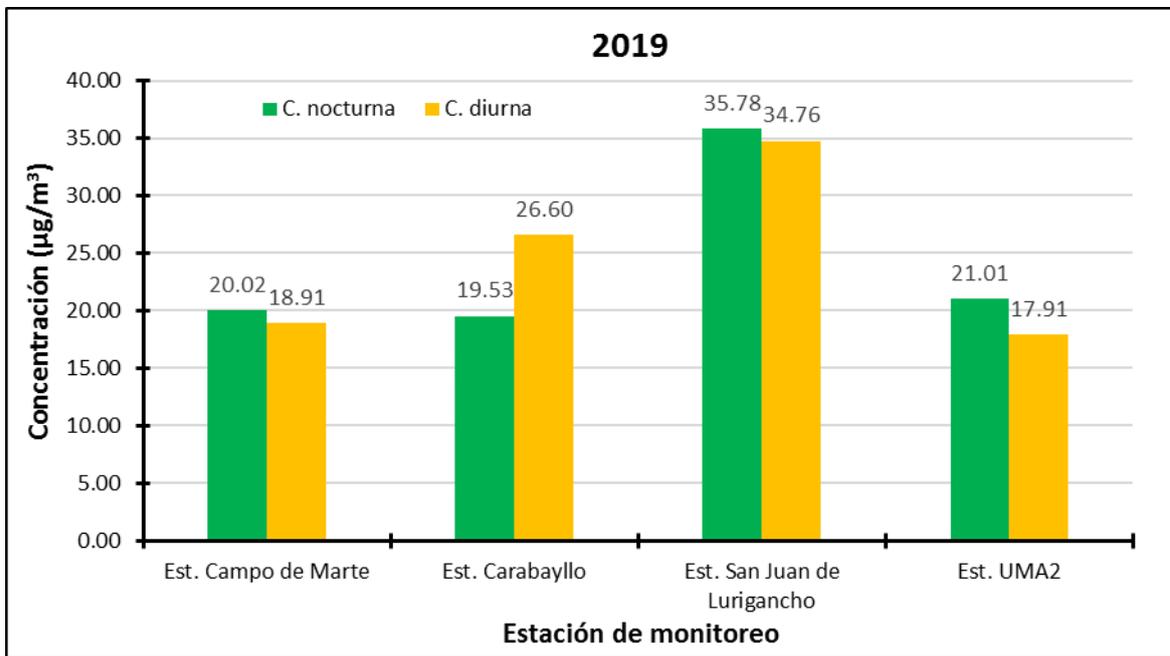


Figura 30. Concentración media diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} del año 2019 en las 4 estaciones de calidad de aire

La Figura 31 muestra la variación de concentración diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020 y la Figura 32 muestra el promedio de concentración diurna y nocturna de todo el año para cada estación. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios de 12 horas.

Se puede observar que en las concentraciones diurnas son generalmente mayores que las concentraciones nocturnas al menos en la mayor parte el año, especialmente en las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho. Esto evidenciaría los efectos del toque de queda en las concentraciones nocturnas ya que esta medida impidió a las personas transitar por las calles y las obligó a permanecer en sus viviendas. Cabe recordar que estos toques de queda fueron rigurosos en el 2020, especialmente durante la cuarentena general. Asimismo, las concentraciones medias diurnas y nocturnas de este año demuestran lo mencionado anteriormente. En las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho, las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias nocturnas y en las otras dos estaciones la diferencia entre la concentración media diurna y la concentración media nocturna es menor que en el año 2019. También, se puede ver que las concentraciones diurnas y nocturnas son bajas en marzo y abril respecto a otros meses. Esto sería otra evidencia de los efectos de la cuarentena general en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

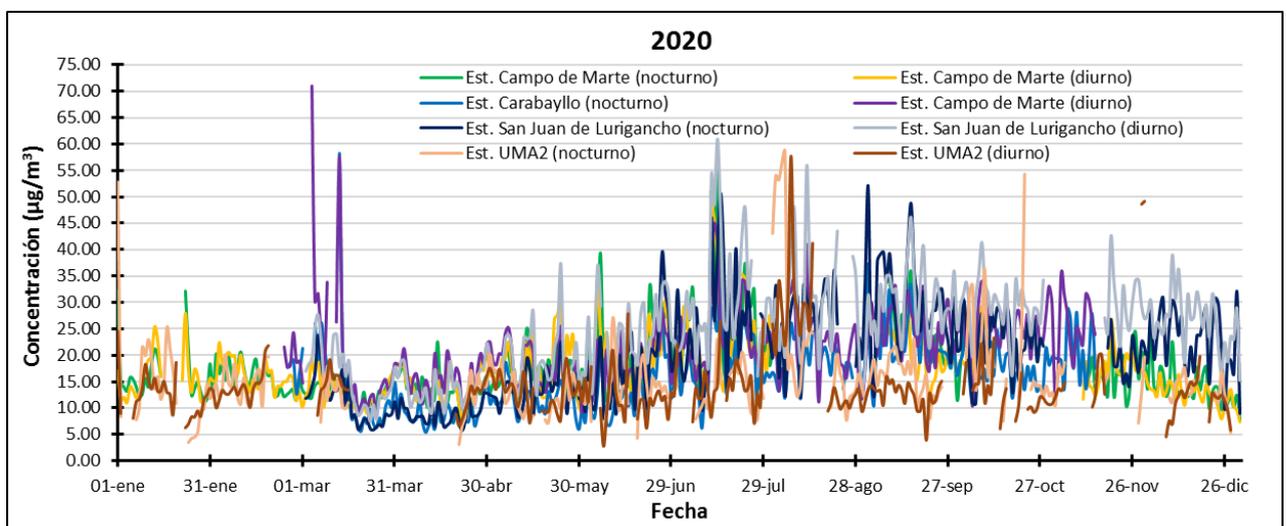


Figura 31. Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

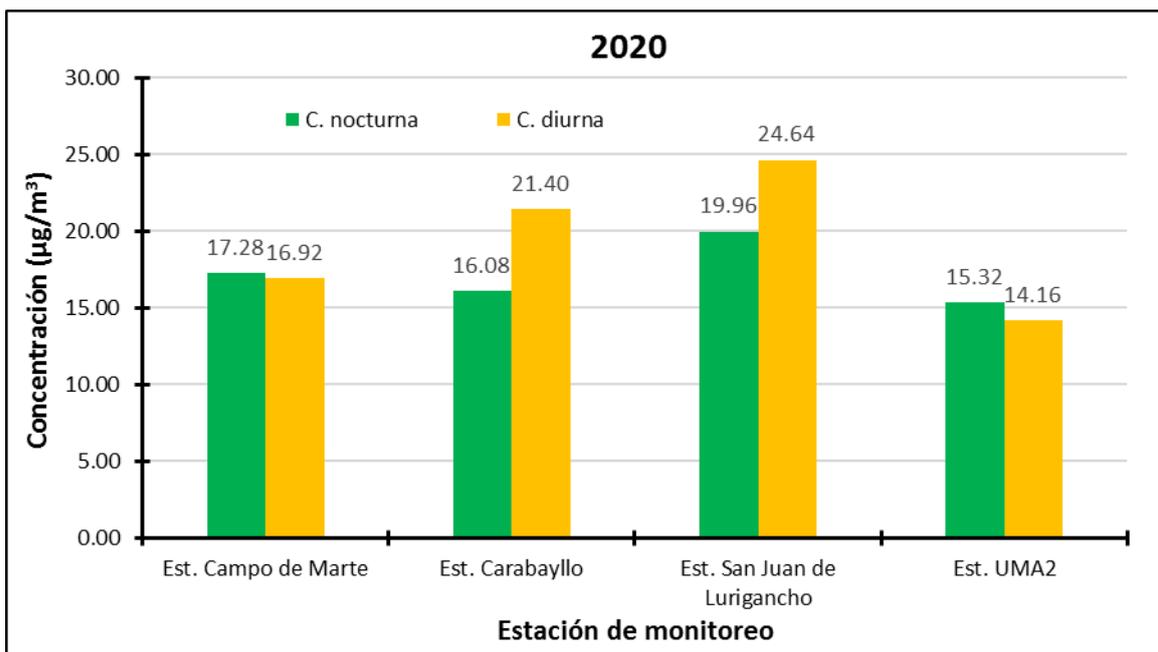


Figura 32. Concentración media diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} del año 2020 en las 4 estaciones de calidad de aire

La Figura 33 muestra la variación de concentración diaria diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2021 y la Figura 34 muestra el promedio de concentración diurna y nocturna de todo el año para cada estación. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios de 12 horas.

Se puede observar que las concentraciones diurnas son generalmente mayores que las concentraciones nocturnas al menos en la mayor parte el año, especialmente en las estaciones de Lima Metropolitana. Asimismo, las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias diurnas en todas las estaciones. Esto evidenciaría los efectos del toque de queda en las concentraciones nocturnas en la que esta vez se aplicó durante todo el año y no desde mediados de marzo como en el año 2020. Sin embargo, hay que recalcar que la diferencia entre la concentración diurna y la concentración nocturna en las estaciones Campo de Marte y Carabayllo pudo ser menor dado que solo se tuvo datos para cuatro meses en el primero y siete meses en el segundo, en ambas estaciones no se contó datos para los últimos meses del año. En estos meses mencionados, los toques de queda fueron muy flexibles dado que el proceso de vacunación fue acelerando cada vez más.

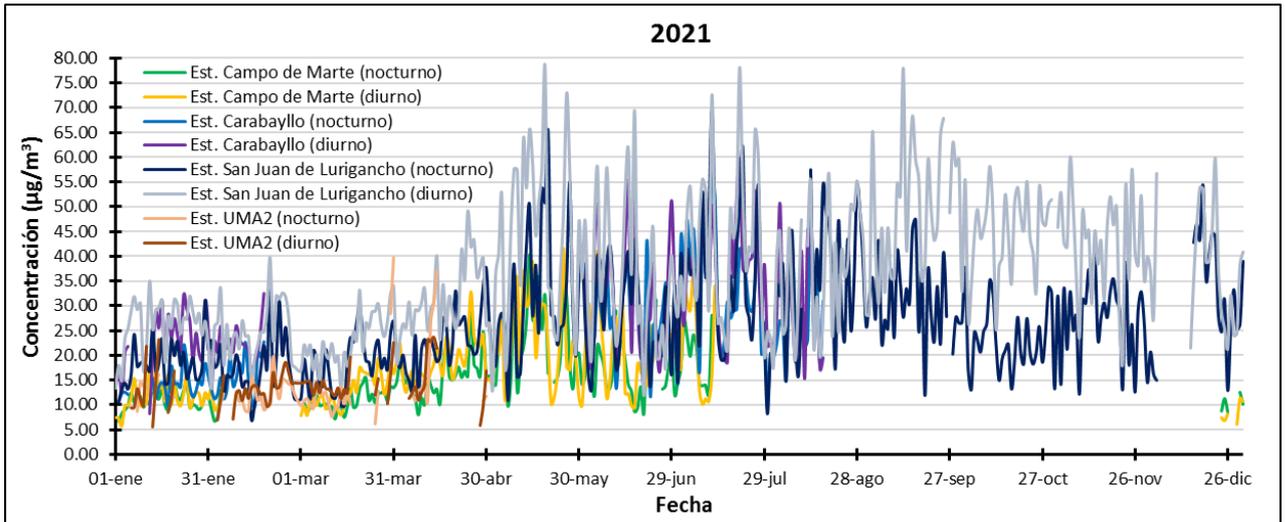


Figura 33. Variación de la concentración diaria diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

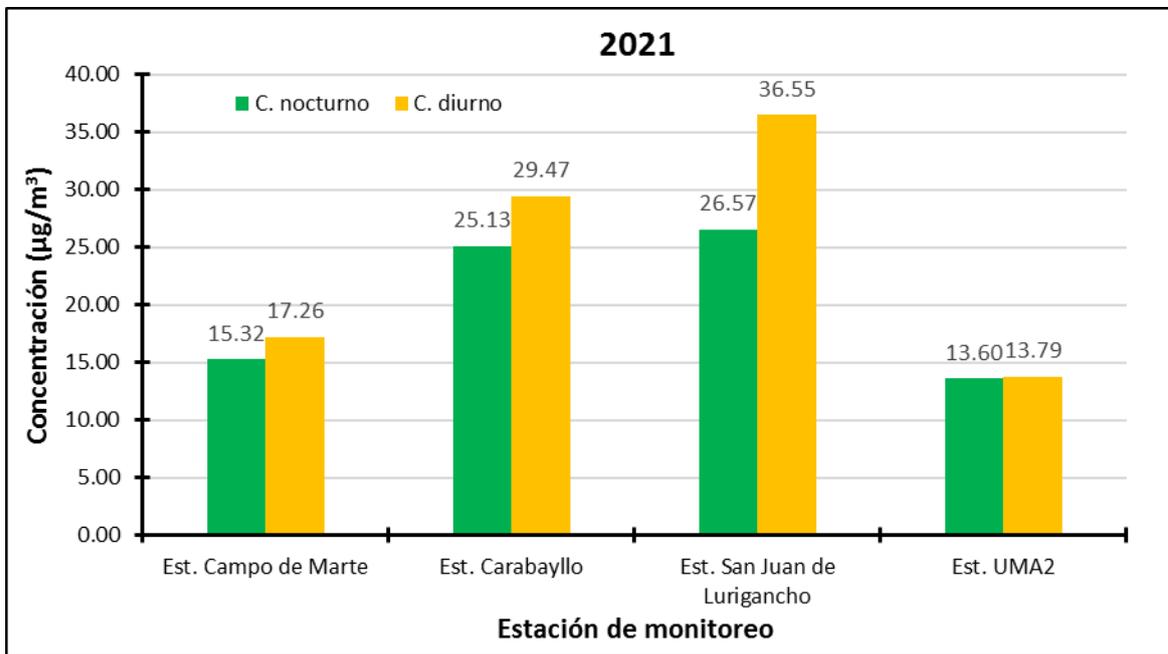


Figura 34. Concentración media diaria diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ del año 2021 en las 4 estaciones de calidad de aire

La Figura 35 reafirma lo que se vio en las Figuras 30, 32 y 34 respecto a la estación Campo de Marte. La concentración media diurna y nocturna del año 2020 son menores que las del año 2019. Esto pone en evidencia el efecto de las medidas de aislamiento social impuestas por el Gobierno en las concentraciones de $PM_{2.5}$. Se esperaría que la concentración media diurna y nocturna del año 2021 tengan valores más altos que de los que presentan en donde

la concentración media diurna sea mucho mayor que la del año 2020 y la concentración media nocturna tenga un valor similar o superior que la del año 2020, no obstante, esto no ocurrió debido a que solo se tuvo registros de datos hasta mediados de julio del 2021. Como se mencionó anteriormente, en esos meses se tuvo los horarios de toque de queda más estrictos de todo el año, una cuarentena que duró un mes y restricción del uso de vehículos particulares que duró cinco meses. Dicha restricción fue de todos los días durante el mes de cuarentena y los sábados y/o domingos en los cuatro meses restantes.

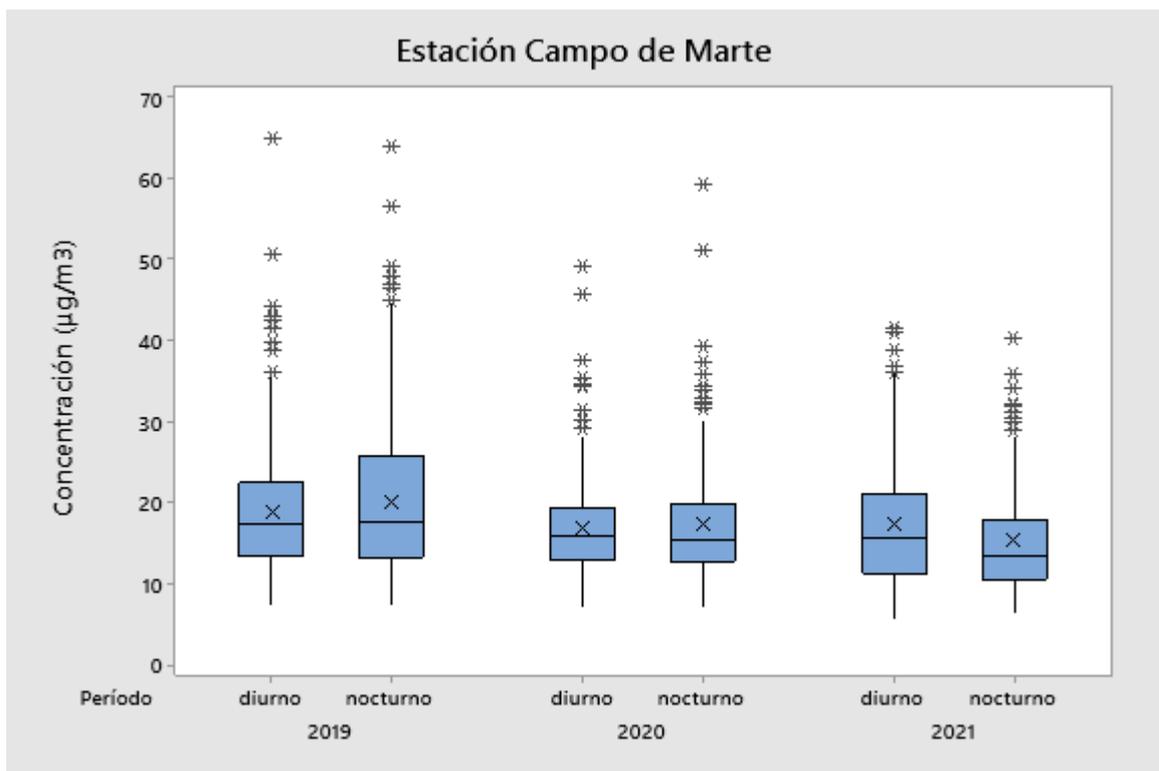


Figura 35. Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5} de la estación Campo de Marte en los tres años en estudio

La Figura 36 reafirma lo que se vio en las Figuras 30, 32 y 34 respecto a la estación Carabayllo. La concentración media diurna y nocturna del año 2020 son menores que las de los años 2019 y 2021. Sin embargo, se esperaría que la concentración media diurna y nocturna del 2021 no fueran tan altos respecto al año 2020 ya que las medidas de aislamiento social solo se flexibilizaron un poco, especialmente en los primeros meses del 2021. Esto ocurrió porque la estación de calidad de aire solo dispuso datos mayormente en los meses de

junio, julio y agosto en donde se hicieron más flexibles las medidas de aislamiento social que a su vez coincidió con la estación de invierno.

