

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Análisis de la distribución de las concentraciones de inmisiones de SO₂ y NO₂ en Lima Metropolitana para las temporadas del 2018 -2019

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Lourdes Rosy Salgado Cantaro

Asesor:

Ing. Dario Ccaccya Ccaccya

Lima, 20 de Julio del 2021

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

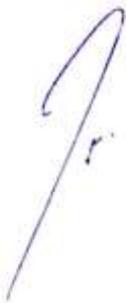
Yo Dario Ccaccya Ccaccya, de la Facultad Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Análisis de la distribución de las concentraciones de inmisiones de SO₂ y NO₂ en Lima Metropolitana para las temporadas del 2018 -2019”** constituye la memoria que presenta el (la) / los Bachiller(es) Lourdes Rosy Salgado Cantaro para obtener el título de Profesional de Ingeniero ambiental cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima a los 12 días del mes de agosto del año 2021



Dario Ccaccya Ccaccya

ACTA DE SUSTENTACIÓN

008

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 20 días día(s) del mes de julio del año 2021 siendo las 10:30 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, el secretario: **Ing. Nancy Curasi Rafael**, y los demás miembros: **Mtro. Javier Linkolk Lopez Gonzales** y el **Mg. Jackson Edgardo Perez Carpio** y el asesor **Ing. Dario Ccaccya Ccaccaya**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Análisis de la distribución de las concentraciones de inmisiones de SO2 y NO2 en Lima Metropolitana para las temporadas del 2018 - 2019"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **LOURDES ROSSY SALGADO CANTARO**

.....b)

.conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **LOURDES ROSSY SALGADO CANTARO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga

Asesor
Ing. Dario Ccaccya
Ccaccya

Candidato/a (a)
Lourdes Rossy

Miembro
Mtro. Javier Linkolk
Lopez Gonzales

Secretario
Ing. Nancy Curasi
Rafael

Miembro
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio

Candidato/a (b)

Análisis de la distribución de las concentraciones de inmisiones de SO₂ y NO₂ en Lima Metropolitana para las temporadas del 2018 -2019

Lourdes Rosy Salgado Cantaro
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1950-7947>
lourdessalgado@upeu.edu.pe
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Peruana Unión, Lima, Perú

Dario Ccaccya Ccaccya
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9752-1379>
darioccaccya@upeu.edu.pe
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Peruana Unión, Lima, Perú

Resumen

En el presente artículo se analizó la distribución de las concentraciones de SO₂ y NO₂ presentes en el aire en Lima Metropolitana. Se usaron registros de las estaciones de la red de calidad de aire de SENAMHI, se verificó y ordenó la información en un formato de 24 horas diarias, se seleccionaron las estaciones meteorológicas Puente Piedra, Ate y San Juan de Lurigancho, las cuales fueron las únicas en contar con un 75% de datos válidos. Mostrando en el 2018 una mayor dispersión del NO₂ en febrero a comparación de agosto debido principalmente al efecto de la velocidad del aire. Para SO₂, en el mes de agosto del 2019 se observó un incremento en la concentración con respecto a agosto del 2018, a causa del crecimiento de las fuentes de emisión. En conclusión, las estaciones meteorológicas seleccionadas cumplen con el estándar de calidad ambiental del aire (DS N°003-2017 MINAM).

Palabras claves: Concentración, dispersión, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno.

Abstract

In this article, the distribution of the concentrations of SO₂ and NO₂ present in the air in Metropolitan Lima was analyzed. Records from the stations of the SENAMHI air quality network were used, the information was verified and ordered in a 24-hour-a-day format, the Puente Piedra, Ate and San Juan de Lurigancho meteorological stations were selected, which were the only ones in having 75% valid data. Showing in 2018 a greater dispersion of NO₂ in February compared to August, mainly due to the effect of air speed. For SO₂, in August 2019 an increase in concentration was observed compared to August 2018, due to the growth of emission sources. In conclusion, the selected meteorological stations comply with the environmental air quality standard (DS N ° 003-2017 MINAM).

Keywords: Concentration, dispersion, nitrogen dioxide, sulfur dioxide.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento de sustancias contaminantes en la atmósfera que se da como resultado de distintos procesos naturales y antropogénicos, está ligada a consecuencias negativas en el medio ambiente y principalmente en la salud humana[1], [2][3]. Por ello, actualmente uno de los problemas más severos en el mundo es la contaminación del aire, según la Organización mundial de la Salud en el año 2012 murieron 7 millones de personas como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica[4]. Además, nueve de cada diez personas respiran aire contaminado es por ello que según las estimaciones del 2016 cada año hay 4.2 millones de muertes prematuras a causa de la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales[5], [6]. Lima es la ciudad con peores indicadores de calidad de aire relacionado a material particulado suspendido en el aire, según un análisis realizado en 1600 ciudades de 91 países por la organización mundial de la salud (OMS)[7]. Asimismo los agentes contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el dióxido de azufre (SO_2) son emitidos por el parque automotor (14%) y las industrias principalmente (86%) [8], [9], estos gases tienen efectos dañinos para la salud de las personas por ejemplo el dióxido de nitrógeno (NO_2) causa bronquitis, neumonía e irrita los pulmones, el dióxido de azufre (SO_2) causa afecciones respiratorias como el asma, agrava las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, debilita las defensas pulmonares[10]–[12].

