



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS**  
**MENCIÓN ECOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL DIÓXIDO DE  
NITRÓGENO MEDIANTE UN ANALIZADOR AUTOMÁTICO EN  
PUNTOS ESTRATÉGICOS DEL TRÁNSITO VEHICULAR EN LA  
CIUDAD DEL CUSCO**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
MENCIÓN ECOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES**

**AUTOR**

Br. AMANDA OLARTE PEREZ

**ASESOR:**

Mg. GUIDO VICENTE HUAMAN MIRANDA  
CODIGO ORCID: 0000-0002-9992-8065

**CUSCO-PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:.....

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL DIÓXIDO DE NITRÓGENO MEDIANTE UN ANALIZADOR AUTOMÁTICO EN PUNTOS ESTRATÉGICOS DEL TRÁNSITO VEHICULAR EN LA CIUDAD DELCUSCO

presentado por: AMANDA OLARTE PEREZ con DNI Nro.: 23857726 presentado por:..... con DNI Nro.:..... para optar el

título profesional/grado académico de MAESTRO EN CIENCIAS MENCION ECOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de (ochos) 8%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 21 de NOVIEMBRE de 2024.....

  
Firma

Post firma: GUIDO VICENTE HUAMAN MIRANDA

Nro. de DNI: 31044739

ORCID del Asesor: 0000-0002-9992-8065

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:407648143

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN D  
EL DIÓXIDO DE NITRÓGENO MEDIANTE  
UN ANALIZADOR AUTOMÁTICO EN PUN  
TOS**

AUTOR

**AMANDA OLARTE PEREZ**

RECUENTO DE PALABRAS

**32386 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**175165 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**134 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.4MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 20, 2024 4:21 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 20, 2024 4:23 PM GMT-5**

### ● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA DE POSGRADO

INFORME DE LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES A TESIS

Dra. NELLY AYDE CAVERO TORRE, Directora (e) General de la Escuela de Posgrado, nos dirigimos a usted en condición de integrantes del jurado evaluador de la tesis intitulada "EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL DIÓXIDO DE NITRÓGENO MEDIANTE UN ANALIZADOR AUTOMÁTICO EN PUNTOS ESTRATÉGICOS DEL TRÁNSITO VEHICULAR EN LA CIUDAD DEL CUSCO", de la Br. Br AMANDA OLARTE PEREZ. Hacemos de su conocimiento que el (la) sustentante ha cumplido con el levantamiento de las observaciones realizadas por el Jurado el día CINCO DE NOVIEMBRE DE 2024.

Es todo cuanto informamos a usted fin de que se prosiga con los trámites para el otorgamiento del grado académico de MAESTRO EN CIENCIAS MENCIÓN ECOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES.

Cusco, 18 de Noviembre del 2024

MGT. CARMEN SONIA ALOSILLA ROBLES  
Primer Replicante

MGT. ADRIANA ZEGARRA TUPAYACHI  
Segundo Replicante

DRA. VERÓNICA ISELA VERA MARMÁNILLO  
Primer Dictaminante

DR. PERCY TACO PALMA  
Segundo Dictaminante

## DEDICATORIA

A mis amados hijos Bruce, Greg y Amanda cuyo apoyo constante han sido fuerza impulsora en cada momento.

A Julio por su apoyo y cariño de siempre

A mis queridos hermanos Ruth, Danton y Ronald por brindarme su eterno amor, aliento y consejos.

A mamá Juanita, papá Juan, Yony y Ricardo que son mis ángeles de guía.

**Br. Amanda Olarte Pérez**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por regalarme cada día de la vida y permitirme llegar a culminar mi objetivo

Mi sincera gratitud a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por ser la casa de estudios que me acogió en sus aulas

A la Escuela de Post Grado, en cuyas aulas he tenido la oportunidad de conocer a muy buenos docentes

Al Mg. Guido Vicente Huamán Miranda, por aceptar ser mi asesor y motivarme y darme ánimo en todo momento para lograr realizar mi trabajo de tesis.

A Julio Warthon por su apoyo constante e impulso para lograr finalizar mis propósitos.

A Ariatna Zamalloa por el apoyo continuo y amistad.

Al Centro de Investigación de Energía y Atmosfera de la UNSAAC por el apoyo prestado durante la parte experimental.

A mis colegas y amigas Julieta Valencia Farfan, Alicia Claveri Jarandilla y Salinova Carrillo Segura por brindarme su amistad y apoyo continua para la realización de este trabajo.