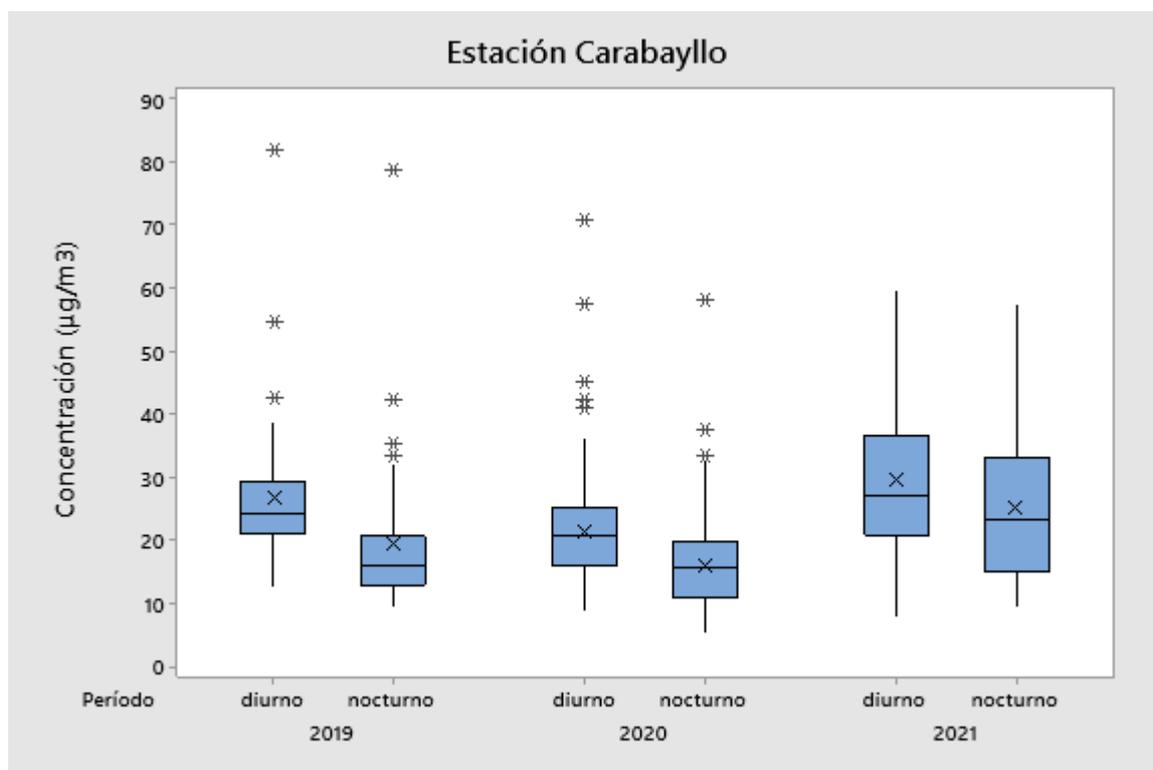


Figura 36. Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5} de la estación Carabaylo en los tres años en estudio

La Figura 37 reafirma lo que se vio en las Figuras 30, 32 y 34 respecto a la estación San Juan de Lurigancho. La concentración media diurna y nocturna del año 2020 son menores que las de los años 2019 y 2021. Esto puede ser explicado por el efecto de las medidas de aislamiento social impuestas por el Gobierno en las concentraciones de PM_{2.5}. Como se mencionó anteriormente, en el 2020 destacaron la cuarentena general y los toques de queda por las noches y a veces también en los fines de semana mientras que en el 2021 destacaron los toques de queda por las noches y la prohibición de vehículos particulares. Sin embargo, en el 2021 ya se había reanudado las actividades económicas casi en su totalidad dado que la Reactivación Económica se implementó paulatinamente en el año 2020.

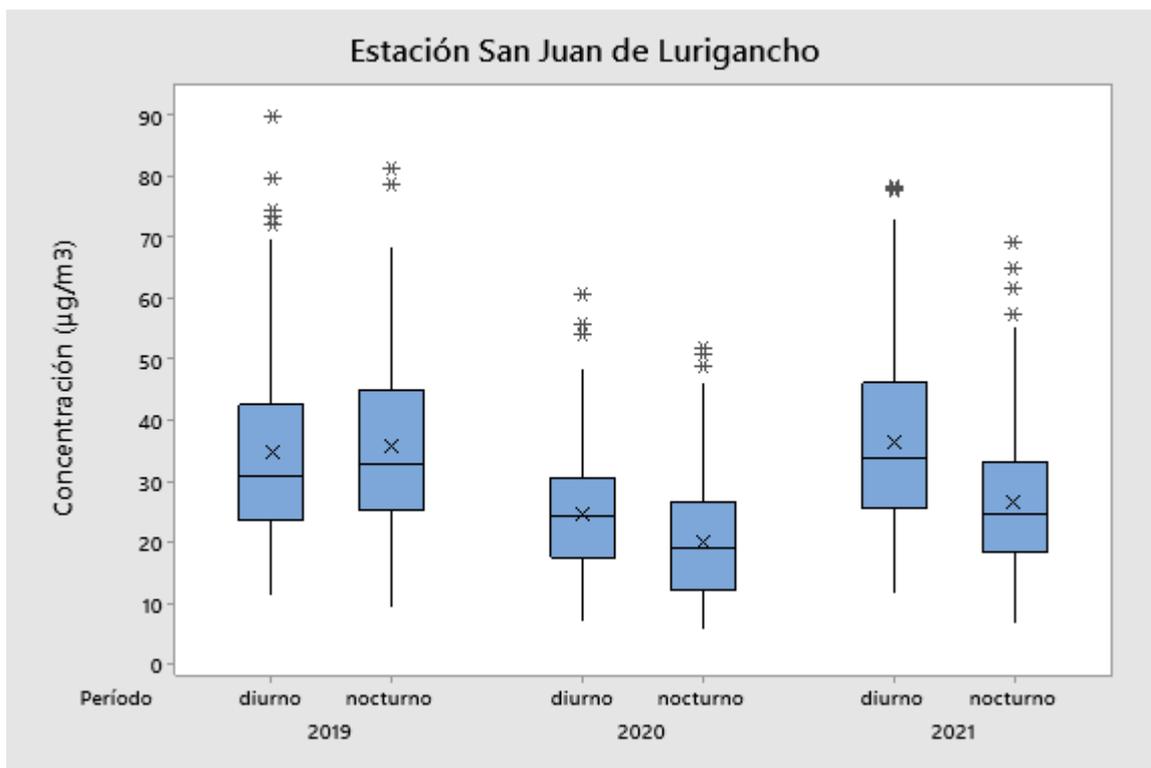


Figura 37. Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5} de la estación San Juan de Lurigancho en los tres años en estudio

La Figura 38 reafirma lo que se vio en las Figuras 30, 32 y 34 respecto a la estación San Juan de Lurigancho. La concentración media diurna y nocturna del año 2020 son menores que las del año 2019 haciendo evidente una vez más el efecto de las medidas de aislamiento social impuestas por el Gobierno. El comportamiento de estas concentraciones medias se parece un poco a las de la estación Campo de Marte. Se esperaría que la concentración media diurna y nocturna del año 2021 sea mayor que las del año 2020, pero como se mencionó anteriormente, dado que solo se tuvo datos hasta el mes de abril no ocurrió lo esperado. En esos cuatro meses las medidas fueron estrictas en comparación las que hubo posteriormente (sin considerar mayo y junio). Destacaron la cuarentena de 15 días, los toques de queda y la prohibición de los vehículos particulares los fines de semana.

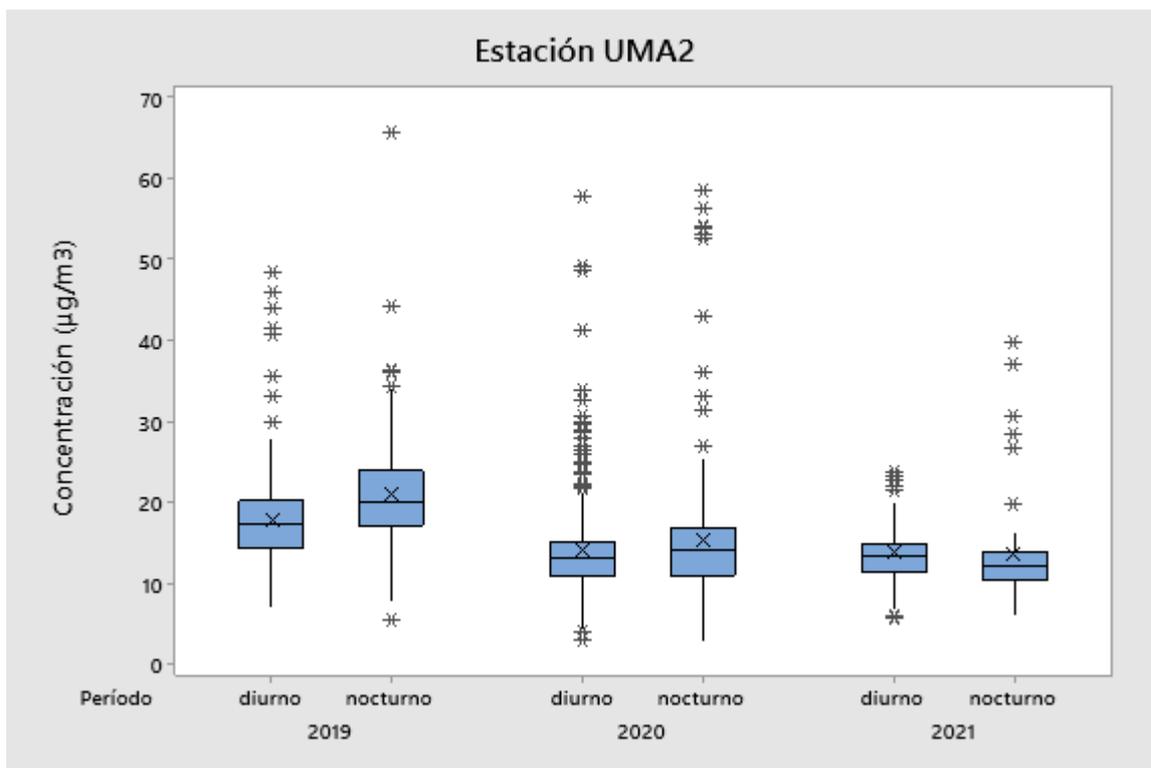


Figura 38. Diagrama de cajas para la concentración diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ de la estación UMA2 en los tres años en estudio

4.3.2. Variación semanal

La Figura 39 muestra la variación de concentración media semanal diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2019. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios semanales de 12 horas.

Se puede observar una diferencia menos clara entre las concentraciones medias de las estaciones de Lima Metropolitana y las concentraciones medias de Arequipa a lo largo de la semana. Sin embargo, todavía se puede afirmar que las concentraciones medias de Arequipa son menores que las concentraciones medias de Lima Metropolitana si nos fijamos en la estación San Juan de Lurigancho. Esto coincide con el estudio realizado por Espinoza (2018), cuyo resultado indicó que los mayores niveles de concentraciones de material particulado fino se encuentran en la Zona Este de Lima Metropolitana.

Además, se puede observar que las concentraciones medias diurnas en el domingo disminuyen con respecto al día sábado. Dicha tendencia coincide con los estudios realizados por Sánchez y Ordoñez (2016), y Espinoza (2018) en variaciones semanales con promedios de 24 horas, quienes afirman que eso se debe al desarrollo de las actividades en la ciudad en donde los domingos disminuyen las actividades antropogénicas y el flujo de transporte vehicular.

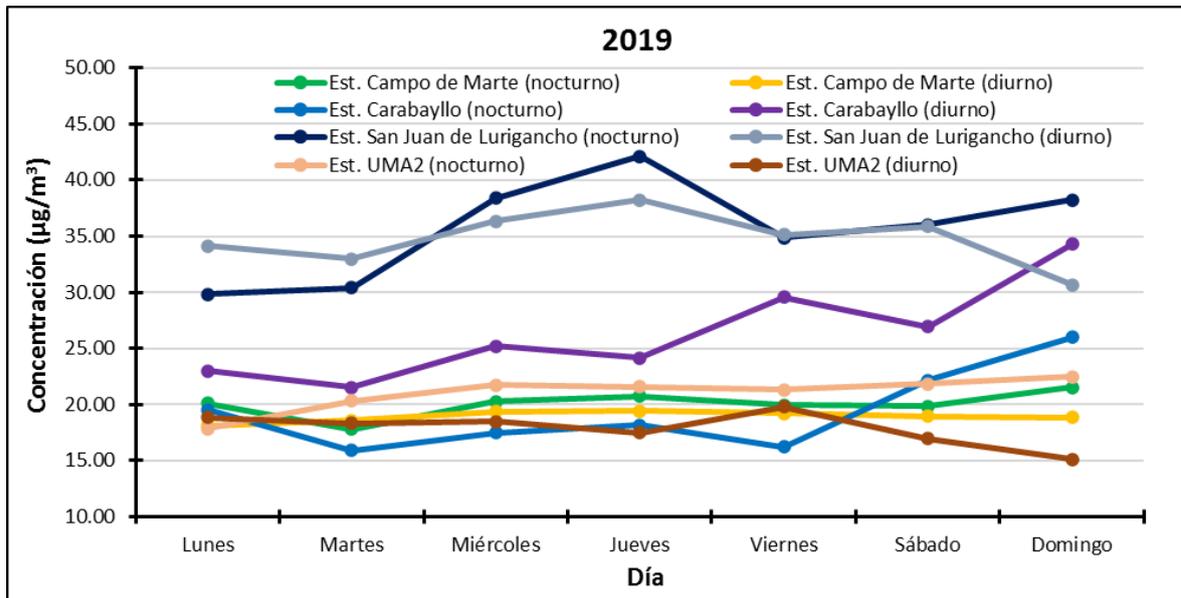


Figura 39. Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 40 muestra la variación de concentración media semanal diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios semanales de 12 horas.

Se puede observar que en ambas ciudades tanto las concentraciones medias diurnas como nocturnas son menores a las del año 2019. Esto demuestra una vez más que las medidas de aislamiento social impuestas por el Gobierno tuvieron efecto en las concentraciones de PM_{2.5}.

Además, en todas las estaciones las concentraciones medias del domingo son muchas veces las más bajas de toda la semana, especialmente las concentraciones medias nocturnas. Esto se puede explicar por el toque de queda durante todo el día establecido específicamente para los domingos en las que esta medida estuvo vigente desde inicios de abril hasta finales de junio y desde mediados de agosto hasta mediados de septiembre.

Asimismo, se puede ver que las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias nocturnas en las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho reflejando así los resultados de la Figura 31 y también el efecto del toque de queda, el cual fue establecido desde mediados de marzo (inicio de la pandemia) en las noches cuyo horario más estricto fue de 18:00 hasta las 5:00 mientras que el más flexible fue de 23:00 hasta las 4:00.

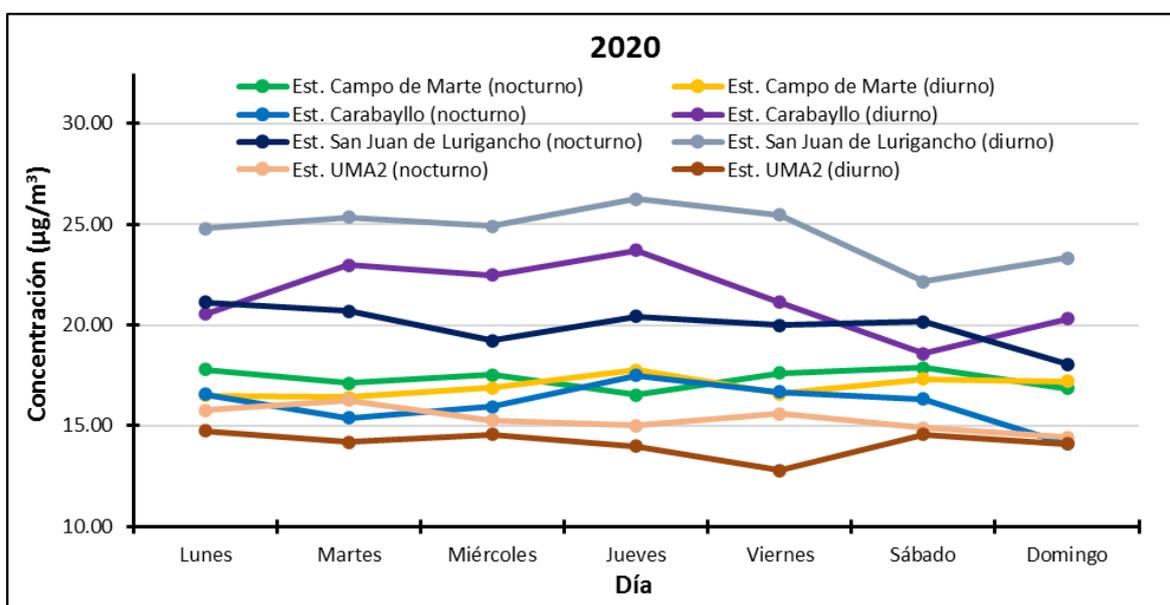


Figura 40. Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

La Figura 41 muestra la variación de concentración media semanal diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2021. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios semanales de 12 horas.

Se puede visualizar que en ambas ciudades tanto las concentraciones medias diurnas como nocturnas son mayores a las del año 2020. Esto comprueba que el efecto que tuvo la reanudación de las actividades económicas en las concentraciones de $PM_{2.5}$ aunque también hubo otro efecto atenuante proveniente de las medidas de aislamiento social implementadas por el Gobierno, siendo la más resaltante el toque de queda.