En el ámbito nacional la calidad del aire está basado en el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA aire) que se encuentran en el decreto supremo DS 003-2017-MINAM, donde establecen niveles de concentración de los contaminantes del aire, de forma que al mantenerse bajo esos rangos no presenten riesgo a la salud de las personas y del ambiente[13]. En noviembre del 2017, el ministerio del ambiente (MINAM) aprobó el DS N°010-2017 MINAM los límites máximos permisibles (LMP) para las emisiones de los vehículos automotores, con el fin de minimizar las emisiones de contaminantes y contribuir a mejorar la calidad de aire[14]. El organismo público encargado de registrar la información de calidad de aire es el Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú (SENAMHI) afiliado al ministerio del ambiente (MINAM, tiene como objetivo generar y proveer información y

conocimiento meteorológico, hidrológico y climático de manera oportuna, confiable y accesible en beneficio de la sociedad peruana el SENAMHI monitorea la calidad del aire en la ciudad de Lima y genera pronósticos con variables que intervienen en la “dispersión, deposición y transporte de contaminantes, velocidad y dirección de viento, transporte por turbulencia, por tipo de nubes, reacciones químicas en la atmosfera y fuentes contaminantes antropogénicas y biogénicas”[15]. La red de monitoreo automática del área metropolitana de Lima-Calla (AMLC) viene operando desde el 2010 con 5 estaciones meteorológicas (San Borja, Villa María, Ate, y Santa Anita) y posteriormente en el 2014 se incorporaron 5 estaciones meteorológicas (San Juan de Lurigancho, Huachipa, San Martín de Porres y Carabayllo) éstas fueron ubicados en lugares estratégicos como en parques, edificios públicos y municipalidades todas las estaciones meteorológicas tienen equipos para la medición de gases y partículas [7], [11].

“La dispersión de contaminantes de una fuente depende de la cantidad de turbulencia en la atmosfera cercana y los factores que influyen son el viento, radiación solar, precipitación, estabilidad atmosférica y la topografía” [15]. En todo el mundo se registran y recopilan una cantidad enorme de datos de contaminación del aire, por ejemplo, Europa tiene una base de datos llamado *Airbase* que consta de más de 7000 sitios de monitoreo, esto solo representa una fracción de la totalidad de los datos [16] en Perú el servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI) almacena los datos de las estaciones meteorológica, realiza un análisis y lo compara con el estándar de calidad de aire vigente. Además, han diseñado aplicaciones que te muestran la información actual del tiempo a nivel nacional[17].

Los datos recopilados son usados superficialmente, por ejemplo, para ver si la media anual está por encima o debajo de un valor umbral establecido, al realizar estos análisis básicos se pierde información útil, por ello el uso de las nuevas herramientas para el manejo de grandes volúmenes de datos permiten tener una evidencia más completa, identifica factores que controlan los contaminantes, mejora la calidad de los análisis, esto genera buenas decisiones y acciones

específicas para gestionar la contaminación del aire[16]. Los softwares como R, AERMOD, MATLAB y WRPLOT son herramientas de acceso libre, en las cuales se importa, manipula y se realizan múltiples análisis de grandes volúmenes de datos de calidad de aire para mejorar su comprensión. En el presente artículo se realizó un análisis de calidad de aire a partir de los datos registrado por la red de automática de área Metropolitana de Lima – Callao. Todos los datos fueron ordenados y procesados en el lenguaje de

II. MATERIALES Y METODOS

✓ Lugar de estudio

Lima y Callao forman la zona metropolitana más enorme del Perú, ya que representan el 29.7% de la población total[7], [20], se encuentra ubicada geográficamente entre “las latitudes 11°45’ y 12° 24’ Sur y las longitudes 76°40’ y 77°10’ Oeste, para estudios atmosféricos se ha zonificado en tres cuencas denominadas la cuenca del Río Chillón, Río Rímac y Río Lurín”[7]. Los datos de calidad de aire fueron proporcionados por el (SENAMHI) Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú, para el periodo de estudio comprendido de los años 2018 al 2019. El monitoreo de la calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao lo ejecutan 2 organizaciones. La primera es la dirección general de salud ambiental (DIGESA) ente que forma parte del ministerio de salud encargado de la vigilancia progresiva desde el año 1986. La segunda es el servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI), ente que pertenece al ministerio del ambiente (MINAM) [7] este realiza la supervisión de la meteorología y de la calidad del aire a través de sus 10 estaciones meteorológicas como Ate (ATE), Santa Anita (STA), Huachipa (HCP), San Juan de Lurigancho

programación R haciendo uso de la librería Openair, estas herramientas son de acceso libre y de código abierto donde se desarrollan múltiples análisis estadísticos y gráficos de datos de manera rápida aun cuando el volumen de datos sea gigantesco[18], actualmente hay muchos estudios que usaron esta librería [2], [16], [19] debido a que está diseñado para el estudio de los datos de calidad de aire y su uso permite desarrollar herramientas avanzadas para propósitos específicos.

(S JL), Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), Campo de Marte (CDM), San Borja (SBJ) y Villa María del Triunfo (VMT) de esta red de monitoreo 5 vienen operando desde el 2010 y posteriormente en el año 2014 se implementó 5 estaciones[11]. Las estaciones meteorológicas registran los siguientes parámetros: dirección de viento, velocidad de viento, humedad, precipitación, temperatura, material particulado grueso menor a 10 micrómetros (PM_{10}), material particulado fino ($PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO)[21]. En la presente investigación se usó el software R que es un lenguaje de programación creado en un entorno pensado para el análisis estadístico y gráfico de datos, y su paquete Openair que está diseñado específicamente para el análisis de calidad de aire [18].

En la figura se ve el mapa de Lima con las respectivas estaciones meteorológicas y en la tabla se muestra la ubicación con sus respectivas coordenadas en UTM.