Además, las concentraciones medias diurnas son generalmente mayores que las concentraciones medias nocturnas, especialmente en las estaciones de Lima Metropolitana. Dicho comportamiento se explicaría por el toque de queda establecido durante las noches hasta las 4:00 am, medida que pudo haber influido mucho en las concentraciones nocturnas recalcando también que en la estación Carabayllo solo se tuvo datos para solo cuatro meses y en la estación Campo de Marte solo se tuvo datos hasta mediados de julio.

Asimismo, la prohibición de la circulación de vehículos los domingos hasta finales de agosto y la implementación del toque de queda durante todo el día los domingos durante seis a diez semanas, causaron efecto de disminución en las concentraciones medias diurnas y nocturnas de los domingos con respecto al día sábado, con la posible excepción de la estación Carabayllo.

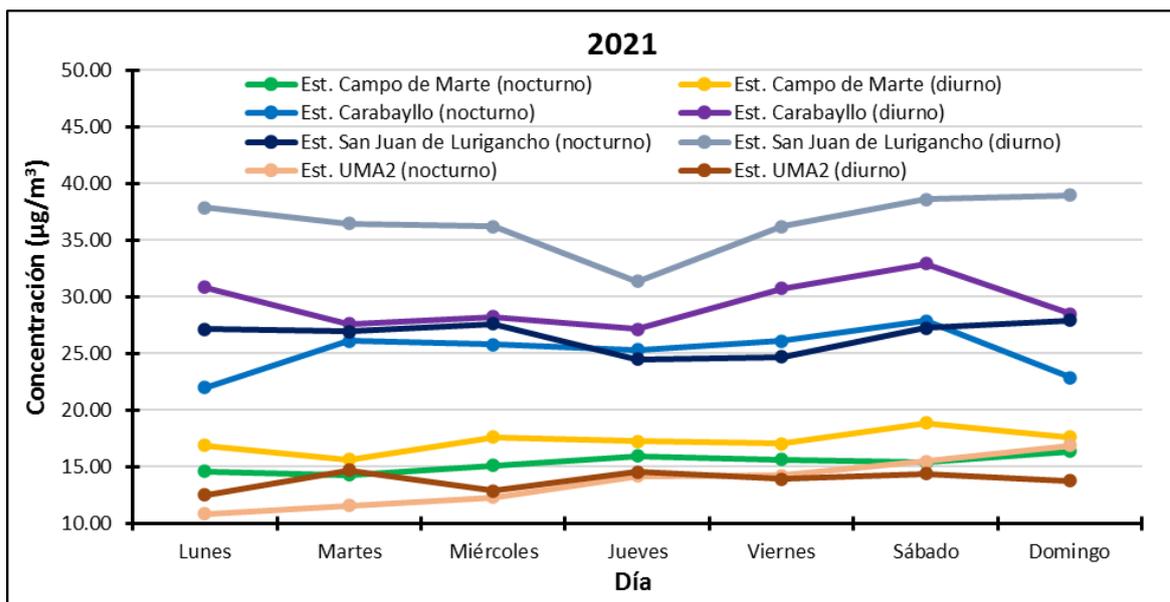


Figura 41. Variación de la concentración media semanal diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

4.3.3. Variación mensual

La Figura 42 muestra la variación de concentración media mensual diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones en estudio para el año 2019. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales de 12 horas.

El comportamiento de la variación mensual de todas las estaciones es similar a la variación mensual con promedios mensuales de 24 horas. En todas las estaciones se pueden ver que las concentraciones medias nocturnas son generalmente mayores que las concentraciones medias diurnas en la mayoría de meses en que presentan registros, lo cual reafirma el resultado obtenido en la Figura 29.

Además, las concentraciones medias de la ciudad de Arequipa son por lo general menores que las concentraciones medias de la ciudad de Lima Metropolitana, especialmente las concentraciones medias diurnas. Esto se puede explicar por el tamaño del parque automotor en la ciudad de Lima Metropolitana, el cual es más grande que en la ciudad de Arequipa como se mencionó en el punto 4.1.1.

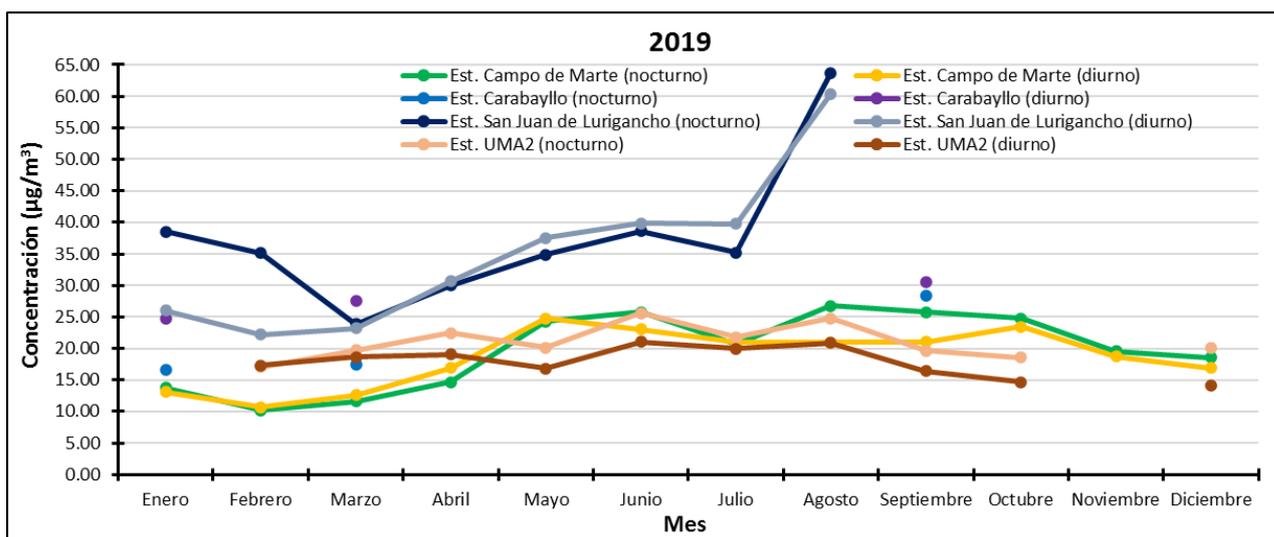


Figura 42. Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 43 muestra la variación de concentración media mensual diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales de 12 horas.

Se puede observar que las concentraciones medias de marzo y abril tanto diurnas como nocturnas fueron las más bajas en todos los meses evidenciando así el efecto de la cuarentena general en las concentraciones diurnas y nocturnas. Asimismo, a partir de mayo se observa un crecimiento de las concentraciones medias respecto a abril en la que se explicaría por el retorno gradual a las actividades económicas.

Además, en las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho se puede ver una notoria diferencia entre las concentraciones medias diurnas y las concentraciones medias nocturnas en las que las primeras son mayores que las segundas haciendo evidente la influencia del toque de queda en las noches en las concentraciones nocturnas. La explicación de la notoriedad de la diferencia en estas dos estaciones en comparación con las otras dos radicaría en que en las dos primeras se encuentran en distritos populares mientras que la estación

Campo de Marte se encuentra en una zona residencial y la estación UMA2 se encuentra en una ciudad que cuyo tamaño de parque automotor es muy inferior al de Lima Metropolitana

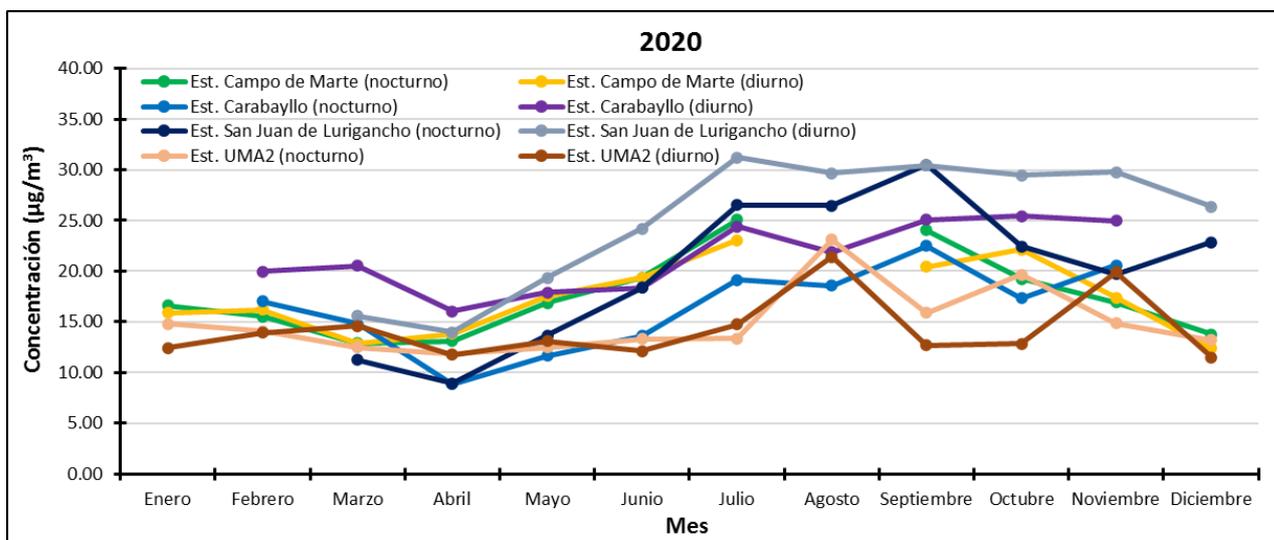


Figura 43. Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

La Figura 44 muestra la variación de concentración media mensual diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2021. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios mensuales de 12 horas.

Se puede ver que casi todas las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias nocturnas evidenciando también así el toque de queda en las noches y adicionalmente, la poca disponibilidad de datos en las estaciones Campo de Marte, Carabayllo y UMA2. Como se mencionó en el punto 4.3.2., hubo nula disponibilidad de datos para 5 a 8 meses, según cada estación.

Asimismo, las concentraciones medias de febrero son en la mayoría de estaciones las más bajas, pero no difieren mucho de las concentraciones medias de enero tanto diurnas como nocturnas lo cual indicaría que la cuarentena impuesta durante todo febrero en Lima

Metropolitana y la segunda mitad de febrero en Arequipa no tuvo un impacto significativo en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

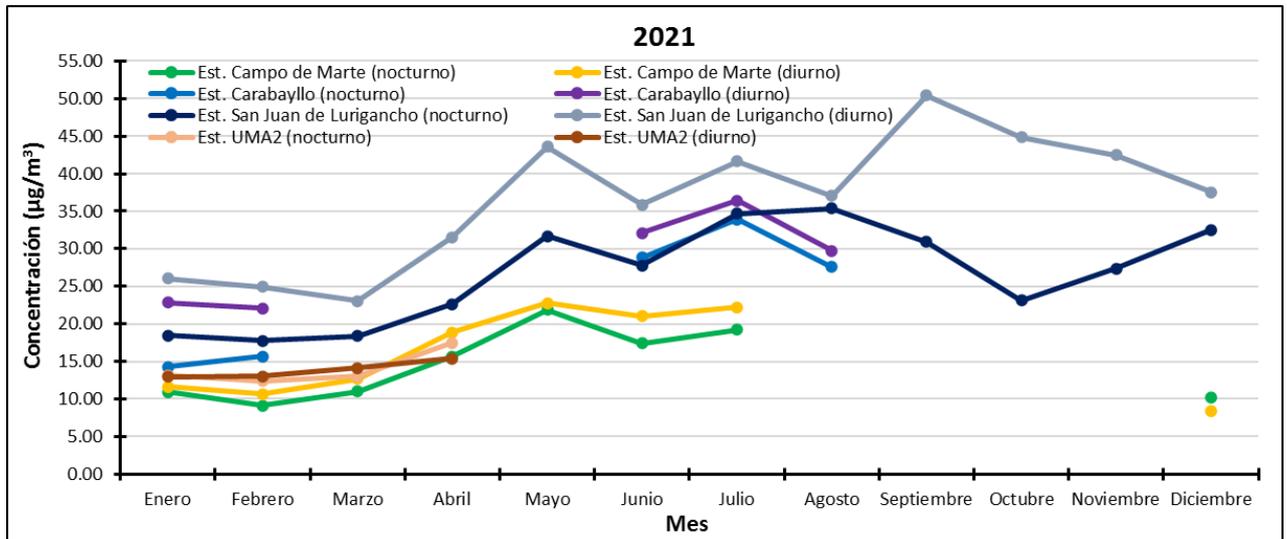


Figura 44. Variación de la concentración media mensual diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

4.3.4. Variación estacional

La Figura 45 muestra la variación de concentración media estacional diurna y nocturna de $PM_{2.5}$ en las 4 estaciones de calidad de aire en estudio para el año 2019. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales de 12 horas.

El comportamiento de la variación estacional de la mayoría de estaciones es similar a la variación mensual con promedios mensuales de 24 horas. En todas las estaciones se pueden ver que las concentraciones medias nocturnas son generalmente mayores que las concentraciones medias diurnas ya sea en la mayoría o todas las estaciones del año en que presentan registros, lo cual reafirma el resultado obtenido en la Figura 29. También, se observa que en la mayoría de estaciones, la concentración media diurna y nocturna se da en invierno. Esto se debe a que según SENAMHI (2019), se generaron condiciones atmosféricas estables que hicieron más difícil la dispersión de contaminantes a causa de la orientación del Anticiclón del Pacífico Sur hacia el noreste que originó descensos de masas de aire fríos.

Así como en el caso de la variación mensual, las concentraciones medias de la ciudad de Arequipa son por lo general menores que las concentraciones medias de la ciudad de Lima Metropolitana, especialmente las concentraciones medias diurnas. La explicación de este resultado es el inmenso tamaño del parque automotor en la ciudad de Lima Metropolitana, el cual es más grande que el de la ciudad de Arequipa.

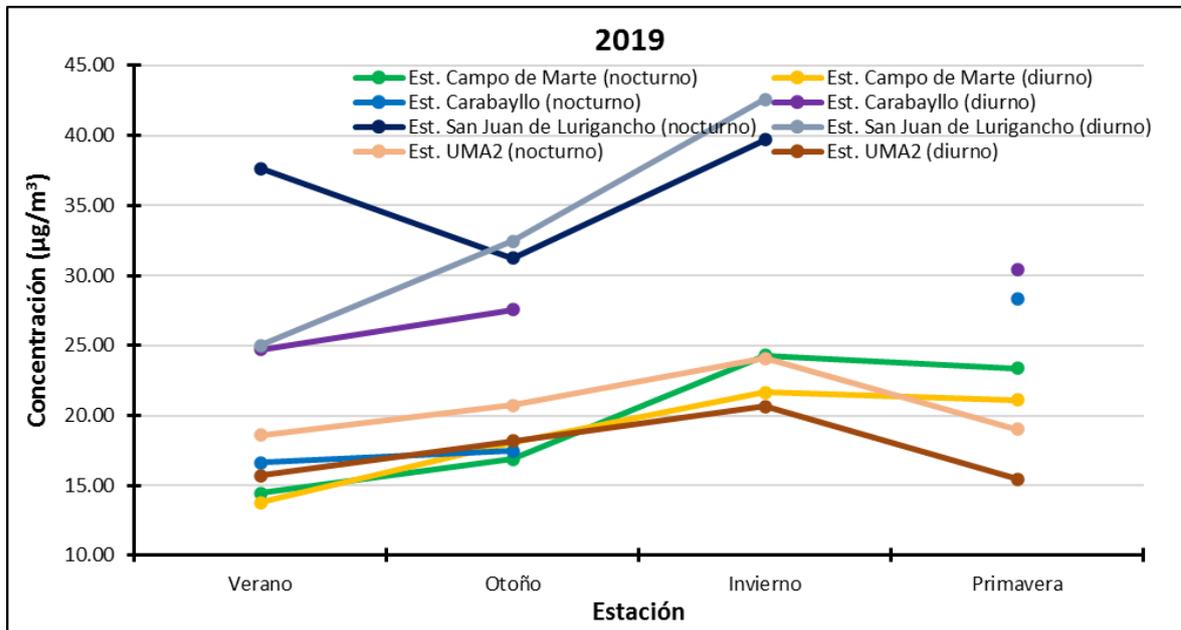


Figura 45. Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2019

La Figura 46 muestra la variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2020. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales de 12 horas.

Se puede observar que las concentraciones medias tanto diurnas como nocturnas son casi siempre menores en otoño lo cual indicaría la influencia de la cuarentena general establecida por el Gobierno en las concentraciones de PM_{2.5}. en la que dicha cuarentena abarcó toda la estación de otoño y parte de la estación de invierno.

Asimismo, las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias nocturnas en las estaciones Carabayllo y San Juan de Lurigancho evidenciando de esta forma la influencia del toque de queda en las concentraciones nocturnas.

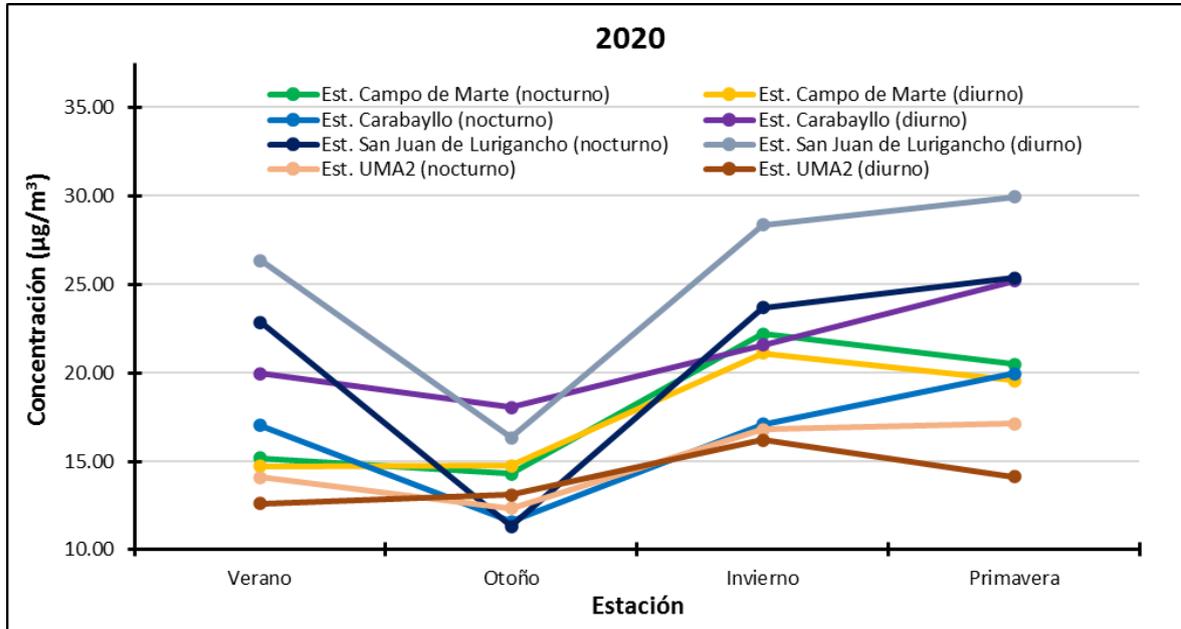


Figura 46. Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2020

La Figura 47 muestra la variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones en estudio para el año 2021. No se hizo comparación alguna con los estándares nacionales y/o de la OMS dado a que no se aplica a promedios estacionales de 12 horas.

Se puede observar que en todas las estaciones de calidad de aire las concentraciones medias diurnas son mayores que las concentraciones medias nocturnas evidenciando así la influencia del toque de queda en las concentraciones nocturnas. Sin embargo, cabe recalcar nuevamente que la falta de disponibilidad de datos en este año influyó mucho en las concentraciones medias estacionales.

Además, en verano se impusieron las medidas más restrictivas como: la cuarentena de febrero (todo el mes en Lima Metropolitana y las dos últimas semanas en Arequipa), el toque

de queda durante todo el día los domingos y el horario de toque de queda en las noches más estricto (9:00 pm a 4:00 am). Estas medidas podrían explicar por qué las concentraciones medias de verano tanto diurnas como nocturnas son las más bajas en todas las estaciones de calidad de aire.

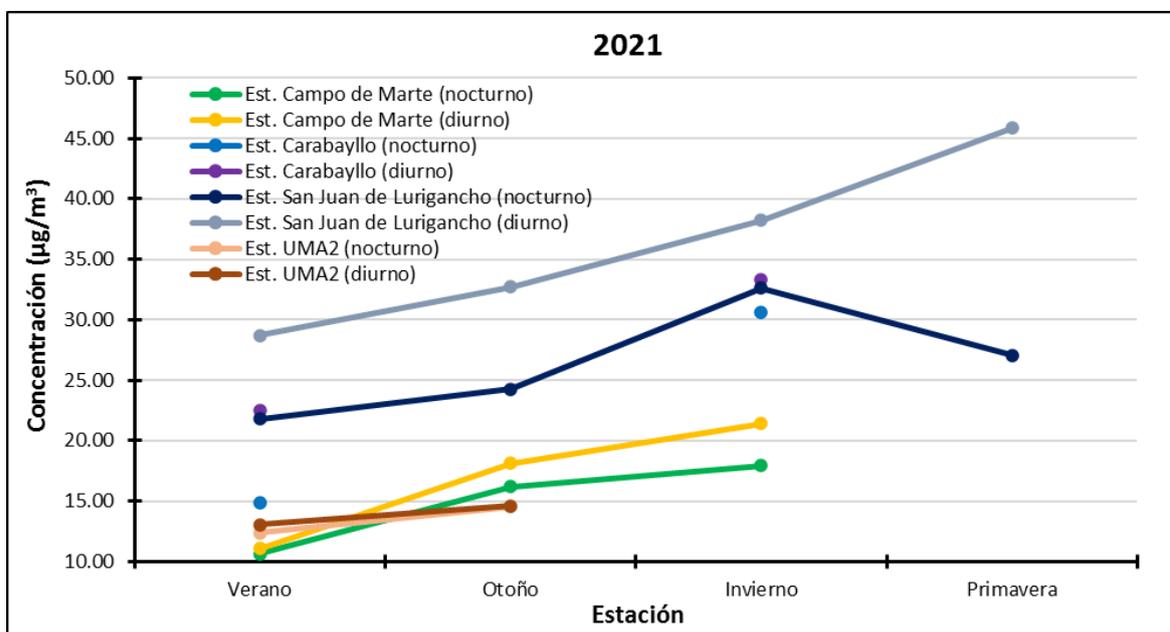


Figura 47. Variación de la concentración media estacional diurna y nocturna de PM_{2.5} en las 4 estaciones de calidad de aire en el año 2021

4.4. Evaluación de la influencia de las medidas adoptadas en las concentraciones de PM_{2.5}

La Figura 48 muestra la variación de la concentración media diaria de PM_{2.5} en la estación Campo de Marte en los 3 años de estudio durante el período 15 de marzo – 30 de abril. En los tres años de estudio, las concentraciones registraron valores similares a lo largo del período sin mostrar diferencias significativas entre ellas. Las concentraciones varían entre 5 µg/m³ y 35 µg/m³ en la que en la mayoría de días cumplen con la guía de la OMS y en todo el período cumplen con el ECA.

En el año 2019 las concentraciones superan la guía de la OMS solo una vez durante el mes de marzo que abarca el período siendo el 16 de marzo el día en que se supera dicho estándar con un valor de 15.27 µg/m³ mientras que durante el mes de abril se supera el estándar en

15 veces, es decir, durante medio mes. Además, se alcanzaron los valores más altos en los últimos días de abril registrándose el valor más alto el 28 de abril con $31.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, el valor más bajo se registró el 5 de abril con $9.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el año 2020 las concentraciones superan la guía de la OMS en los tres últimos días de marzo con valores de $15.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los días 29, 30 y 31 de marzo, respectivamente. Asimismo, durante el mes de abril se supera el estándar en 9 veces, es decir, durante casi un tercio del mes. Durante la segunda mitad de abril se puede ver notoriamente que las concentraciones son casi en su totalidad menores que en los otros dos años. La concentración más alta se registró el 14 de abril con un valor de $18.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que la más baja se registró el 22 de abril con un valor de $8.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el año 2021 las concentraciones superan la guía de la OMS en cinco días del mes de marzo que es abarcado por el período en estudio en la que dichas concentraciones altas se registraron a partir del 20 de marzo hasta el último día del mes. Además, durante el mes de abril se supera el estándar en 21 veces, es decir, más de dos tercios del mes. De manera similar al año 2019, se alcanzaron los valores más altos en los últimos días de abril registrándose el valor más alto el 25 de abril con $30.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, el valor más bajo se registró el 15 de marzo con $8.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

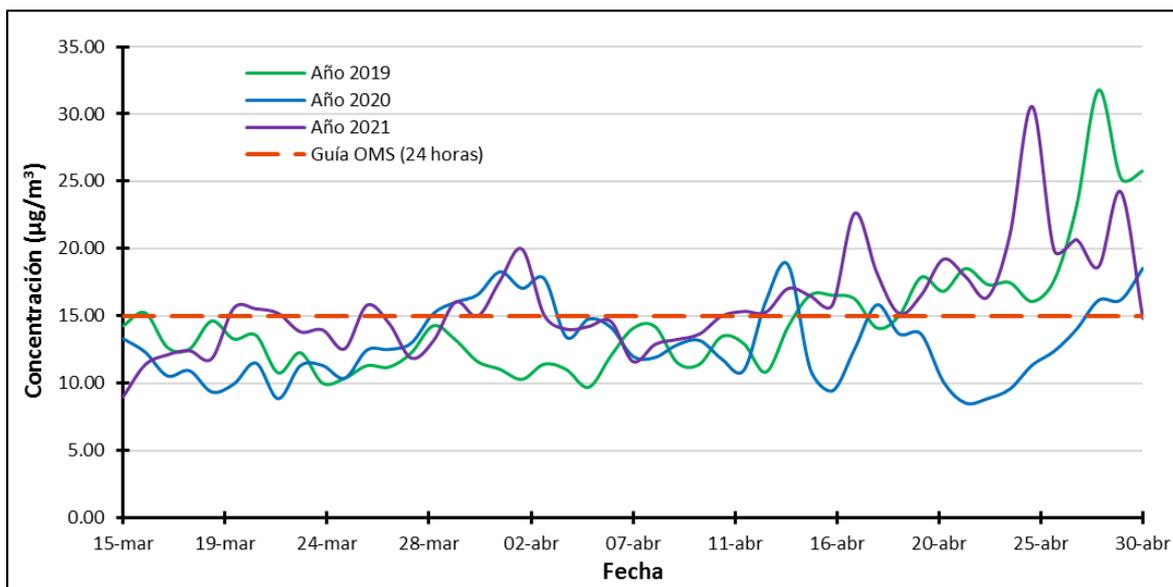


Figura 48. Variación de la concentración media diaria de PM_{2.5} en la estación Campo de Marte en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril

En la Figura 49 se puede observar que la media, primer cuartil y tercer cuartil alcanzaron sus picos en el año 2021. Además, se corrobora que en el año 2021 se presentaron mayores concentraciones que superan la guía de la OMS mientras que en el año 2020 se registró la menor cantidad de concentraciones que superan el estándar mencionado. Sin embargo, en el año 2019 se registraron tres valores atípicos mientras que en el año 2021 se registraron solo dos.

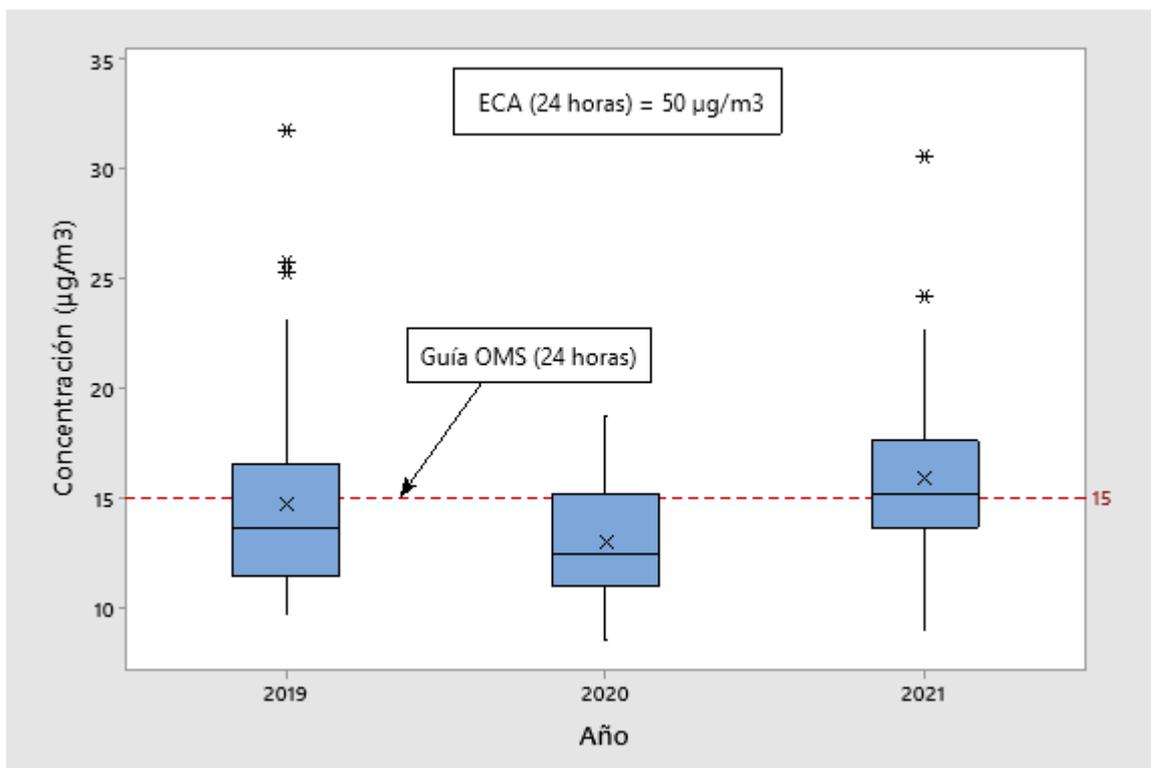


Figura 49. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación Campo de Marte para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio

La Figura 50 muestra la variación de concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación San Juan de Lurigancho en los 3 años de estudio durante el período 15 de marzo – 30 de abril. Se puede ver que las concentraciones del año 2020 son predominantemente menores que las concentraciones de los años 2019 y 2021. En los tres años de estudio, las concentraciones de los años 2019 y 2021 registraron valores similares a lo largo del período sin mostrar grandes diferencias entre ellas. Las concentraciones varían entre $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre los tres años en la que, en el año 2020 la mayoría de días cumplen con la guía de la OMS y en todo el período cumplen con el ECA mientras que en los años 2019 y 2021 todas las concentraciones superan la guía de la OMS.

En el año 2019 no se contaron con datos para los 7 primeros días del período en estudio. De todos modos, las concentraciones superan la guía de la OMS como se mencionó anteriormente. La concentración más baja se registró el 24 de marzo (tercer día de este período en estudio) con un valor de $17.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de abril, las concentraciones empiezan a tener valores más frecuentemente altos que en marzo siendo el 30 de abril el día

en que se registró la mayor concentración del período con un valor de $46.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor muy cercano al ECA.

En el año 2020 las concentraciones superan la guía de la OMS solo una vez durante el mes de marzo que abarca el período siendo el 16 de marzo el día en que se supera dicho estándar con un valor de $17.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que durante el mes de abril se supera el estándar en los dos últimos días del mes con valores de $15.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los días 29 y 30 de abril, respectivamente. En este año las concentraciones oscilan entre $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo los máximos valores los mencionados anteriormente en este párrafo.

En el año 2021 las concentraciones superan la guía de la OMS como se mencionó anteriormente. La concentración más baja se registró el 15 de marzo (primer día de este período en estudio) con un valor de $16.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar al año 2019, desde abril, las concentraciones empiezan a tener valores más frecuentemente altos que en marzo siendo el 24 de abril el día en que se registró la mayor concentración del período con un valor de $36.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

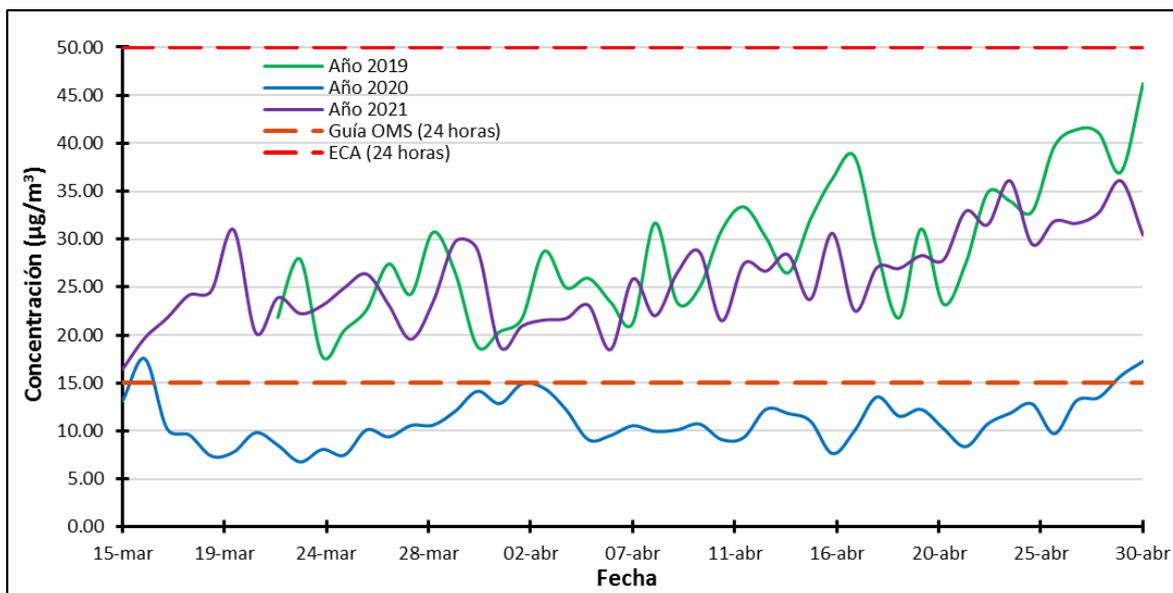


Figura 50. Variación de la concentración media diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en la estación San Juan de Lurigancho en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril

En la Figura 51 se puede observar que la media, primer cuartil y tercer cuartil alcanzaron sus picos en el año 2019. Además, se corrobora que en los años 2019 y 2021 todas las concentraciones superan la guía de la OMS mientras que en el año 2020 casi todas las concentraciones cumplen el estándar mencionado. Asimismo, en ese mismo año no se registraron valores atípicos que superan la guía de la OMS a diferencia de la estación Campo de Marte.