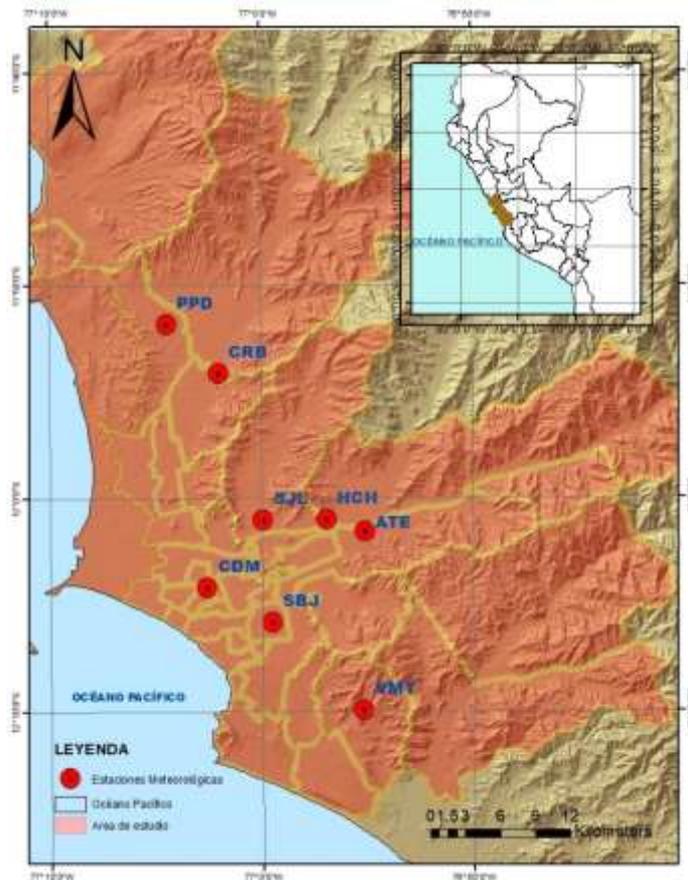


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas

TABLA I. Estaciones Meteorológicas de Lima y Callao de SENAMHI

ZONA DE LIMA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LATITUD S	LONGITUD E
Norte	Carabayllo	8683450	278497
	Puente Piedra	8687727	274053
	Ate	8669823	291097
Este	Huachipa	8670827	287827
	San Juan de Lurigancho	8670788	282382
Centro	Campo de Marte	8664893	277601
	San Borja	8661900	283200
Sur	Villa María del Triunfo	8654306	291077

Fuente: [7]

Análisis de datos

Se eligieron los datos de los agentes contaminantes dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2) en los meses de febrero y agosto, en la tabla 1 y 2 se muestra a las estaciones meteorológicas y los datos registrados en porcentajes.

Según el boletín mensual que emite el servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú

(SENAMHI) menciona que en sus registros no han sido considerados varios contaminantes en las 10 estaciones meteorológicas que están en funcionamiento, debido a las actividades de mantenimiento y calibración [21].

Para el análisis de datos se usó el software estadístico R con su paquete Openair.

TABLA II. Porcentaje de datos de NO₂ registrados en 2018-2019

ZONA DE LIMA	ESTACIONES METEOROLOGICAS	FEBRERO 2018	AGOSTO 2018	FEBRERO 2019	AGOSTO 2019
Norte	Carabayllo	90%	15%	10%	60%
	Puente Piedra	80%	90%	0%	50%
	Ate	80%	100%	0%	40%
Este	Huachipa	0	80%	80%	0%
	San Juan de Lurigancho	85%	100%	50%	80%
Centro	Campo de Marte	40%	50%	0%	0%
Sur	San Borja	80%	0%	0%	60%
	Villa María del Triunfo	10%	0%	0%	70%

En la tabla se observa en porcentajes los datos registrados por la red de calidad de aire de Lima Metropolitana y el Callao, de dióxido de nitrógeno (NO₂) para el año 2018 y 2019, en el año 2018 se observa porcentajes variables, algunos valores tienen datos menores al 50% e incluso 0% tanto para los escenarios febrero y agosto, las estaciones que presentan registros mayor o igual al 75%, lo cual indica una representatividad en los datos, son las estaciones de Puente Piedra, Ate y San Juan de Lurigancho para los meses de febrero y agosto, en

cuanto al año 2019 se observa que solo 2 estaciones meteorológicas cumplen con el porcentaje de representatividad de datos mayor o igual al 75%, la estación de Huachipa en el mes de febrero y San Juan de Lurigancho en agosto.

Tabla III. Porcentajes de datos de SO₂ registrados 2018-2019

ZONA DE LIMA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FEBRERO 2018	AGOSTO 2018	FEBRERO 2019	AGOSTO 2019
Norte	Carabayllo	100%	0%	70%	60%
	Puente Piedra	90%	0%	0%	25%
Este	Ate	0%	75%	50%	40%
	Huachipa	60%	60%	80%	0%
	San Juan de Lurigancho	60%	100%	40%	90%
Centro	Campo de Marte	0%	0%	0%	0%
Sur	San Borja	80%	30%	0%	0%
	Villa María del Triunfo	0%	50%	0%	0%

En la tabla se observa en porcentajes los datos registrados por las estaciones meteorológicas de la red de calidad de aire de Lima Metropolitana y el Callao, del dióxido de azufre (SO₂) para 2018 y 2019, en el 2018 se observa porcentajes variables de los cuales algunos valores están por debajo del 50% e incluso no se registran datos en varias estaciones para febrero y agosto, las estaciones meteorológicas que cumplen con el porcentaje de

representatividad de datos solo para el mes de febrero son las estaciones de Puente Piedra, Carabayllo y San Borja y para agosto San Juan de Lurigancho, para el año 2019 se observa que la mayoría de datos no cumplen con el porcentaje de representatividad y no se registran datos en varias estaciones para febrero y agosto, a excepción de la estación de Huachipa en febrero y San Juan de Lurigancho en agosto.

✓ **Selección de Escenarios**

Se estableció la selección de las siguientes estaciones meteorológicas para los meses de febrero y agosto, estos escenarios fueron elegidos tomando en cuenta el protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de datos de la dirección general de salud (DIGESA) donde menciona que se necesita un mínimo de 75% de observaciones

finales para el procesamiento estadístico de datos [22]–[24], además permite ver la variación de los agentes contaminantes en febrero y agosto por que son meses con condiciones meteorológicas representativas de las temporadas de verano e invierno respectivamente en Lima y Callao.