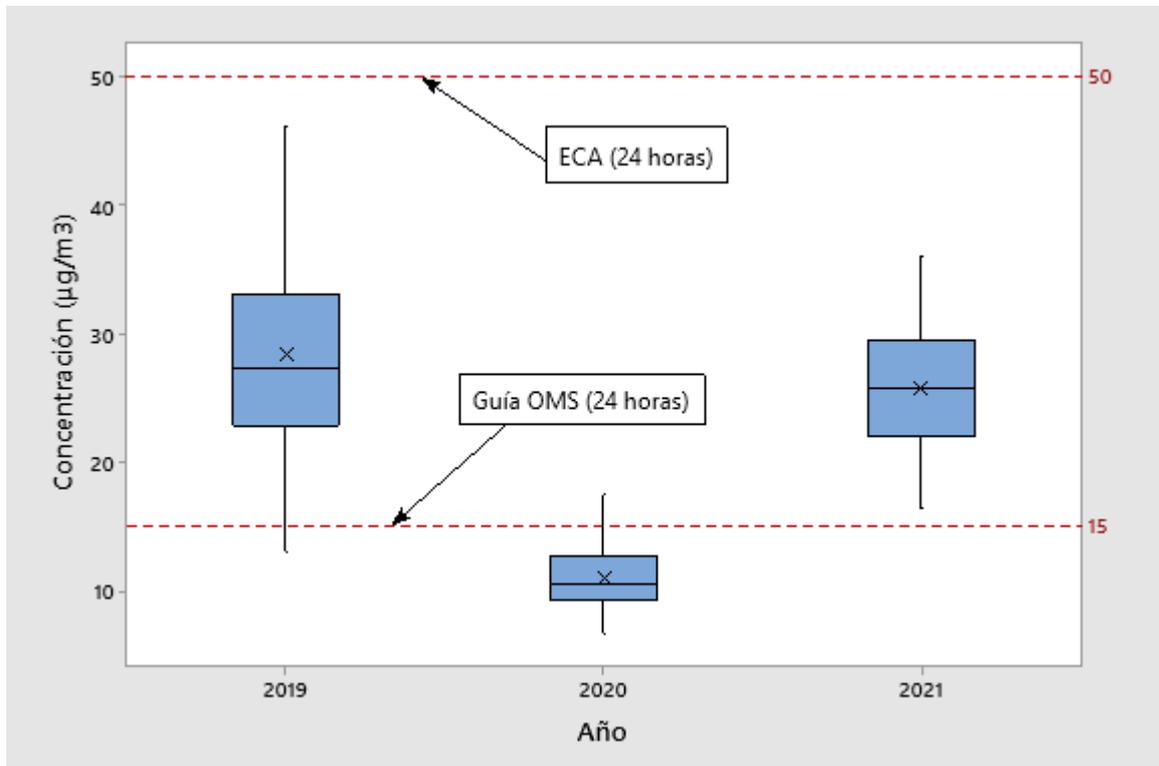


Figura 51. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ de la estación San Juan de Lurigancho para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio

La Figura 52 muestra la variación de concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación San Juan de Lurigancho en los 3 años de estudio durante el período 15 de marzo – 30 de abril. En los tres años se presentaron algunos días en que no hubo registros de datos, con mayor frecuencia en los años 2020 y 2021. Se puede ver que la mayoría de las concentraciones del año 2019 son predominantemente mayores que las concentraciones de los años 2020 y 2021. Las concentraciones varían entre $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre los tres años en la que, en los años 2020 y 2021 la mayoría de días cumplen con la guía de la OMS. Todas las concentraciones cumplen con el ECA.

En el año 2019 las concentraciones superan la guía de la OMS en casi todo el período excepto en un día, el cual es el 5 de abril con un valor de $14.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones son casi similares a lo largo del período con algunos valores más altos durante abril. La concentración más alta se registró el 30 de abril con un valor de $27.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que la concentración más baja es la única concentración que supera la guía de la OMS mencionada anteriormente.

En el año 2020 las concentraciones superan la guía de la OMS solamente en abril en tres ocasiones con valores de $15.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $15.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los días 25, 27 y 30 de abril, respectivamente. En marzo las concentraciones cumplen la guía de la OMS, aunque solo se tienen registros de dos días para dicho mes que es abarcado por el período en la que las concentraciones registraron valores de $12.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $11.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los días 15 y 16 de marzo, respectivamente. La concentración más baja del período fue registrada el 21 de abril con un valor de $6.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el año 2021 las concentraciones superan dos veces la guía de la OMS durante marzo en los días 30 y 31 de marzo con valores de $30.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $24.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Asimismo, también se registraron cuatro concentraciones que superan la guía de la OMS durante abril, las cuales se registraron en los días 11, 12, 13 y 14 de dicho mes. La concentración más alta del período se registró el 13 de abril con un valor de $31.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que la concentración más baja se registró el 29 de marzo con un valor de $9.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

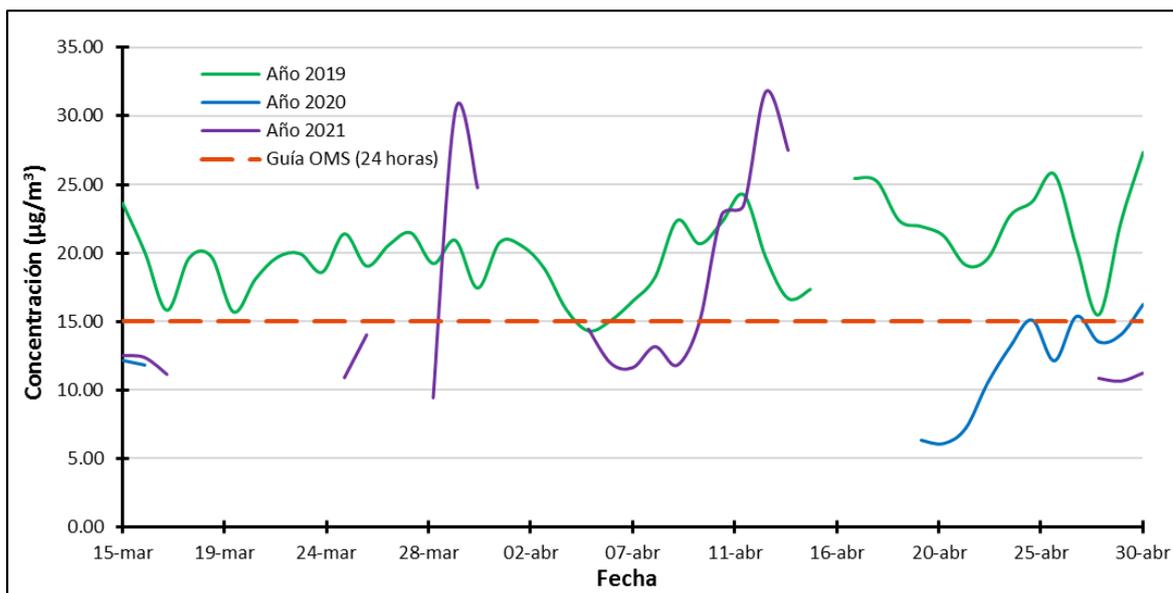


Figura 52. Variación de la concentración media diaria de $PM_{2.5}$ en la estación UMA2 en los 3 años de estudio para el período 15 de marzo – 30 de abril

En la Figura 53 se puede observar que la media y el primer cuartil alcanzaron sus picos en el año 2019 mientras que el tercer cuartil lo alcanzó en el año 2021. Además, se corrobora que en el año 2019 casi todas las concentraciones superan la guía de la OMS mientras que en el año 2020 casi todas las concentraciones cumplen el estándar mencionado. Además, se puede ver una gran diferencia entre el tercer cuartil y la mediana en el año 2021 e incluso es también notable la diferencia entre el tercer cuartil y la media. No se registraron valores atípicos en ningún año.

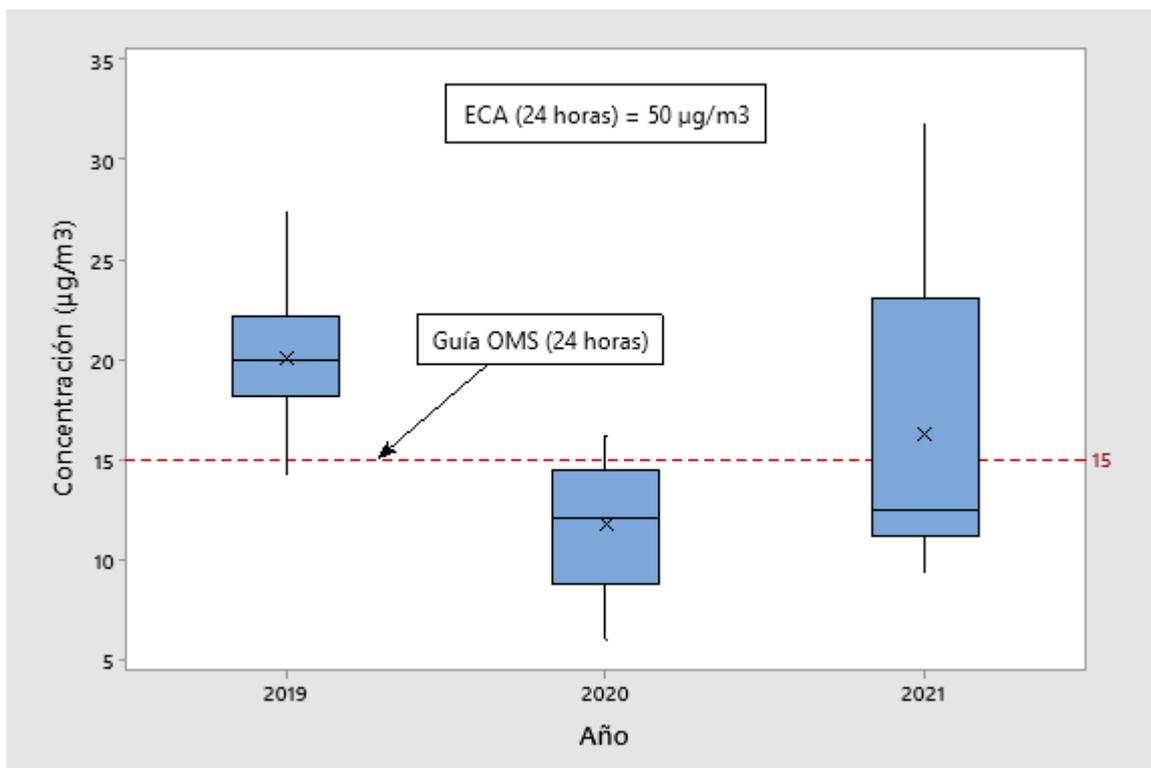


Figura 53. Diagrama de cajas para la concentración media diaria de PM_{2.5} de la estación UMA2 para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio

La Tabla 9 resalta los estadísticos para los tres años en estudio y las diferencias entre ellos. Se puede observar que, en las tres estaciones, las concentraciones medias diarias son menores en el 2020 que en el 2019 siendo esta diferencia muy grande en la estación San Juan de Lurigancho y pequeña en la estación Campo de Marte evidenciando así los efectos de la cuarentena general establecida por el Gobierno en el año 2020. Asimismo, se puede observar que las concentraciones medias diarias son mayores en el 2021 que en el 2020 siendo esta diferencia mayor en la estación San Juan de Lurigancho y menor en la estación Campo de Marte lo que evidencia el retorno parcial a las actividades cotidianas. Dicha parcialidad se debe a que algunas actividades económicas no se realizaban con total normalidad y los toques de queda en las noches. Además, se puede observar que las concentraciones medias diarias son mayores en el 2019 que en el 2021 en las estaciones de San Juan de Lurigancho y UMA2 mientras que en la estación Campo de Marte la concentración media diaria del año 2021 es mayor que el año 2019. Esto también evidenciaría que, en ese período, algunas actividades económicas no se realizaban normalmente indicando así que las actividades cotidianas no se habían recuperado totalmente. No obstante, hay un factor que no podemos obviar: el fenómeno La Niña. Según

Fischer (2022), la última vez que se detectó dicho fenómeno meteorológico fue en septiembre de 2020 y es probable que se extienda hasta febrero de 2023 siendo catalogado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como un “triple episodio”. El SENAMHI (2022) señala que cuando ocurre este fenómeno se refuerza la dinámica de la Circulación de Walker inclinándose más la termoclina. Todo esto genera condiciones de estabilidad que también pudieron haber influido en las concentraciones de PM_{2.5} en el año 2021.

Tabla 9: Estadísticos básicos pertenecientes a la concentración media de 24 h de PM_{2.5} para el período 15 de marzo – 30 de abril de los 3 años en estudio

Estación	Estadísticos descriptivos	Períodos								
		Todo el año			Variación 2020 - 2019		Variación 2021 - 2020		Variación 2021 - 2019	
		2019	2020	2021	VED	VPED	VED	VPED	VED	VPED
Estación Campo de Marte	Máximo	31.81	18.75	30.60	-13.06	-41.06	11.85	63.20	-1.21	-3.80
	Percentil 90	19.47	17.17	20.75	-2.30	-11.81	3.58	20.85	1.28	6.57
	Mediana	13.60	12.49	15.20	-1.11	-8.16	2.71	21.70	1.60	11.76
	Promedio	14.66	12.97	15.90	-1.69	-11.53	2.93	22.59	1.24	8.46
	Percentil 10	10.73	9.41	11.85	-1.32	-12.30	2.44	25.93	1.12	10.44
Estación San Juan de Lurigancho	Máximo	46.20	17.49	36.10	-28.71	-62.14	18.61	106.40	-10.10	-21.86
	Percentil 90	39.45	14.49	32.06	-24.96	-63.27	17.57	121.26	-7.39	-18.73
	Mediana	27.40	10.52	25.86	-16.88	-61.61	15.34	145.82	-1.54	-5.62
	Promedio	28.39	11.00	25.86	-17.39	-61.25	14.86	135.09	-2.53	-8.91
	Percentil 10	20.34	7.70	19.69	-12.64	-62.14	11.99	155.71	-0.65	-3.20
Estación UMA2	Máximo	27.33	16.21	31.77	-11.12	-40.69	15.56	95.99	4.44	16.25
	Percentil 90	24.54	15.87	29.81	-8.67	-35.33	13.94	87.84	5.27	21.48
	Mediana	20.00	12.13	12.52	-7.87	-39.35	0.39	3.22	-7.48	-37.40
	Promedio	20.15	11.79	16.28	-8.36	-41.49	4.49	38.08	-3.87	-19.21
	Percentil 10	15.78	6.15	10.70	-9.63	-61.03	4.55	73.98	-5.08	-32.19
	Mínimo	14.31	6.05	9.44	-8.26	-57.72	3.39	56.03	-4.87	-34.03

La Tabla 10 muestra las comparaciones estadísticas respectivas de las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ en el período 15 de marzo – 30 de abril mediante una prueba t . Se puede observar que en la comparación estadística entre los años 2021 y 2019 en las estaciones Campo de Marte y San Juan de Lurigancho, las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ son estadísticamente iguales indicando así que las concentraciones de $PM_{2.5}$ del año 2021 alcanzaron valores similares a las concentraciones registradas antes de la pandemia del SARS CoV-2. Asimismo, la comparación estadística entre los años 2020 y 2019 en todas las estaciones arrojó como resultado que las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ son estadísticamente diferentes, lo cual indica que las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el año 2020 disminuyeron respecto al año 2019 a causa del confinamiento impuesto por el gobierno a causa de la pandemia del SARS CoV-2. También, la comparación estadística entre los años 2021 y 2020 en todas las estaciones arrojó como resultado que las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ son estadísticamente diferentes, evidenciando que las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el año 2021 aumentaron respecto al año 2020 a causa del retorno a las actividades cotidianas.

Tabla 10: Comparación estadística de las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ para el período 15 de marzo – 30 de abril de los años 2019 – 2021 mediante prueba t

Estación	Variación	P-valor	Resultado
Estación Campo de Marte	2020 - 2019	0.029	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2020	0.000	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2019	0.149	Las medias son estadísticamente iguales
Estación San Juan de Lurigancho	2020 - 2019	0.000	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2020	0.000	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2019	0.060	Las medias son estadísticamente iguales
Estación UMA2	2020 - 2019	0.000	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2020	0.020	Las medias son estadísticamente diferentes
	2021 - 2019	0.026	Las medias son estadísticamente diferentes

La Tabla 11 muestra el mínimo, máximo, la media y desviación estándar de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento para los tres años en estudio en el período 15 de marzo – 30 de abril. Se puede observar que la temperatura media es menor en la estación UMA2 que las dos estaciones de Lima Metropolitana con valores inferiores 18 °C mientras que las estaciones de Lima Metropolitana superaron los 20 °C. La humedad relativa media también es siempre menor en la estación UMA2 que en la estación Campo de Marte mientras que solo en el año 2021 es menor que la estación San Juan de Lurigancho. Dichos valores de humedad relativa media en la estación UMA2 son inferiores a 80%. La velocidad media del viento es mayor en la estación UMA2 que en las demás estaciones alcanzando valores superiores a los 2.65 m/s. Las estaciones de Lima Metropolitana obtuvieron velocidades medias cercanas a 2 m/s en la que la estación Campo de Marte supero dicho valor en los tres años y la estación San Juan de Lurigancho tuvo valores inferiores a dicho valor en los tres años.

Tabla 11: Estadísticos básicos pertenecientes a las variables meteorológicas para el período 15 de marzo – 30 de abril de los años 2019 – 2021

2019									
	Estación Campo de Marte			Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	19.54	23.05	21.83 ± 0.76	21.09	25.57	23.50 ± 1.01	15.42	19.22	17.19 ± 0.91
Humedad relativa (%)	75	87	80 ± 3	60	78	68 ± 4	69	91	76 ± 4
Velocidad del viento (m/s)	1.49	3.00	2.40 ± 0.34	1.50	2.28	1.92 ± 0.21	2.10	5.11	2.80 ± 0.51
2020									
	Estación Campo de Marte			Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	20.70	25.93	22.44 ± 1.19	21.60	26.55	23.77 ± 1.30	13.79	20.17	16.75 ± 1.44
Humedad relativa (%)	61	86	79 ± 5	52	83	68 ± 6	48	99	77 ± 15
Velocidad del viento (m/s)	1.47	2.91	2.29 ± 0.31	1.42	2.46	1.90 ± 0.24	1.80	4.58	2.69 ± 0.51
2021									
	Estación Campo de Marte			Estación San Juan de Lurigancho			Estación UMA2		
	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)	Mín.	Máx.	Media (Des)
Temperatura (°C)	17.86	23.73	20.71 ± 1.71	19.58	25.74	22.87 ± 1.84	13.83	19.48	16.36 ± 1.27
Humedad relativa (%)	71	90	80 ± 5	56	93	79 ± 9	66	81	74 ± 4
Velocidad del viento (m/s)	1.60	2.66	2.17 ± 0.23	1.37	2.22	1.89 ± 0.19	2.05	3.98	2.82 ± 0.41

Nota: Los valores de humedad relativa en el año 2020 para la estación UMA2 se obtuvieron con los datos de la estación San José de Uzuna mientras que para los otros dos años se utilizó la estación La Pampilla

V. CONCLUSIONES

5.1. Del análisis de la variación horaria y diaria de PM_{2.5} en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021

Tanto en la variación horaria como diaria, las concentraciones medias de PM_{2.5} son mayores en Lima Metropolitana que en Arequipa en los tres años de estudio debido al gran tamaño del parque automotor en Lima Metropolitana. Las concentraciones medias de ambas ciudades en general disminuyeron en el año 2020 y aumentaron en el año 2021.