TABLA IV. Estaciones meteorológicas seleccionadas del año 2018 según los porcentajes de datos registrados de NO₂

ZONA DE LIMA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FEBRERO	AGOSTO
Norte	Puente Piedra	80%	90%
Este	Ate	80%	100%
	San Juan de Lurigancho	85%	100%

En la tabla se muestra a las estaciones elegidas Puente Piedra, Ate y San Juan de Lurigancho que presentaron registros de NO₂ superiores al 75% en los meses de febrero y agosto respectivamente.

Para los registros de NO₂ de todas las estaciones meteorológicas solo estas tres estaciones fueron elegidas ya que cumplen con la representatividad que es igual o mayor al 75% de datos registrados.

TABLA V. Estaciones meteorológicas seleccionadas del año 2018 -2019 según los porcentajes de datos registrados de SO₂

ZONA DE LIMA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	AGOSTO 2018	AGOSTO 2019
Este	San Juan de Lurigancho	100%	90%

En la tabla se observa la estación meteorológica de San Juan de Lurigancho que fue seleccionada debido a que los registros mostraron un porcentaje de datos mayores al 75% para el mes de agosto del año 2018 y 2019. De todos los registros de SO₂ de la red de calidad de aire de Lima Metropolitana

solo esta estación cumple con el porcentaje de representatividad que es igual o mayor al 75% en comparación con otras estaciones meteorológicas que presentan registros con datos mínimos o no existentes.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Luego de realizar el tratamiento de datos que consistió en ordenar la data registrada de forma horaria en un formato de 24 horas para cada día durante los meses de febrero y agosto del 2018 y 2019 respectivamente, donde se registraron los parámetros meteorológicos velocidad de viento (m/s) y dirección de viento (0° a 360°) y de calidad de aire, concentración de NO₂ (µg/m³) y concentración de SO₂ (µg/m³).

Se desarrollaron gráficos de rosas de viento que muestran de forma visual el registro horario de la dirección y velocidad del viento en el punto de ubicación de la estación meteorológica [25], del cual se interpretó el comportamiento del viento para los meses de

febrero y agosto según el escenario establecido para cada agente contaminante. También se desarrollaron gráficos polares los cuales identifican de manera específica las fuentes de origen del

agente contaminante[18], [19], al relacionar la dirección y velocidad del viento y la concentración del contaminante.

A continuación, se muestran los resultados para el agente NO₂ en las estaciones Puente Piedra, Ate

Vitarte y San Juan de Lurigancho para los meses de febrero y agosto del 2018, y para el agente SO₂ en la estación de San Juan de Lurigancho para los meses de agosto del 2018 y agosto del 2019.

Distribución de NO₂

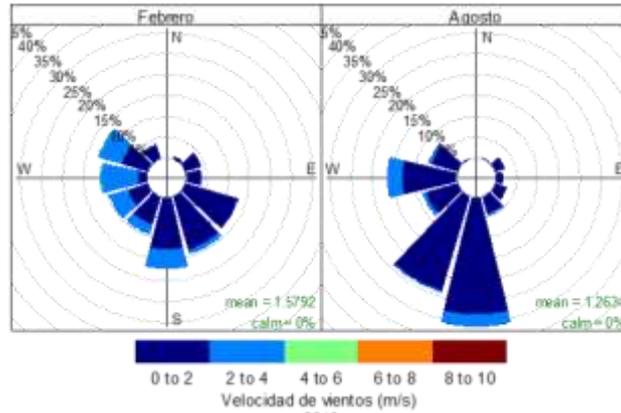


Figura 2. Rosa de vientos de la estación Puente Piedra

La figura muestra el gráfico de rosa de viento, donde se relacionan las velocidades y direcciones del viento de la estación Puente Piedra en los meses febrero (izquierda) y agosto (derecha). En el gráfico izquierdo del mes de febrero se observa vientos bajos de diferentes direcciones y una

predominancia de vientos provenientes del Sur y Sureste con velocidades de 1 a 4 m/s, en el gráfico de derecho del mes de agosto se observa una predominancia notable de vientos provenientes del Sur y Suroeste con velocidades de 1 a 2 m/s principalmente.

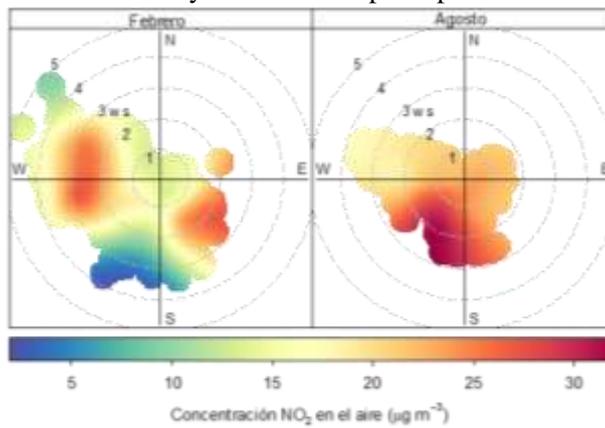


Figura 3. Gráfico polar de la estación Puente Piedra

En la figura se observa el gráfico polar de la estación Puente Piedra, las variaciones de las concentraciones de NO₂ en µg/m³ para los meses febrero y agosto del 2018 respectivamente, en el gráfico izquierdo del mes de febrero se observa variaciones en los valores de las concentraciones de NO₂ con concentraciones mínimas de ~ 0 a 10 µg/m³ provenientes del Sur con velocidades de vientos entre 1 a 4 m/s, también se observa concentraciones mayores provenientes del Oeste con valores de ~ 12.5 a 30 µg/m³ con vientos entre 2 a 3 m/s, y concentraciones del Sureste con

valores de ~ 12.5 a 25 µg/m³ con vientos entre 1 a 3 m/s. En el gráfico derecho correspondiente al mes de agosto se observa una notable diferencia en las concentraciones registradas, con valores máximos de ~ 28.5 a 30 µg/m³ provenientes del Sur y Suroeste con vientos entre 1 a 3 m/s, y concentraciones ligeramente menores entre ~ 20 a 25 µg/m³ provenientes del Este con vientos 1 a 4 m/s.