Con respecto al comportamiento de la variación horaria, ambas ciudades tienen dos picos máximos y dos picos mínimos en el año 2019. En los años 2020 y 2021, la ciudad de Lima solo presenta un pico máximo y un pico mínimo mientras que la ciudad de Arequipa mantiene dos picos máximos y dos picos mínimos.

Con respecto a la variación diaria, la ciudad de Arequipa cumple con el ECA en los tres años en estudio. En la ciudad de Lima Metropolitana, solo la estación Campo de Marte cumple el ECA en los tres años mientras que las otras dos estaciones lo cumplen solamente en el año 2020. Ambas ciudades incumplen la guía de la OMS en los tres años.

5.2. Del análisis de la variación mensual y estacional de PM_{2.5} en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021

Tanto en la variación mensual como estacional, las concentraciones medias de PM_{2.5} son mayores en Lima Metropolitana que en Arequipa en los tres años de estudio debido a que el parque automotor en Lima Metropolitana es inmenso. Las concentraciones medias de ambas ciudades en general disminuyeron en el año 2020 y aumentaron en el año 2021.

Las concentraciones medias alcanzaron sus niveles más bajos durante los meses de otoño en el año 2020 mientras que en los otros dos años alcanzaron sus niveles más bajos durante los meses de verano.

5.3. De la determinación de la concentración diurna y nocturna de PM_{2.5} a nivel diario, semanal, mensual y estacional en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa en los años 2019 – 2021

A nivel diario, semanal, mensual y estacional, tanto las concentraciones diurnas como nocturnas fueron generalmente mayores en Lima Metropolitana que en Arequipa en los tres años de estudio dado que esta última tiene un parque automotor cuyo tamaño es muy pequeño con respecto a Lima Metropolitana.

Además, las concentraciones nocturnas fueron generalmente mayores que las concentraciones diurnas en el año 2019 mientras que en los otros dos años las concentraciones diurnas fueron en general mayores que las concentraciones nocturnas a causa de los toques de queda por las noches impuestas por el Gobierno.

5.4. De la evaluación de la influencia de las medidas adoptadas debido a la pandemia del SARS CoV-2 en las concentraciones de PM_{2.5} en las ciudades de Lima Metropolitana y Arequipa durante los años 2020 y 2021

En el período escogido para la evaluación (15 de marzo – 30 de abril), hubo una disminución de las concentraciones medias de PM_{2.5} en el año 2020 con respecto al año 2019 en ambas ciudades a causa de la cuarentena general dado que esto implicó una menor circulación de vehículos que causaron una reducción de emisiones de PM_{2.5}. Dichas disminuciones fueron de 1.69 µg/m³, 17.39 µg/m³ y 8.36 µg/m³ en las estaciones Campo de Marte, San Juan de Lurigancho y UMA2, respectivamente. Por otro lado, hubo un aumento de las concentraciones medias de PM_{2.5} en el año 2021 con respecto al año 2020 en ambas ciudades debido a la reanudación casi total de las actividades cotidianas. Dichos aumentos fueron de 2.93 µg/m³, 14.86 µg/m³ y 4.49 µg/m³ en las estaciones Campo de Marte, San Juan de Lurigancho y UMA2, respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

Se debe verificar que las estaciones de calidad de aire en Lima Metropolitana estén en óptimo funcionamiento para no tener problemas a futuro con la disponibilidad de datos, por lo que es necesaria un adecuado mantenimiento de todos los equipos de monitoreo de calidad de aire. Asimismo, se necesita una mayor cantidad de estaciones de calidad de aire en otras provincias para lograr una mayor exactitud al momento de realizar estudios que requieran el uso de datos de calidad de aire.

Se recomienda realizar estudios de variación espacial de material particulado en Lima Metropolitana ya que hubo zonas más concurridas que otras durante la pandemia que influyeron en las concentraciones de material particulado fino.

Se debe hacer una caracterización de las fuentes de emisión de contaminantes en todas las provincias del Perú para determinar su contribución a las concentraciones de material particulado en cada provincia y/o región del país.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agami, S.; Dayan, U. (2021). Impact of the first induced COVID-19 lockdown on air quality in Israel. *Atmospheric Environment*, 262: 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118627>
- Ali, S.; Malik, F.; Anjum, M.; Siddiqui, G.; Anwar, M.; Lam, S.; Nizami, A.; Khokhar, M. (2021). Exploring the linkage between PM_{2.5} levels and COVID-19 spread and its implications for socio-economic circles. *Environmental Research*, 193: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110421>
- Anderson, J.; Thundiyil, J.; Stolbach, A. (2011). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2): 166-175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
- Anónimo. (15 de marzo de 2020[a]). Coronavirus en Perú: Gobierno anuncia cuarentena obligatoria por 15 días por coronavirus. *Gestión*. Recuperado de <https://gestion.pe/peru/politica/coronavirus-en-peru-gobierno-anuncia-cuarentena-obligatorio-por-15-dias-por-coronavirus-noticia/>
- Anónimo. (16 de marzo de 2020[b]). Coronavirus: Perú decreta cuarentena general en el país y el cierre de fronteras durante 15 días ante la pandemia de covid-19. *BBC News*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-51902989>
- Anónimo. (18 de marzo de 2020[c]). INMOVILIZACIÓN SOCIAL OBLIGATORIA: ¿ES LEGAL Y EQUIVALENTE A UN TOQUE DE QUEDA? Estudio Echeconpar. Recuperado de <https://www.echeconpar.com.pe/noticias-inmovilizacion-social-obligatoria-es-legal-y-equivalente-a-un-toque-de-queda.html>
- Anónimo. (08 de abril de 2020[d]). Gobierno amplía el Estado de Emergencia hasta el domingo 26 de abril a nivel nacional. Plataforma digital única del Estado Peruano. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/presidencia/noticias/112089-gobierno-amplia-el-estado-de-emergencia-hasta-el-domingo-26-de-abril-a-nivel-nacional>

- Anónimo. (25 de abril de 2020[e]). Oficializan ampliación del estado de emergencia en Perú hasta el 10 de mayo. Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/peru/coronavirus-peru-oficializan-la-ampliacion-del-estado-de-emergencia-hasta-el-10-de-mayo-covid-19-cuarentena-nndc-noticia/>
- Anónimo. (29 de abril de 2020[f]). Confirmado: Reactivación económica será en cuatro fases, de mayo hasta agosto. Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/reactivacion-economica-confirmado-sera-en-cuatro-fases-de-mayo-hasta-agosto-mef-nndc-noticia/>
- Anónimo. (07 de mayo de 2020[g]). Perú desacata cuarentena y casos de coronavirus suben a 60 000. Deutsche Welle. Recuperado de <https://www.dw.com/es/per%C3%BA-desacata-cuarentena-y-casos-de-coronavirus-suben-a-60000/a-53366610>
- Anónimo. (08 de mayo de 2020[h]). Gobierno amplía estado de emergencia hasta el domingo 24 de mayo. Andina. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-gobierno-amplia-estado-emergencia-hasta-domingo-24-mayo-796451.aspx>
- Anónimo. (06 de junio de 2020[i]). Fase 2 de la reactivación económica: ¿Qué sectores pueden volver a operar desde este viernes 5 de junio?. El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/economia/peru/coronavirus-peru-reactivacion-economica-fase-2-que-actividades-podran-volver-a-operar-en-esta-etapa-comercio-mineria-agricultura-manufactura-construccion-servicios-nndc-noticia/#:~:text=Las%20actividades%20econ%C3%B3micas%20comprendidas%20en,de%20bebidas%20alcoh%C3%B3licas%20y%20tabaco.>
- Anónimo. (01 de julio de 2020[j]). REANUDACIÓN DE ACTIVIDADES ECONÓMICAS DE LA FASE 3. Estudio Ehecopar. Recuperado de <https://www.ehecopar.com.pe/publicaciones-aprueban-reanudacion-de-actividades-economicas-de-la-fase-3.html>
- Anónimo. (28 de septiembre de 2020[k]). APRUEBAN LA FASE 4 DE LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA EN EL MARCO DE LA EMERGENCIA SANITARIA NACIONAL. Estudio Ehecopar. Recuperado de <https://www.ehecopar.com.pe/publicaciones-aprueban-la-fase-4-de-la-reactivacion-economica-en-el-marco-de-la-emergencia-sanitaria-nacional.html>

- Anónimo. (30 de noviembre de 2020[l]). ¡Ya es oficial! Toque de queda será a partir de la medianoche desde mañana. El Peruano. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia/109941-ya-es-oficial-toque-de-queda-sera-a-partir-de-la-medianoche-desde-manana>
- Anónimo. (30 de diciembre de 2020[m]). Toque de queda de 10 p.m. a 4 a.m. regirá hasta el 17 de enero en 11 regiones. El Peruano. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia/112651-ejecutivo-amplia-toque-de-queda-desde-las-2200-horas-a-seis-regiones-mas>
- Anónimo. (26 de enero de 2021[a]). Sagasti anuncia cuarentena: en qué regiones, desde cuándo y cuáles son las reglas. As. Recuperado de https://peru.as.com/peru/2021/01/27/actualidad/1611715288_800419.html
- Anónimo. (13 de febrero de 2021[b]). Ejecutivo oficializa ampliación de cuarentena hasta el 28 de febrero en 32 provincias. El Peruano. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia/115263-ejecutivo-oficializa-ampliacion-de-cuarentena-hasta-el-28-de-febrero-en-32-provincias>
- Anónimo. (22 de marzo de 2021[c]). Cuarentena por Semana Santa: medidas, restricciones, horarios, prohibiciones y qué se puede hacer. As. Recuperado de https://peru.as.com/peru/2021/03/22/actualidad/1616409765_085590.html
- Anónimo. (24 de marzo de 2021[d]). Cuarentena en Semana Santa: conoce las restricciones impuestas para evitar nuevos contagios de COVID-19 en el país. El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/respuestas/cuarentena-por-semana-santa-que-dias-habra-inmovilizacion-social-para-evitar-contagios-de-covid-19-francisco-sagasti-coronavirus-semana-santa-2021-abril-revtli-noticia/>
- Anónimo. (04 de septiembre de 2021[e]). Toque de queda en Lima y Callao ahora será a partir de la 1 de la madrugada. Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/peru/toque-de-queda-en-lima-y-callao-ahora-sera-a-partir-de-la-1-de-la-madrugada-nndc-noticia/>
- Anónimo. (1 de noviembre de 2021[f]). Toque de queda se mantendrá de 2 a.m. a 4 a.m. en Lima y Callao hasta el 14 de noviembre. Andina. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-toque-queda-se-mantendra-2-a-4-amen-lima-y-callao-desde-1-noviembre-867568.aspx>

- Anónimo. (24 de diciembre de 2021[g]). ¡A tomar en cuenta! A las 11 de la noche empezará el toque de queda en Navidad. Andina. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-a-tomar-cuenta-a-las-11-de-noche-empezara-toque-queda-navidad-874509.aspx>
- Anónimo. (05 de enero de 2022). Ómicron en Perú: ¿Qué diferencia la tercera ola de COVID-19 de la anterior?. Infobae. Recuperado de <https://www.infobae.com/america/peru/2022/01/05/omicron-en-peru-que-diferencia-la-tercera-ola-de-covid-19-de-la-anterior/>
- Aránguez, E.; Ordoñez, J. M.; Serrano, J.; Aragonés, N.; Fernández-Patier, R.; Gandarillas, A.; Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Rev Esp Salud Pública*, 1(73), 123-132. https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arias-Pérez, R.; Taborda, N.; Gómez, D.; Narvaez, J. F.; Porras, J.; Hernandez, J. (2020). Inflammatory effects of particulate matter air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 42390–42404. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10574-w>
- ATV Noticias. (Productor). (2020). Martín Vizcarra amplía el 'toque de queda' desde las 6 P.M. hasta las 5 A.M [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=i4GZmqyoW2E>
- ATV Noticias. (Productor). (2021). Hernando Cevallos: "Toque de queda será desde las 2:00 hasta las 4:00 a. m." [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=j7372mzjpiU>
- Bae, S.; Hong, Y. (2018). Health effects of particulate matter. *J Korean Med Assoc*, 61(12): 749-755. <https://doi.org/10.5124/jkma.2018.61.12.749>
- Bazo, A. (17 de abril de 2020). ¿Por qué falló Perú con el 'pico y género' para contener al Covid-19?. France 24. Recuperado de <https://www.france24.com/es/20200417-peru-fallo-pico-y-genero-coronavirus-confinamiento>
- Bell, M.; Dominici, F.; Ebisu, K.; Zeger, S.; Samet, J. (2007). Spatial and temporal variation in PM_{2.5} chemical composition in the United States for health effects studies. *Environmental Health Perspectives*, 115(7): 989-995. <https://doi.org/10.1289/ehp.9621>

- Betteta, J. (2019). Los efectos de la polución ambiental por micropartículas PM_{2.5} y PM₁₀ en la presencia de enfermedades respiratorias en los pobladores del distrito de Ate (Tesis doctoral). Recuperada de <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/5283>
- Bocanegra, C. (26 de junio de 2020). Gobierno dispone cuarentena focalizada hasta el 31 de julio por Coronavirus. Plataforma digital única del Estado Peruano. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/munijepelacio/noticias/189135-gobierno-dispone-cuarentena-focalizada-hasta-el-31-de-julio-por-coronavirus>
- Calle, M. (23 de marzo de 2020). Perú extiende la cuarentena hasta el 30 de junio con ciertas excepciones. France 24. Recuperado de <https://www.france24.com/es/20200522-peru-extension-cuarentena-pandemia-covid19>
- Castelar, G. (2019). Comparación entre tres muestreadores de material particulado (PM_{2.5}) en el campus de la UNALM (Tesis de pregrado). Recuperada de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4186>
- Castro, F. (03 de mayo de 2020). Minería y construcción en Fase 1 para reinicio de actividades. Rumbo minero. Recuperado de <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/mineria-y-construccion-en-fase-1-para-reinicio-de-actividades/>
- Chauhan, A.; Singh, R. (2020). Decline in PM_{2.5} concentrations over major cities around the world associated with COVID-19. *Environmental Research*, 187: 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109634>
- Chen, H.; Huo, J.; Fu, Q.; Duan, Y.; Xiao, H.; Chen, J. (2020). Impact of quarantine measures on chemical compositions of PM_{2.5} during the COVID-19 epidemic in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 743: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140758>
- Comisión Nacional de Medio Ambiente. (2003). Caracterización Físicoquímica del Material Particulado Inorgánico Fino en la Región Metropolitana. Recuperado de <http://ambiente.usach.cl/estudios/inf-Final-inorganico.doc>
- Connerton, P.; Vicente, J.; Maura, R.; Dorothée, A.; Pérez-Martínez, P.; Ribeiro, H. (2020). Air quality during COVID-19 in four megacities: lessons and challenges for public health. *Environmental Research and Public Health*, 17(5067): 1-24. <https://doi:10.3390/ijerph17145067>

- Díaz, F.; Toro, A. (2020). SARS-CoV-2/COVID-19: el virus, la enfermedad y la pandemia. *Medicina & Laboratorio*, 24(3): 183-205. <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/05/1096519/covid-19.pdf>
- Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria. (2005). Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Recuperado de http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf
- Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria. (2005). Resultados del inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Lima-Callao. Recuperado de http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/inventario_aire/fuentes_fijas/Informe%20Invent%20FUENTES%20FIJAS%20Lima-Callao1.pdf
- Digital Noticias. (Productor). (2021). ATENCIÓN: Gobierno de Francisco Sagasti anuncia nuevo Toque de Queda en el Perú [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=eQWi-ZXcmAI&t=107s>
- Dockery, D. (2009). Health effects of particulate air pollution. *Annals of Epidemiology*, 19(4): 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2009.01.018>
- EP. (11 de abril de 2020). Perú eliminó el 'pico y género' para salir a la calle "por falta de eficacia". *Semana*. Recuperado de <https://www.semana.com/mundo/articulo/coronavirus-peru-elimino-el-pico-y-genero-para-salir-a-la-calle-por-falta-de-eficacia/662959/>
- Espinoza, J. (2018). Evaluación espacial y temporal del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana para el período 2015-2017 (Tesis de pregrado). Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3739>
- Fischer, A. (13 de septiembre de 2022). El fenómeno 'La Niña' registra su primer evento tripe en este siglo y estas son las consecuencias. *National Geographic en español*. Recuperado de <https://www.ngenespanol.com/ecologia/que-es-el-fenomeno-la-nina-y-sus-consecuencias/>
- Fowks, J. (03 de abril de 2020). Perú restringe la salida a la calle por género. *El País*. Recuperado de <https://elpais.com/internacional/2020-04-04/peru-restringe-la-salida-a-la-calle-por-genero.html>

- France 24. (Productor). (2020). Informe desde Lima: Perú regresa al toque de queda de los domingos [DVD]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=LUUiwq_eSW8
- Ghosal, R.; Saha, E. (2021). Impact of the COVID-19 induced lockdown measures on PM_{2.5} concentration in USA. *Atmospheric Environment*, 254: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118388>
- Hornuss, D.; Lange, B.; Schroter, N.; Rieg, S.; Kern, W.V.; Wagner, D. (2020). Anosmia in COVID-19 patients. *Clinical Microbiology and Infection*, 26(10): 1426-1427. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2020.05.017>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2014). Una mirada a Lima Metropolitana. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1168/libro.pdf
- Inza, A.; Sánchez, M.; Menéndez, M.; Ortega, L.; Gil, J. (2006). Estudio de los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5} en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (Beasain, Guipúzcoa). Recuperado de https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/particulas_beasain/es_doc/adjuntos/documento.pdf
- Jansen, K.; Larson, T.; Koenig, J.; Mar, T.; Fields, C.; Stewart, J.; Lippmann, M. (2005). Associations between health effects and particulate matter and black carbon in subjects with respiratory disease. *Environmental Health Perspectives*, 113(12): 1741-1746. <https://doi.org/10.1289/ehp.8153>
- Kulmala, M.; Maso, M.; Makela, J.; Pirjola, M.; Vakeva, M.; Aalto, P.; Miikkulainen, K.; Hameri, K.; O'Dowd, C. (2001). On the formation, growth and composition of nucleation mode particles. *Tellus*, 53B: 479-490. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2001.530411.x>
- Kumar, A.; Tchounwou, P.; Biswal, S.; Tuluri, F. (2018). Spatio-temporal variation of particulate matter (PM_{2.5}) concentrations and its health impacts in a Mega City, Delhi in India. *Environmental Health Insights*, 12(1-9): 1-9. <https://doi.org/10.1177/1178630218792861>

- Lajili, M. (2019). Assessments of gaseous and particulate matter emissions from biomass combustion and their effect on human health. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 17(2): 12681-12688. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002979>
- Lanchipa, T.; Moreno, K.; Luque, B. (2020). Perspectiva del COVID-19 sobre la contaminación del aire. *Soc. cient.*, 25(2): 155-182. <https://doi.org/10.32480/rscp.2020.25.2.155>
- Langner, J.; Rohde, H. (1991). A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 13(3): 225–263. <https://doi.org/10.1007/BF00058134>
- Mag. (4 de mayo de 2020). Reactivación de la economía peruana - Fase 1: las 27 actividades liberadas de la cuarentena. *El Comercio*. Recuperado de <https://mag.elcomercio.pe/respuestas/reactivacion-de-la-economia-del-peru-fase-1-las-27-actividades-liberadas-de-la-cuarentena-coronavirus-peru-cuarentena-util-covid-19-nnda-nnlt-noticia/?ref=ecr>
- Mahato, S.; Pal, S.; Ghosh, K. (2020). Effect of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India. *Science of the Total Environment*, 730: 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139086>
- Matter, U.; Siegmann, H. C.; Burstcher, H. (1999). Dynamic Field Measurements of Submicron Particles from Diesel Engines. *Environmental Science & Technology*, 33(11): 1946-1952. <https://doi.org/10.1021/es981095w>
- Mehmood, K.; Saifullah; Iqbal, M.; Abrar, M. (2020). Can exposure to PM_{2.5} particles increase the incidence of coronavirus disease 2019 (COVID-19)? *Science of the Total Environment*, 741: 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140441>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.
- Ministerio del Ambiente. (2019). Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-queaprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>

- Minguillón, M. (2007). Composición y fuentes del material particulado atmosférico en la zona cerámica de Castellón. Impacto de la introducción de las mejores técnicas disponibles (Tesis doctoral). Recuperada de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/10385#page=1>
- Mukherjee, A.; Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2): 283–309. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0611-9>
- Municipalidad Provincial de Arequipa. (2016). Plan de desarrollo local concertado de Arequipa 2016 – 2021. Recuperado de <https://www.muniarequipa.gob.pe/descargas/transparencia/pdlc/PDLC.pdf>
- Nelin, T.; Joseph, A.; Gorr, M.; Wold, L. (2012). Direct and indirect effects of particulate matter on the cardiovascular system. *Toxicology Letters*, 208(3): 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2011.11.008>
- Noticias Perú. (Productor). (2021) ¡ULTIMO MINUTO! GOBIERNO LEVANTA CUARENTENA HABRÁ TOQUE DE QUEDA NOCHES Y DOMINGOS [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=1IArOk2LBhg>
- Núñez, Y. (2019). Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM₁₀ y PM_{2.5}) en la ciudad de Barranquilla, Colombia (Tesis de maestría). Recuperada de <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/6017>
- Oficina de Prensa e Imagen Institucional. (17 de diciembre de 2020). Ejecutivo oficializa medidas para las celebraciones de fin de año. Plataforma digital única del Estado Peruano. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/pem/noticias/321228-ejecutivo-oficializa-medidas-para-las-celebraciones-de-fin-de-ano>
- Organización Mundial de la Salud. (2005). Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>
- Organización Mundial de la Salud. (2013). Health effects of particulate matter: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. Organización Mundial de la Salud. Oficina Regional para Europa. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/344854>

- Organización Mundial de la Salud. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Ginebra, Suiza. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- Pacsi, S. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2): 273-283. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>
- Pérez, M.; Gómez, J.; Dieguez, R. (2020). Características clínico-epidemiológicas de la COVID-19. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 19(2): 1-15. <http://www.revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/3254/2505>
- Pérez, R. (2013). Estudio del contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales en partículas atmosféricas de diferentes diámetros aerodinámicos de La Comarca Lagunera, México (Tesis doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.). Recuperada de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/898/1/%27Rom%C3%A1n%20Alberto%20P%C3%A9rez%20Bal%C3%A1n%20Doctorado%20en%20Ciencia%20y%20Tecnolog%C3%ADa%20Ambiental.pdf>
- Perú 21. (Productor). (2020). Coronavirus: Gobierno elimina inmovilización de los domingos y recorta horario de toque de queda [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=zXpjm3YbzIs&t=42s>
- Peters, A. (2005). Particulate matter and heart disease: Evidence from epidemiological studies. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207(2): 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.04.030>
- Prajapati, S. (2012). Ecological effect of airborne particulate matter on plants. *Environmental Skeptics and Critics*, 1(1): 12-22. <http://www.taccire.sua.ac.tz/handle/123456789/159>
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[a]). Decreto Supremo N° 046-2020-PCM: Decreto Supremo que precisa el Decreto Supremo N° 044-2020-PCM, que declara el Estado de Emergencia Nacional, por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID 19

- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[b]). Decreto Supremo N° 064-2020-PCM: Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la nación a consecuencia del COVID-19 y dicta otras medidas
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[c]). Decreto Supremo N° 075-2020-PCM: Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[d]). Decreto Supremo N° 080-2020-PCM: Decreto Supremo que aprueba la reanudación de actividades económicas en forma gradual y progresiva dentro del marco de la declaratoria de Emergencia Sanitaria Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[e]). Decreto Supremo N° 083-2020-PCM: Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19 y establece otras disposiciones
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[f]). Decreto Supremo N° 101-2020-PCM: Decreto Supremo que aprueba la Fase 2 de la Reanudación de Actividades Económicas dentro del marco de la declaratoria de Emergencia Sanitaria Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19, y modifica el Decreto Supremo N° 080-2020PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[g]). Decreto Supremo N° 116-2020-PCM: Decreto Supremo que establece las medidas que debe observar la ciudadanía en la Nueva Convivencia Social y prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[h]). Decreto Supremo N° 117-2020-PCM: Decreto Supremo que aprueba la Fase 3 de la Reanudación de Actividades Económicas dentro del marco de la declaratoria de emergencia sanitaria nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[i]). Decreto Supremo N° 129-2020-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 116-2020-PCM, Decreto Supremo que establece las medidas que debe observar la ciudadanía en la nueva convivencia social y prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la nación a consecuencia del COVID-19, disponiendo el aislamiento social obligatorio (cuarentena) en las provincias de Cajamarca, Jaén y San Ignacio del departamento de Cajamarca y en la provincia de La Convención del departamento de Cusco

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[j]). Decreto Supremo N° 139-2020-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 116-2020-PCM, Decreto Supremo que establece las medidas que debe observar la ciudadanía en la nueva convivencia social y prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia de COVID-19, modificado por los Decretos Supremos N° 129-2020-PCM y N° 135-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[k]). Decreto Supremo N° 146-2020-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 116-2020-PCM, Decreto Supremo que establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social y Prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la nación a consecuencia del COVID-19, modificado por los Decretos Supremos N° 129-2020-PCM, N° 1352020-PCM y N° 139-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[l]). Decreto Supremo N° 157-2020-PCM: Decreto Supremo que aprueba la Fase 4 de la reanudación de actividades económicas dentro del marco de la declaratoria de Emergencia Sanitaria Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[m]). Decreto Supremo N° 165-2020-PCM. Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 116-2020-PCM, Decreto Supremo que establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la Nueva Convivencia Social y prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del COVID-19, modificado por los Decretos Supremos N° 129-2020-PCM, N° 1352020-PCM, N° 139-2020-PCM, N° 146-2020-PCM, N° 151-2020-PCM, N° 156-2020PCM Y N° 162-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[n]). Decreto Supremo N° 184-2020-PCM: Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19 y establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[ñ]). Decreto Supremo N° 194-2020-PCM: Decreto Supremo que restringe el tránsito de vehículos particulares los días 24, 25 y 31 de diciembre de 2020; así como, el día 01 de enero de 2021 y declara feriado no laborable el día 24 de diciembre de 2020

Presidencia del Consejo de Ministros. (2020[o]). Decreto Supremo N° 206-2020-PCM: Decreto Supremo que modifica disposiciones establecidas en el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, Decreto Supremo N° 201-2020PCM y Decreto Supremo N° 202-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[a]). Decreto Supremo N° 002-2021-PCM: Decreto Supremo que modifica disposiciones establecidas en el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM y en el Decreto Supremo N° 2012020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[b]). Decreto Supremo N° 008-2021-PCM: Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia de la COVID-19 y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, el Decreto Supremo N° 201-2020-PCM, el Decreto Supremo N° 002-2021-PCM y el Decreto Supremo N° 004-2021-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[c]). Decreto Supremo N° 023-2021-PCM: Decreto Supremo que aprueba el Nivel de Alerta por Provincia y Departamento y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM y modificatorias

- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[d]). Decreto Supremo N° 036-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM y N° 008-2021-PCM y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[e]). Decreto Supremo N° 046-2021-PCM:
Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM y el Decreto Supremo N° 207-2020-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[f]). Decreto Supremo N° 058-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM y N° 036-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[g]). Decreto Supremo N° 059-2021-PCM.
Decreto Supremo que modifica el numeral 8.5 del artículo 8 del Decreto Supremo N° 184-2020-PCM y el artículo 4 del Decreto Supremo N° 058-2021-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[h]). Decreto Supremo N° 076-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM Y N° 058-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[i]). Decreto Supremo N° 092-2021-PCM:
Decreto Supremo que modifica los artículos 8 y 14 del Decreto Supremo N° 184-2020-PCM
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[j]). Decreto Supremo N° 105-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM Y N° 076-2021-PCM, modifica el Decreto Supremo N° 184-2020PCM y dicta otras disposiciones
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[k]). Decreto Supremo N° 117-2021-PCM:
Decreto Supremo que modifica el numeral 8.1 del Artículo 8 del Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[l]). Decreto Supremo N° 123-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el
Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-
2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N° 076-
2021-PCM y N° 105-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[m]). Decreto Supremo N° 131-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el
Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N°
201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N°
076-2021-PCM, N° 105-2021-PCM Y N° 123-2021-PCM, y modifica el Decreto
Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[n]). Decreto Supremo N° 144-2021-PCM:
Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[ñ]). Decreto Supremo N° 149-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el
Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-
2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N° 076-
2021-PCM, N° 105-2021-PCM, N° 123-2021-PCM y N° 131-2021-PCM y modifica
el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[o]). Decreto Supremo N° 151-2021-PCM:
Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[p]). Decreto Supremo N° 152-2021-PCM:
Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el
Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N°
201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N°
076-2021-PCM, N° 105-2021-PCM, N° 123-2021-PCM, N° 131-2021-PCM, N°
149-2021-PCM y N° 151-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-
PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[q]). Decreto Supremo N° 159-2021-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19 y establece medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[r]). Decreto Supremo N° 163-2021-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19 y establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[s]). Decreto Supremo N° 167-2021-PCM: Decreto Supremo que proroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N° 076-2021-PCM, N° 105-2021-PCM, N° 123-2021-PCM, N° 131-2021-PCM, N° 149-2021-PCM y N° 152-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[t]). Decreto Supremo N° 168-2021-PCM: Decreto de Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19 y establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social

Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[u]). Decreto Supremo N° 174-2021-PCM: Decreto Supremo que proroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N° 076-2021-PCM, N° 105-2021-PCM, N° 123-2021-PCM, N° 131-2021-PCM, N° 149-2021-PCM, N° 152-2021-PCM y N° 167-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM

- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[v]). Decreto Supremo N° 179-2021-PCM: Decreto Supremo que modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19 y establece las medidas que debe seguir la ciudadanía en la nueva convivencia social
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2021[w]). Decreto Supremo N° 186-2021-PCM: Decreto Supremo que proroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM, N° 036-2021-PCM, N° 058-2021-PCM, N° 076-2021-PCM, N° 105-2021-PCM, N° 123-2021-PCM, N° 131-2021-PCM, N° 149-2021-PCM, N° 152-2021-PCM, N° 167-2021-PCM y N° 1742021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM
- Rai, P. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129: 120-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012>
- Rivera, C. Impacto del parque automotor y la calidad del aire en Lima Metropolitana durante las medidas de aislamiento social (COVID-19), 2020 (Tesis de pregrado). Recuperado de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/660>
- RPP Noticias. (Productor). (2020) Adultos mayores podrán salir de manera interdiaria, anunció Martín Vizcarra [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=yppxQjM4IV0>
- Sánchez, E.; Ortiz, L.; & Castrejón, M. (2014). Contaminación urbana del aire: Aspectos fisicoquímicos, microbiológicos y sociales. Recuperado de https://www.uaem.mx/dgds/files/libros/2014_LIBRO_CONTAMINACI%C3%93N%20URBANA%20DEL%20AIRE.%20ASPECTOS%20FISICOQU%C3%8DMICOS%2C%20MICROBIOL%C3%93GICOS%20Y%20SOCIALES.pdf
- Sánchez, O.; Ordoñez, C. (2016). Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2015. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01403SENA-7.pdf>
- Sanguineti, P.; Lanzaco, B.; López, M.; Achad, M.; Palancar, G.; Olcese, L.; Toselli, B. (2020). PM_{2.5} monitoring during a 10-year period: relation between elemental concentration and meteorological conditions. *Environ Monit Assess*, 192(313): 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08288-0>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). Vigilancia de la calidad del aire Lima Metropolitana (agosto 2019). Recuperado de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/700>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). Vigilancia de la calidad del aire Lima Metropolitana (junio 2019). Recuperado de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/698>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2022). Fenómeno “El Niño/La Niña” N° 04 (abril 2022). Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02216SENA-94.pdf>
- Silva, J.; Rojas, J.; Norabuena, M.; Molina, C.; Toro, R.; Leiva-Guzmán, M. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>
- Sistema Nacional de Evaluación, Acreditación y Certificación de la Calidad Educativa. (2020). Caracterización de la región Lima Metropolitana. Recuperado de <https://repositorio.sineace.gob.pe/repositorio/handle/20.500.12982/6234>
- Sumesh, R. K.; Rajeevan, K.; Resmi, E. A.; Unnikrishnan, C. K. (2017). Particulate matter concentrations in the southern tip of India: temporal variation, meteorological influences, and source identification. *Earth Syst Environ*, 1(2): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s41748-017-0015-9>
- TVPerú Noticias. (Productor). (2020) Presidente Vizcarra anuncia 13 días más de cuarentena [DVD]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=kuepPphcToA>
- Vargas, C.; Acosta, R.; Tequen, A. (2020). El nuevo coronavirus y la pandemia del Covid-19. *Revista Médica Herediana*, 31: 125-131. <https://doi.org/10.20453/rmh.v31i2.3776>

- Viana, M. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias (Tesis doctoral). Recuperada de <https://digital.csic.es/handle/10261/27476>
- Villapol, S. (2020). Gastrointestinal symptoms associated with COVID-19: impact on the gut microbiome. *Translational Research*, 220: 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2020.08.004>
- Wang, Y.; Xiong, L.; Tang, M. (2017). Toxicity of inhaled particulate matter on the central nervous system: neuroinflammation, neuropsychological effects and neurodegenerative disease. *Journal of Applied Toxicology*, 37(6): 644-667. <https://doi.org/10.1002/jat.3451>
- Weng, L; Su, X.; Wang, X. (2021). Pain symptoms in patients with coronavirus disease (COVID-19): a literature review. *Journal of Pain Research*, 14: 147-159. <https://doi.org/10.2147/JPR.S269206>
- Wright, J.; Ding, Y. (2016). Pathophysiological effects of particulate matter air pollution on the central nervous system. *Environment and Disease*, 1(3): 85-89. <https://doi.org/10.4103/2468-5690.191932>
- Yao, Y.; Pan, J.; Liu, Z.; Meng, X.; Wang, W.; Kan, H.; Wang, W. (2020). Temporal association between particulate matter pollution and case fatality rate of COVID-19 in Wuhan. *Environmental Research*, 189: 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109941>
- Zoran, M.; Savastru, R.; Savastru, D.; Tautan, M. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of the Total Environment*, 738: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Actividades económicas que reanudaron en la fase 1 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 080-2020-PCM

Minería e industria

1. Explotación, beneficio, almacenamiento, transporte y cierre de minas del estrato de la gran minería y, proyectos en construcción de interés nacional e hidrocarburos.
2. Insumos para la actividad agropecuaria.
3. Pesca Industrial (consumo humano indirecto).
4. Producción temporal: órdenes de compra (exportaciones) vencidas y por vencer.
5. Industrias de vidrio, forestal (maderable u no maderable), papel y cartón, plásticos y hielo ampliación de textil y confecciones, maquinaria y equipo.
6. Industria metalmecánica
7. Sustancias químicas básicas y abono y servicios complementarios a agricultura (para actividades esenciales).

Construcción

8. Proyectos del Plan Nacional de Infraestructura para la competitividad (PNIC).
9. Proyectos de la Autoridad para la Reconstrucción con cambios (ARCC)
10. 56 proyectos del Sector Transportes y Comunicaciones.
11. 36 obras de saneamiento.
12. Actividades de infraestructura agraria (riego, mantenimiento, rehabilitación de drenes, entre otros).
13. Proyectos inmobiliarios priorizados (fase de excavación, estructuras y acabados, y viviendas en el ámbito rural).
14. Productos agrarios (alquiler/venta de maquinarias)
15. Inversiones de Optimización, de Ampliación Marginal, de Rehabilitación y de Reposición (IOARR), acceso de agua y alcantarillado en comisarías, hospitales y colegios.
16. Industrias y servicios conexos a la construcción.