De los gráficos de rosas de vientos y polares de la estación Puente Piedra, se observa para el mes

de febrero del 2018 registros de diferentes direcciones de viento generan variaciones en las concentraciones de NO₂, este efecto produce concentraciones variadas obteniéndose valores desde ~ 0 a 25 µg/m³, en cuanto mes de agosto se observa una reducción en las velocidades del

viento y una predominancia en dirección Sur, registrándose concentraciones máximas de ~ 28.5 a 30 µg/m³ incluso superando estos últimos valores, debido a las velocidades de viento cercanas a cero que no hacen posible la dispersión de las concentraciones de NO₂.

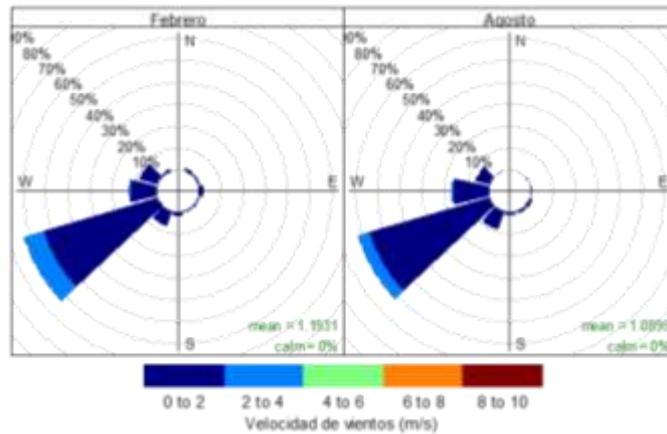


Figura 4. Rosa de Vientos de la estación Ate Vitarte

La figura muestra el grafico de rosa de viento, donde se relacionan las velocidades y direcciones del viento de la estación Ate Vitarte en los meses febrero (izquierda) y agosto (derecha). En el grafico izquierdo del mes de febrero se observa vientos bajos con una predominancia importante

proveniente del Suroeste con velocidades de 1 a 2 m/s, en el grafico derecho del mes de agosto se observa que la predominancia de vientos provenientes del Suroeste se mantiene con valores de 1 a 2 m/s, en ambos meses se presentan registros mínimos de vientos del Sureste y Oeste.

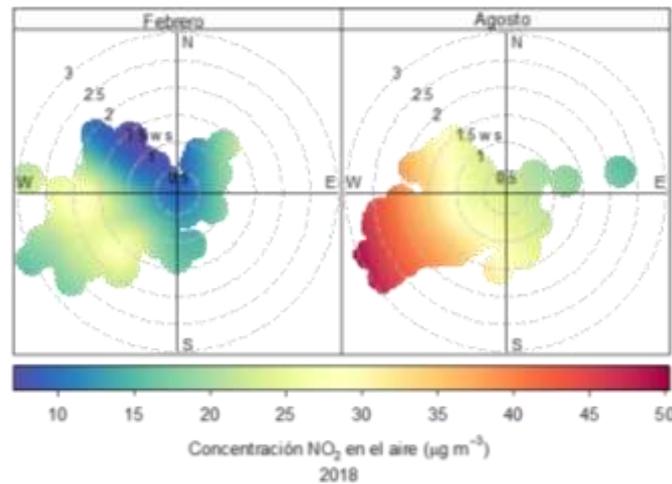


Figura 5. Gráfico polar de la estación Ate Vitarte

En la figura se observa en el gráfico polar de la estación Ate Vitarte las variaciones de las concentraciones de NO₂ en µg/m³ para los meses de febrero y agosto del 2018 respectivamente, en el grafico izquierdo del mes de febrero se observa variaciones en los valores de las concentraciones de NO₂ con concentraciones mínimas de ~ 0 a 10 µg/m³ provenientes del Noroeste con vientos de 0.5 a 2 m/s y concentraciones máximas de ~ 20 a 28.5 µg/m³ provenientes del Suroeste con vientos de 1.5 a 2.5 m/s. En el grafico derecho correspondiente al

mes de agosto se observa un incremento notable en los valores de las concentraciones de NO₂ con valores máximos de ~ 35 a 50 µg/m³ provenientes del Suroeste con vientos de 2 a 3 m/s, también se observa concentraciones mínimas de ~ 15 a 25 µg/m³ provenientes del Este con vientos de 0.5 a 1.5 m/s.

De los gráficos de rosas de viento y polar de la estación Ate Vitarte se observa que para ambos meses de febrero y agosto del 2018 la

predominancia del viento se mantiene en la dirección Suroeste con vientos bajos de 1 a 2 m/s, para el mes de febrero se observa concentraciones de NO₂ provenientes principalmente del Suroeste con valores entre ~ 0 a 28.5 µg/m³, para el mes de agosto se observa que las concentraciones de NO₂ incrementaron sus valores entre ~ 25 a 50 µg/m³ en

dirección Suroeste, en ambos meses las velocidades de viento varían de forma mínima, lo que indica que los cambios en las concentraciones registradas de NO₂ se debe principalmente a un aumento externo en las emisiones liberadas al ambiente.

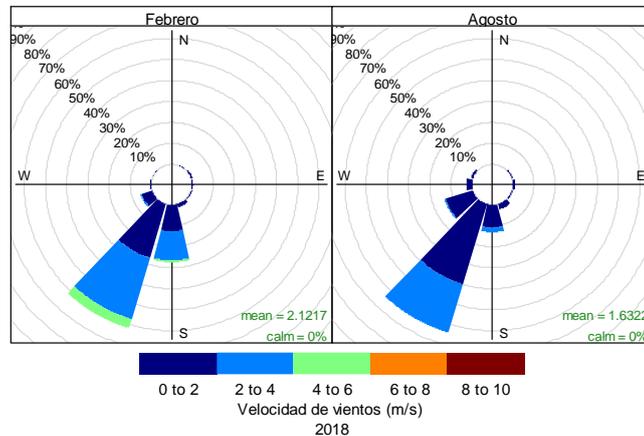


Figura 6. Rosa de vientos de la estación de San Juan de Lurigancho

La figura muestra el grafico de rosa de viento, donde se relacionan las velocidades y direcciones del viento de la estación San Juan de Lurigancho en los meses febrero (izquierda) y agosto (derecha). En ambos gráficos para los meses de febrero y agosto se observa una predominancia del viento

proveniente del Suroeste, en el grafico izquierdo del mes de febrero se observa vientos variables de 1 a 6 m/s y vientos menores del Sur de 1 a 4 m/s, en el grafico derecho para el mes de agosto se observa vientos de 1 a 4 m/s del Suroeste y otros registros menores provenientes del Sur y Oeste.

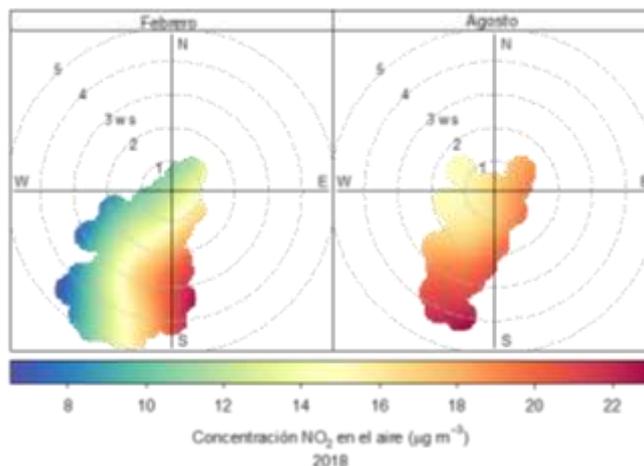


Figura 7. Gráfico Polar de la estación de San Juan de Lurigancho

En el gráfico polar de la estación San Juan de Lurigancho las variaciones de las concentraciones de NO₂ en µg/m³ para los meses febrero y agosto del 2018 respectivamente, en el grafico izquierdo del mes de febrero se observa variaciones en los

valores de las concentraciones de NO₂ con concentraciones mínimas de ~ 0 a 12 µg/m³ provenientes del Suroeste y Oeste con vientos del 1 a 5 m/s, también se observa concentraciones mayores provenientes del Sur con valores de ~ 14

a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con vientos de 1 a 5 m/s. En el gráfico derecho correspondiente al mes de agosto se observa un notable incremento en las concentraciones registradas, con valores máximos de ~ 18 a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ incluso superando este último valor provenientes del Sur con vientos entre 1 a 5 m/s, y concentraciones ligeramente menores entre ~ 15 a $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Este y Oeste con vientos 1 a 2 m/s.

De los gráficos de rosas de viento y polar de la estación de San Juan de Lurigancho se observa que para ambos meses de febrero y agosto del 2018 la predominancia del viento se mantiene en la dirección Suroeste, pero con variaciones en la velocidad siendo para febrero velocidades entre 1 a

6 m/s y en agosto velocidades entre 1 a 4 m/s. Para el mes de febrero se observa concentraciones de NO_2 provenientes principalmente del Sur con valores entre ~ 14 a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y concentraciones menores en dirección Suroeste, para el mes de agosto se observa que las concentraciones de NO_2 incrementan su valor entre 18 a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en dirección Suroeste y Sur principalmente. En ambos meses se observa que la velocidad del viento ejerce un efecto importante en la dispersión de las concentraciones de NO_2 es por esto que en agosto se presenta mayores valores de NO_2 ya que la velocidad de viento durante este mes se reduce a diferencia de febrero generando un incremento concentraciones de NO_2 en el aire

Distribución de SO_2

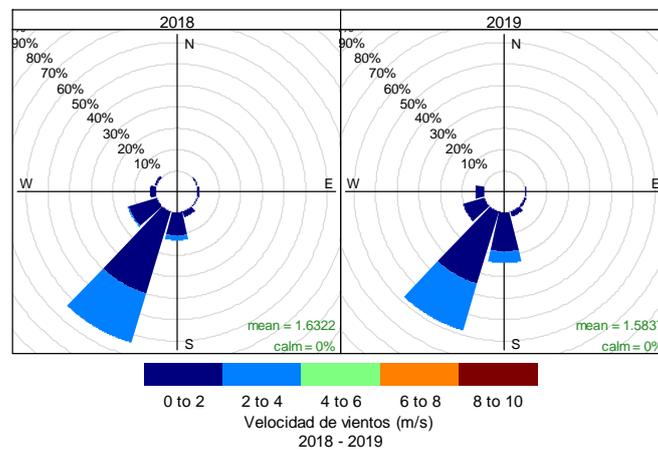


Figura 8. Rosa de vientos de la estación San Juan de Lurigancho

El gráfico de rosa de viento donde se relacionan las velocidades y direcciones del viento de la estación de San Juan de Lurigancho en los meses de agosto del 2018 (izquierda) y agosto del 2019 (derecha). En ambos gráficos se observa una predominancia del viento proveniente del Suroeste, en el gráfico izquierdo del mes de agosto del 2018 se observa que los vientos predominantes tienen

velocidades de 1 a 4 m/s y vientos en menor proporción provenientes del Sur y Oeste con velocidades 1 a 2 m/s, en el gráfico derecho del mes de agosto del 2019 se observa que la predominancia de los vientos del Suroeste presenta una ligera reducción con velocidades de 1 a 4 m/s y se registra un aumento en los vientos provenientes del Sur con velocidades de 1 a 4 m/s.