Servicios y turismo

17. Restaurantes y afines autorizados para entrega a domicilio (con propia logística del establecimiento y protocolo de seguridad y recojo en local)
18. Hoteles categorizados y transporte turístico para actividades esenciales.
19. Servicios vinculados a telecomunicaciones
20. Servicios complementarios a la agricultura.
21. Servicios prestados a empresas (soporte de TI y servicios profesionales, exportaciones de servicio de conocimiento)
22. Servicios notariales
23. Servicios de reciclaje.
24. Servicios de mantenimiento de equipo relacionado a edificaciones y hogares (bombas, termas, ascensores, gasfitería, electricista, carpintería, entre otros)
25. Servicios de almacenamiento de: Abonos y materias primas agropecuarias, artículos de plásticos, vidrio, papel, cartones, aserradura de madera, hielo para actividades en general.

Comercio

26. Comercialización de productos agrarios
27. Comercio electrónico de bienes para el hogar y afines.

Anexo 2: Actividades económicas que reanudaron en la fase 2 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 101-2020-PCM

Actividades económicas	Descripción de CIU	Protocolo
Agricultura	Títulos habilitantes y actos administrativos Estudios de impacto ambiental e instrumentos de gestión ambiental Titulación de la propiedad agraria y catastro rural Implementación de planes de negocio	MINSA
Minería	Exploración del estrato de la gran y mediana minería. Explotación, beneficio, almacenamiento, transporte y cierre de minas en los siguientes casos: - Mediana minería y sus actividades conexas, que cuente con campamento(s) minero(s) y/o acondicionar componente(s) auxiliar(es) y/o alojamiento externo de uso exclusivo para sus trabajadores - Pequeña minería y sus actividades conexas, y minería artesanal formalizadas, previamente acreditadas por la autoridad regional competente	MINEM
Manufactura		
Elaboración de alimentos preparados para animales	Elaboración de alimentos preparados para animales	MINSA
Elaboración de malta y cerveza	Elaboración de bebidas malteadas y de malta	MINSA
Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas y tabaco	Destilación, rectificación y mezcla de bebidas alcohólicas Elaboración de vinos Elaboración de productos de tabaco	MINSA
Fabricación de calzado	Fabricación de calzado.	PRODUCE

Actividades económicas	Descripción de CIU	Protocolo
Impresión	Actividades de impresión Actividades de servicios relacionadas con la impresión	MINSA
Construcción de material de transporte	Reparación de equipo de transporte, excepto los vehículos automotores	MINSA
Otras industrias manufactureras	Fabricación de instrumentos y suministros médicos y odontológicos. Reparación y mantenimiento de otros equipos n.c.p	MINSA
Construcción	Proyectos de inversión pública, proyectos de inversión privada, Asociaciones Público Privadas, Proyectos en Activos, IOARR y el PIRCC	MINSA
Comercio		
Venta, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas	Venta de vehículos automotores Mantenimiento y reparación de vehículos automotores Ventas de partes, piezas y accesorios de vehículos automotores Venta, mantenimiento y reparación de motocicletas y de sus partes, piezas y accesorios	MINSA
Venta, mantenimiento, y reparación de vehículos no motorizados, venta de los repuestos y suministros	Venta al por menor de equipo de deporte en comercios especializados Venta al por mayor de otros enseres domésticos Reparación de otros efectos personales y enseres domésticos	MINSA
Servicios		
Servicios profesionales, científicos y técnicos	Actividades jurídicas Actividades de contabilidad, teneduría de libros y auditoría; asesoramiento en materia de impuestos Actividades de arquitectura e ingeniería y actividades conexas de asesoramiento técnico Investigación y desarrollo experimental en el campo de las ciencias sociales y las humanidades Actividades veterinarias	MINSA
Hospedaje (apart hotel)		MINCETUR
Servicios de protección y seguridad	Actividades de seguridad privada Actividades de servicio de sistemas de seguridad Actividades de investigación	MINSA
Alquiler de vehículos	Alquiler y arrendamiento operativo de vehículos automotores.	MINSA
Alquiler de maquinaria y equipo y de bienes tangibles	Alquiler y arrendamiento operativo de otros tipos de maquinarias, equipos y bienes tangibles.	MINSA
Servicios de comunicaciones	Actividades de telecomunicaciones alámbricas Actividades de telecomunicaciones inalámbricas Actividades de telecomunicaciones por satélite Otras actividades de telecomunicación Otras actividades de servicios de apoyo a las empresas n.c.p. Actividades postales Actividades de mensajería	MINSA
A) Infraestructura en transporte y telecomunicaciones	Actividades de servicios vinculadas al transporte acuático Otras actividades de apoyo al transporte Otras actividades profesionales, científicas y técnicas n.c.p.	MINSA
B) Emisión de placas	Actividades de asociaciones empresariales y de empleadores	MINSA
C) Mantenimientos, mejoramiento y conservación rutinarios y periódicos de vías nacionales, departamentales y locales	Construcción de carreteras y líneas de ferrocarril Construcción de proyectos de servicio público Construcción de otras obras de ingeniería civil Otras instalaciones para obras de construcción	MINSA
Suministro de agua; alcantarillado, gestión de desechos y saneamiento	Captación, tratamiento y distribución de agua Evacuación de aguas residuales	MINSA
Servicios de transporte	Servicios de transporte de pasajeros por carretera interprovincial: servicios de transporte interprovincial privado para las actividades autorizadas de la fase 1 y fase 2 y transporte de carga por tubería Servicios ofrecidos por los Centros de Inspección Técnica Vehicular, las Entidades Certificadoras para emitir Certificados de Conformidad de Vehículos, los Centros de Revisión Periódica de Cilindros, las Certificadoras y Talleres de Conversión de GNV y las Certificadoras y Talleres de Conversión de GLP, y las entidades certificadoras de conformidad, modificación, fabricación y montaje	MINSA

Anexo 3: Actividades económicas que reanudaron en la fase 3 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 117-2020-PCM

Actividades económicas	CIU Rev. 4	Descripción de CIU	Protocolo
Energía y Minería		Todas las actividades correspondientes al Sector Energía y Minas no comprendidas en las Fases 1 y 2 de reanudación de actividades.	MINEM
Agricultura		Todas las actividades correspondientes al Sector Agrario no comprendidas en las Fases 1 y 2 de reanudación de actividades.	MINAGRI
Construcción		Proyectos en general	MINSA
Manufactura			
Otros productos metálicos diversos	2520	Fabricación de armas y municiones.	MINSA
Otros equipos de transporte n.c.p.	3030	Fabricación de aeronaves, naves espaciales y maquinaria conexas.	MINSA
	3040	Fabricación de vehículos militares de combate.	MINSA
Comercio			
Tiendas en general		Con aforo al 50%	MINSA
Servicios			
Restaurantes y servicios afines, excepto bares		Con aforo al 40%	Según numeral 8 de la Primera DCF
Emisión de brevets		Centros de evaluación	MTC
		Escuelas de conductores	MTC
		Entidades habilitadas para expedir certificados de salud	MTC
Servicio de comercialización	4669	Venta al por mayor de desperdicios, desechos y otros productos n.c.p.	MINSA
Servicios de transporte de pasajeros por vía férrea, excepto urbano		Transporte de pasajeros por vía férrea.	MTC
Servicios de transporte terrestre de personas en los ámbitos nacional, regional y provincial		Servicios de transporte especial de personas (transporte turístico) y su infraestructura complementaria.	Según numeral 7 de la Primera DCF
		Servicio de transporte regular de personas y su infraestructura complementaria.	Según numeral 7 de la Primera DCF
Servicios de transporte de pasajeros y carga por vías de navegación interiores (por ríos y lagos)		Transporte acuático de pasajeros por vía fluvial y lacustre (en ámbito nacional y regional)	Según numeral 7 de la Primera DCF
Transporte aéreo. Sólo vuelos nacionales.		Transporte de pasajeros por vía aérea.	Según numeral 7 de la Primera DCF
Servicios conexos al transporte aéreo		Actividades de servicios relacionadas con el transporte aéreo.	MTC
Servicios de transporte aéreo especial turístico		Actividades destinadas a la atención de circuitos turísticos.	MTC
Actividades de aviación general		Actividades aeronáuticas no comerciales.	MTC
Actividades de mudanza, traslado de enseres o afines.		Servicio de transporte de mercancías destinados para actividades de mudanza, traslado de enseres o afines.	MINSA
Servicios de alojamiento en general		Albergues, hostales y establecimientos de hospedaje no clasificados y categorizados.	MINCETUR
Servicios de edición de libros, directorios y otras servicios de edición	5811	Edición de libros	MINSA
	5812	Edición de directorios y listas de correo.	MINSA
	5819	Otras actividades de edición.	MINSA
Servicios de producción, posproducción y distribución de películas, videocintas y programas tv		Actividades de producción de películas y de video.	MINSA
	5912	Actividades de postproducción de películas, de video y de programas de televisión.	MINSA
	5913	Actividades de distribución de películas, de video y de programas de televisión.	MINSA
Servicio de grabación de sonido y edición de música	5920	Actividades de grabación de sonido y edición musical.	MINSA
Servicios de contabilidad, auditoría y consultoría sobre dirección y gestión empresarial	7010	Actividades de las sedes centrales.	MINSA
	7020	Actividades de consultoría de gestión empresarial.	MINSA

Actividades económicas	CIU Rev. 4	Descripción de CIU	Protocolo
Servicios de análisis técnicos, investigación y desarrollo científicos.	7120	Ensayos y análisis técnicos.	MINSA
		Investigación, innovación y desarrollo experimental en todos los campos del conocimiento. Incluye el uso y servicios de laboratorios de las instituciones de educación superior y cetpro con aforo máximo del 50% ¹	MINSA
Servicios de investigación de mercados y encuestas de opinión públicas	7320	Investigación de mercados y realización de encuestas de opinión pública.	MINSA
Servicios especializados de diseño, fotografía y otras actividades profesionales, científicas, técnicas n.c.p.	7410	Actividades especializadas de diseño.	MINSA
	7420	Actividades de fotografía.	MINSA
Servicio de alquiler y arrendamiento de equipos recreativos, deportivos, cintas de video, discos, otros bienes personales y enseres domésticos	7721	Alquiler de artículos deportivos y de ocio.	MINSA
	7722	Alquiler de cintas de video y discos.	MINSA
	7729	Alquiler de otros efectos personales y enseres domésticos.	MINSA
Servicios de arrendamiento de la propiedad intelectual y productos similares	7740	Arrendamiento de la propiedad intelectual y productos similares, excepto trabajos protegidos por derechos de autor.	MINSA
Servicios relacionados a agencias de empleos	7810	Actividades de agencias de colocación de empleo.	MINSA
	7820	Actividades de agencias de trabajo temporal.	MINSA
	7830	Otra provisión de recursos humanos.	MINSA
Servicios de agencia de viajes y operadores turísticos	7911	Actividades de agencias de viajes.	MINCETUR
	7912	Actividades de operadores turísticos.	MINCETUR
		Actividades de guías de turismo.	MINCETUR
Servicios de limpieza, apoyo a edificios y mantenimiento de jardines	8110	Actividades combinadas de apoyo a instalaciones.	MINSA
Servicios de fotocopiado, preparación de documentos y otras actividades especializadas de apoyo a oficinas	8219	Fotocopiado, preparación de documentos y otras actividades especializadas de apoyo a oficinas.	MINSA
Servicios de apoyo especializado de oficinas administrativas y otras actividades empresariales	8211	Servicios administrativos de oficina combinados.	MINSA
	8220	Actividades de centrales telefónicas. Incl. call centers con aforo al 50%.	MTC
	8291	Actividades de agencias de cobranza y agencias de información crediticia.	MINSA
	8292	Actividades de envase y empaque.	MINSA
Otros servicios de arte, entretenimiento y esparcimiento (en destinos sanitarios y con aforo al 50%)	9101	Actividades de bibliotecas y archivos. Incl. bibliotecas universitarias.	MINSA
		Actividades y gestión de museos, monumentos arqueológicos prehispánicos, lugares y edificios históricos, centros culturales (no incluye proyección de películas, obras de teatro y espectáculos) y galerías.	MINCUL
	9103	Actividades de jardines botánicos y zoológicos y de parques nacionales. Incl. áreas naturales.	MINAM
Reparación de computadoras y equipos de comunicación	9511	Reparación de computadoras y equipo periférico.	MINSA
	9512	Reparación de equipos de comunicación.	MINSA
Reparación de aparatos eléctricos de consumo, muebles y otros bienes personales	9523	Reparación de calzado y artículos de cuero.	MINSA
	9524	Reparación de muebles y accesorios para el hogar.	MINSA
	9900	Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales.	MINSA

¹ Incluye actividades de formación práctica de estudiantes en laboratorios y talleres que sean necesarios e indispensables para la continuidad de la formación en el marco del servicio remoto de emergencia.

Anexo 4: Actividades económicas que reanudaron en la fase 4 del Plan de Reactivación Económica estipuladas en el Decreto Supremo N° 157-2020-PCM

Actividades económicas	CIU Rev. 4	Descripción de CIU	Protocolo
Comercio			
Tiendas en general		Con aforo al 60%	
Servicios			
Restaurantes y servicios afines, excepto bares		Con aforo al 50%	
Servicios de transporte marítimo de pasajeros (con aforo al 50% y sin incluir el transporte turístico)	5011	Transporte marítimo y de cabotaje de pasajeros.	MINSA
Servicios de transporte de pasajeros y carga por vías de navegación interiores por ríos y lagos (con aforo al 50%)	5021	Transporte de pasajeros por vías de navegación interiores.	MTC
Transporte aéreo. Vuelos internacionales a destinos sanitarios desde el 05 de octubre.		Transporte de pasajeros por vía aérea.	MTC
Servicios de agencia de viajes y operadores turísticos	7990	Otros servicios de reserva y actividades relacionadas	MINSA
Otros servicios de arte, entretenimiento y esparcimiento (en destinos sanitarios y con aforo al 60%)	9101	Actividades de bibliotecas y archivos. Incl. bibliotecas universitarias.	
	9103	Actividades y gestión de museos, monumentos arqueológicos prehispánicos, lugares y edificios históricos, centros culturales (no incluye proyección de películas, obras de teatro y espectáculos) y galerías.	
		Actividades de jardines botánicos y zoológicos y de parques nacionales. Incl. áreas naturales.	
Otros servicios de arte, entretenimiento y esparcimiento (con aforo al 50%)		Actividades de parques temáticos.	MINSA
		Actividades de clubes y asociaciones <u>deportivas</u> (actividades individuales o en parejas realizadas al aire libre)	MINSA
		Pesca deportiva y deportes náuticos, así como su gestión de reservas y actividades de apoyo. Actividades de guías de montaña.	MINSA

Anexo 5: Salidas de Minitab 19 respecto a la comparación estadística de las concentraciones medias de PM_{2.5} en el período 15 de marzo – 30 de abril

Prueba t en la estación Campo de Marte (2020 - 2019)

Método

μ_1 : media de CDM - 2019

μ_2 : media de CDM - 2020

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CDM - 2019	47	14.66	4.44	0.65
CDM - 2020	47	12.97	2.77	0.40

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
1.696	(0.176, 3.215)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
2.22	77	0.029

Prueba t en la estación Campo de Marte (2021 - 2020)

Método

μ_1 : media de CDM - 2020

μ_2 : media de CDM - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CDM - 2020	47	12.97	2.77	0.40
CDM - 2021	47	15.90	3.78	0.55

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-2.933	(-4.291, -1.574)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-4.29	84	0.000

Prueba t en la estación Campo de Marte (2021 - 2019)

Método

μ_1 : media de CDM - 2019

μ_2 : media de CDM - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CDM - 2019	47	14.66	4.44	0.65
CDM - 2021	47	15.90	3.78	0.55

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-1.237	(-2.927, 0.453)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1.45	89	0.149

Prueba t en la estación San Juan de Lurigancho (2020 - 2019)

Método

μ_1 : media de SJL - 2019

μ_2 : media de SJL - 2020

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
SJL - 2019	41	28.39	7.24	1.1
SJL - 2020	47	11.00	2.51	0.37

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
17.39	(15.00, 19.78)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
14.63	48	0.000

Prueba t en la estación San Juan de Lurigancho (2021 - 2020)

Método

μ_1 : media de SJL - 2020

μ_2 : media de SJL - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
SJL - 2020	47	11.00	2.51	0.37
SJL - 2021	47	25.86	4.71	0.69

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-14.854	(-16.408, -13.301)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-19.07	70	0.000

Prueba t en la estación San Juan de Lurigancho (2021 - 2019)

Método

μ_1 : media de SJL - 2019

μ_2 : media de SJL - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
SJL - 2019	41	28.39	7.24	1.1
SJL - 2021	47	25.86	4.71	0.69

Estimación de la diferencia

IC de 95%
para la
Diferencia diferencia
2.54 (-0.11, 5.18)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
1.92	67	0.060

Prueba t en la estación UMA2 (2020 - 2019)

Método

μ_1 : media de UMA2 - 2019

μ_2 : media de UMA2 - 2020

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
UMA2 - 2019	46	20.15	3.01	0.44
UMA2 - 2020	13	11.79	3.40	0.94

Estimación de la diferencia

IC de 95%
para la
Diferencia diferencia
8.35 (6.15, 10.55)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T GL Valor p

8.01 17 0.000

Prueba t en la estación UMA2 (2021 - 2020)

Método

μ_1 : media de UMA2 - 2020

μ_2 : media de UMA2 - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
UMA2 - 2020	13	11.79	3.40	0.94
UMA2 - 2021	21	16.28	7.17	1.6

Estimación de la diferencia

IC de 95%
para la
Diferencia diferencia
-4.49 (-8.22, -0.76)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-2.46	30	0.020

Prueba t en la estación UMA2 (2021 - 2019)

Método

μ_1 : media de UMA2 - 2019

μ_2 : media de UMA2 - 2021

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
UMA2 - 2019	46	20.15	3.01	0.44
UMA2 - 2021	21	16.28	7.17	1.6

Estimación de la diferencia

IC de 95%
para la
Diferencia diferencia
3.86 (0.50, 7.23)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
2.38	23	0.026