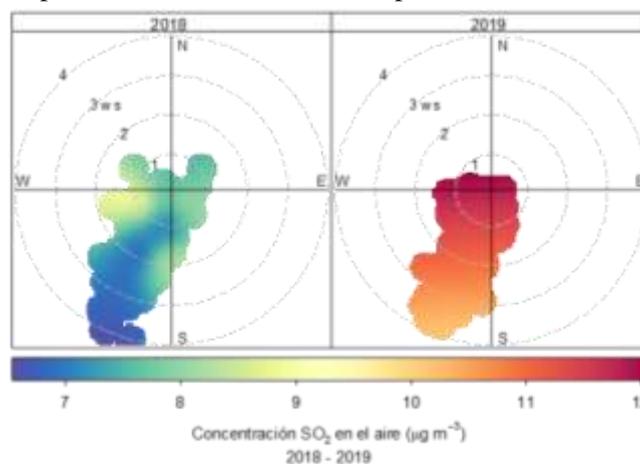


Figura 9. Gráfico Polar de la estación de San Juan de Lurigancho

En el gráfico polar de la estación de San Juan de Lurigancho las variaciones de las concentraciones SO_2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los meses de agosto de 2018 y agosto del 2019 respectivamente, en el gráfico izquierdo del mes de agosto del 2018 se observa variaciones en las concentraciones de SO_2 con valores de ~ 6.5 a $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Sur y Suroeste con vientos de 1 a 4 m/s, también se observa concentraciones mayores pero en menor

De los gráficos de rosas de viento y polar de la estación de San Juan de Lurigancho se observa, para ambos meses de agosto 2018 y agosto 2019 la predominancia del viento se mantiene en la dirección Suroeste con velocidades de 1 a 4 m/s, pero con una ligera reducción en esta predominancia en agosto del 2019 y un ligero aumento de los vientos del Sur con velocidades de 1 a 4 m/s con respecto a este último año. Para el mes de agosto del 2018 se observa que las concentraciones de SO_2 provienen principalmente del Sur y Suroeste con valores entre ~ 6.5 a 8.5

IV. CONCLUSIONES

Solo tres estaciones meteorológicas de la red de calidad de aire de Lima Metropolitana presentaron condiciones aceptables en el registro de datos para determinar escenarios comparativos de emisiones de NO_2 y SO_2 en los meses de febrero y agosto del 2018 y 2019, las cuales fueron Puente Piedra, Ate Vitarte, San Juan de Lurigancho para el agente NO_2 , y solo la estación San Juan de Lurigancho para el agente SO_2 .

Para el mes de febrero del 2018 las concentraciones del agente contaminante NO_2 presento en la estación Puente Piedra ubicada al Norte de Lima Metropolitana registros provenientes del Oeste y Este con valores de ~ 0 a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la estación de Ate Vitarte ubicada al Este de la ciudad presento registros provenientes del Oeste y Suroeste de ~ 0 a $28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la estación San Juan de Lurigancho ubicada en el Noreste de la ciudad presento registros provenientes del Sur de ~ 14 a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en cuanto al mes de agosto del 2018 la estación Puente Piedra presento concentraciones de ~ 28.5 a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Sur y Suroeste, en la estación Ate Vitarte concentraciones de ~ 25 a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Suroeste, en la estación San Juan de Lurigancho ~ 18 a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Sur y Suroeste. Se observa un incremento en las concentraciones de NO_2 en el mes de agosto a comparación de febrero en las tres estaciones analizadas, este

registro provenientes del Norte y Oeste con valores de ~ 8 a $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con vientos de 1 a 1.5 m/s. En el gráfico derecho correspondiente al mes de agosto del 2019 se observa un notable incremento en las concentraciones registradas, con valores de ~ 11 a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Sur y Suroeste con vientos de 1 a 4 m/s y concentraciones mayores, pero en menor registro de $\sim 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes del Norte y Oeste con vientos de 1 a 1.5 m/s.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, para el mes de agosto del 2019 se observa que las concentraciones de SO_2 incrementan su valor entre ~ 11 a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en dirección Sur y Suroeste. En ambos meses se observa que la velocidad y dirección del viento no registran una variación importante, pero se evidencia un incremento de las concentraciones de SO_2 en el mes agosto del 2019 respecto a agosto del 2018, lo cual indica que existe un incremento en las fuentes de emisiones de SO_2 del 2019 respecto al 2018, que se liberan a la atmosfera.

incremento en las concentraciones puede ser el resultado de las condiciones meteorológicas presentes en las zonas de ubicación de las estaciones sin embargo para ambos meses se observa vientos con velocidades entre 1 a 5 m/s para el mes de febrero y de 1 a 3 m/s para agosto, lo cual indica que el viento cumple un papel fundamental en la dispersión del NO_2 en el aire. En cuanto a las tres estaciones mencionadas no superan el límite de estándar de calidad ambiental peruano NO_2 : $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [26], sin embargo existe la presencia de un $\sim 20\%$ de datos registrados de forma horaria que superan el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud NO_2 : $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [27] en las horas diurnas generalmente.

Para el mes de agosto del 2018 y agosto del 2019 las concentraciones del agente contaminante SO_2 presentes en la estación San Juan de Lurigancho ubicada al Noreste de Lima, fueron de ~ 6.5 a $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y ~ 11 a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambos meses de cada año respectivamente, ambas concentraciones provienen principalmente del Sur y Suroeste, en cuanto a las condiciones meteorológicas para ambos meses se mantienen con vientos de 1 a 4 m/s, lo cual indica que el aumento de las concentraciones de agosto del 2018 con respecto al 2019 puede deberse a un incremento de las emisiones de SO_2 por parte de las fuentes de la ciudad de Lima. En cuanto a los

registros de concentraciones dados no superan el límite de estándar de calidad ambiental peruano SO_2 : $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [26], sin embargo existe la presencia de un $\sim 45\%$ de datos registrados de forma horaria que superan el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud SO_2 : $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [27] en las horas nocturnas generalmente.

En cuanto a los resultados obtenidos de las estaciones Puente Piedra, Ate Vitarte y San Juan de Lurigancho, que cumplieron con las condiciones para el análisis de datos de la distribución espacial de NO_2 y SO_2 en Lima Metropolitana, se observa a partir los gráficos polares obtenidos que existe la presencia de un núcleo de concentraciones de estos agentes contaminantes sobre el área Este de la ciudad, área que contempla los distritos del Sur de San Juan de Lurigancho (1 038 495 hab.), El Agustino (198 862 hab.), Santa Anita (196 214 hab.), La Victoria (173 630 hab.) y el Este de Ate Vitarte (599 196 hab.) [28], obteniéndose un total de 2 206 397 habitantes que estarían expuestos continuamente a un aire con concentraciones de NO_2 y SO_2 .

Finalmente, el estudio es relevante debido a que los resultados serán muy útiles para investigaciones futuras y para proponer una adecuada gestión de la calidad de aire que beneficiara a la población de Lima y Callao en la mejora de la calidad de vida y estado de salud, además el aporte ambiental de la presente investigación es alertar a las autoridades a tomar acción sobre la población vulnerable, proponiendo mecanismos de minimización de los contaminantes NO_2 y SO_2 , como la inversión en producción y consumo más limpios, ampliación de espacios verdes, establecer y aplicar normas avanzadas sobre la reducción de emisiones de vehículos e industrias.

REFERENCIAS

- [1] E. Sánchez Triana, K. Ahmed, and Y. Awe, *Prioridades Ambientales Para la Reducción de la Pobreza en Colombia: Un Análisis Ambiental Del País Para Colombia*, Mayol Edic. Colombia, 2006.
- [2] J. A. Li Ramírez, N. D. Duque Méndez, Á. M. Pérez Zapata, and B. H. Aristizábal Zuluaga, “Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales Generation and representation of air quality indexes: a case study applied to Manizales,” *ITECKNE*, vol. 13, no. 2, pp. 174–184, 2016.
- [3] A. Encalada Malca, J. Cochachi Bustamante, P. Canas Rodrigues, R. Salas, and J. López Gonzales, “A Spatio-Temporal Visualization Approach of PM10 Concentration Data in Metropolitan Lima,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 5, p. 18, 2021.
- [4] OMS, “7 Millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica,” 2014. [Online]. Available: <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>.
- [5] OMS, “Calidad del aire y salud,” 2018. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- [6] J. Maza and J. Sanchez, “Contribución al estudio de la socavación local en pilas de puente,” México, 1964.
- [7] S. Pacsi Valdivia, “Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado pm10 y pm 2.5 en Lima Metropolitana,” *An. Científicos*, vol. 77, no. 2, pp. 273–283, 2016.
- [8] V. Tapia *et al.*, “Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2.5 y 10) dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú,” *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, vol. 35, no. 2, pp. 190–197, 2018.
- [9] P. A. García ávila, “Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá,” Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [10] M. García G, H. Ramírez S, H. Ulloa G, O. García G, Á. Meulenert P, and J. Alcalá G, “Concentración de contaminantes SO_2 , NO_2 y correlación con H^+ , SO_4^{2-} y NO_3^- durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México,” *Rev Chil Enf Respir*, vol. 29, no. 2, pp. 81–88, 2013.

- [11] MINAM, “Informe nacional de la calidad del aire 2013-2014,” Lima, 2014.
- [12] M. E. Zambrano Chávez, “Análisis de dispersión de contaminantes emitidos por motores que utilizan petróleo crudo como combustible,” Universidad de Barcelona, 2018.
- [13] MINAM, “Conoce la calidad del aire en tiempo real a través de Infoaire Perú,” 2016. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/conoce-la-calidad-del-aire-en-tiempo-real-a-traves-del-infoaire-peru/>. [Accessed: 16-Feb-2021].
- [14] O. R. Sánchez Ccoyllo *et al.*, “Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011,” Lima, 2013.
- [15] J. Inche, “7 transporte y dispersión de contaminantes del aire,” in *Gestión de la calidad del aire: Causas, efectos y soluciones*, 2004, pp. 59–62.
- [16] D. Carslaw and K. Ropkins, “Software y modelado ambiental openair d Un paquete R para el análisis de datos de calidad del aire,” *Model. Ambient. y Softw.*, vol. 27–28, pp. 52–61, 2012.
- [17] SENAMHI, “SENAMHI lanza renovada plataforma web para optimizar atención a la ciudadanía y prevenir desastres,” *Senamhi*, 2017. [Online]. Available: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=prensa&n=682>.
- [18] F. D. Follos Pliego, “Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire.” pp. 1–121, 2012.
- [19] D. Portal Castillo, “Gestión de la contaminación ambiental mediante técnicas de minería de datos,” *Rev. Cuba. Meteorol.*, vol. 24, no. 0, pp. 349–355, 2018.
- [20] INEI, “La población de Lima supera los nueve millones y medio de habitantes,” Lima, 2020.
- [21] C. Ordoñez and M. Norabuena, “Vigilancia de la Calidad del Aire en el área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC)-Febrero 2019,” Lima, 2019.
- [22] DIGESA, *PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y GESTION DE LOS DATOS*. Perú, 2005.
- [23] IDEAM, “Informe del estado del aire en Colombia,” Colombia, 2016.
- [24] G. R. Martínez Espeleta, “Diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad de Cartagena de Indias 2014 y 2015.,” Universidad Tecnológica de Bolívar, 2016.
- [25] C. A. Díaz Calva, “Aplicacion de la herramienta informatica R para el analisis de datos de contaminacion del aire en el distrito metropolitano de Quito,” Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [26] MINAM, *DECRETO SUPREMO N°003-2017-MINAM*. Perú, 2017, pp. 1–4.
- [27] OMS, “Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.” WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, pp. 2–25, 2005.
- [28] INEI, “SISTEMA ESTADISTICO NACIONAL,” Lima, 2019.

RESUMEN CURRICULAR



Salgado Cantaro Lourdes Rosy,
Bachiller en Ingeniería Ambiental
de la Universidad Peruana Unión-
Lima-Perú.



Ccaccya Ccaccya Darío, Ingeniero Ambiental
de la Universidad Tecnológica de Lima Sur,
Lima – Perú. Especialista en Modelización
Ambiental y Herramientas Informáticas
Aplicadas a la Ingeniería y Ciencias
Ambientales. Docente Investigador de la
Universidad Peruana Unión, Lima – Perú.