**Br. Amanda Olarte Pérez**

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
ÍNDICE GENERAL .....	4
LISTA DE CUADROS .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS .....	11
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCION .....	14
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.1. Situación problemática .....	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.2.1. Problema general .....	16
1.2.2. Problemas específicos.....	16
1.3. Justificación de la Investigación.....	16
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo general.....	17
1.4.2. Objetivos específicos .....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	18
2.1. Bases teóricas .....	18
2.1.1. Contaminación Atmosférica .....	18
2.1.2. La Contaminación del Aire: Un Proceso Físico Químico .....	18
2.1.3. Contaminación Atmosférica Debido al Transporte Automotor .....	19

2.2. Marco conceptual.....	20
2.2.1 Nitrógeno .....	20
2.2.2. Ciclo del nitrógeno .....	21
2.2.3. Fijación del nitrógeno atmosférico .....	22
2.2.4. Fuentes de Nitrógeno Atmosférico. ....	23
2.2.5. Óxidos de Nitrógeno.....	24
2.2.6. Oxidación atmosférica .....	26
2.2.7. Dióxido de Nitrógeno .....	27
2.2.8. Contaminación Atmosférica por NO <sub>2</sub> .....	28
2.2.9. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Aire para NO <sub>2</sub> .....	29
2.3. Antecedentes de la investigación .....	30
2.3.1. A nivel Internacional.....	30
2.3.2. A nivel Regional .....	33
2.3.3. A nivel Local.....	34
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	37
3.1. Hipótesis de investigación .....	37
a. Hipótesis general.....	37
3.2. Identificación de variables e indicadores.....	37
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA .....	39
4.1. Ámbito de Estudio .....	39
4.1.1. Localización Política .....	39
4.1.2. Localización Geográfica .....	40
4.2. Alcance de investigación .....	43
4.3. Tipo y Nivel de Investigación.....	43
4.4. Unidad de Análisis.....	44
4.5. Población de Estudio .....	44

4.6. Tamaño de Muestra.....	45
4.7. Técnicas de muestreo.....	47
4.8. Técnicas de recolección de información.....	47
4.8.1. Shelter de Monitoreo Ambiental.....	48
4.8.2. Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40.....	50
4.9. Técnicas de análisis e interpretación de la información .....	52
4.10. Técnicas estadísticas .....	52
4.11. Recolección de datos de NO <sub>2</sub> .....	53
4.12. Procesamiento de datos de NO <sub>2</sub> .....	54
4.13. Análisis de datos .....	56
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
5.1. Presentación e interpretación de resultados .....	58
5.1.1. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Wanchaq - Centro de Salud – 2016 .....	58
5.1.2. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plaza de Armas – 2016	60
5.1.3. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastian - Plaza de Armas – 2016 .....	62
5.1.4. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastian - Octavo Paradero (Av. De la Cultura) – 2016.....	64
5.1.5. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en UNSAAC - Puerta 6 (Av. Universitaria) – 2016.....	66
5.1.6. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plaza San Francisco (Frontis del Colegio Ciencias) – 2018.....	68
5.1.7. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - San Blas – 2018.....	70
5.1.8. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plazoleta Limacpampa – 2018 .....	72

5.1.9. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plazoleta Pumaqchupan – 2018 .....	74
5.1.10. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco – Calle Matara – 2018.	76
5.1.11. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en Santiago - Centro de Salud, Belenpampa (CLAS) – 2018 .....	78
5.1.12. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastián - Centro de Salud – 2018 .....	80
5.1.13. Concentración de NO <sub>2</sub> en función del tiempo en San Jeronimo - CLAS San Jeronimo – 2018 .....	83
5.1.14. Resultados de promedios de NO <sub>2</sub> por puntos de monitoreo a través de diferentes años.....	85
5.2. Discusión de resultados .....	87
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFIA .....	92
ANEXOS .....	105

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Concentración de NO en función de la temperatura y el tiempo de formación.....	25
Tabla 2. Estándar de Calidad Ambiental y Directrices mundiales sobre la calidad del aire en función a cada institución y tiempo promedio de medida .....	30
Tabla 3. Operacionalización de las variables: nivel de conciencia ambiental y hábitos de consumo.....	38
Tabla 4. Puntos de monitoreo con sus respectivas coordenadas.....	40
Tabla 5. Recomendaciones de número mínimo de estaciones.....	46
Tabla 6. Requisitos de frecuencia y periodos de monitoreo para redes vinculadas a planes de acción.....	46
Tabla 7. Promedio general por punto de monitoreo de NO <sub>2</sub> .....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ciclo del Nitrógeno</i> .....	22
Figura 2. <i>Ciclo fotolítico de los NO<sub>x</sub></i> .....	26
Figura 3. <i>Ubicación de la ciudad del Cusco</i> .....	39
Figura 4. <i>Distribución Geográfica de los puntos de monitoreo</i> .....	41
Figura 5. <i>Población afectada directamente por los contaminantes emitidos por los vehículos.</i> .....	45
Figura 6. <i>Shelter de Monitoreo Ambiental - UNSAAC</i> .....	48
Figura 7. <i>Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40</i> .....	50
Figura 8. <i>Procesamiento de Datos</i> .....	55
Figura 9. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - WANCHAQ - CENTRO DE SALUD)</i> .....	58
Figura 10. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 25-05-2016</i> .....	59
Figura 11. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - CUSCO - PLAZA DE ARMAS)</i> .....	60
Figura 12. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 08-09-2016</i> .....	61
Figura 13. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - SAN SEBASTIAN - PLAZA DE ARMAS)</i> .....	62
Figura 14. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 10-11-2016</i> .....	63
Figura 15. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - SAN SEBASTIAN - OCTAVO PARADERO)</i> .....	64
Figura 16. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 21-11-2016</i> .....	65
Figura 17. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - UNSAAC - PUERTA 6 (AV. UNIVERSITARIA))</i> .....	66
Figura 18. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 03-12-2016</i> .....	67
Figura 19. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZA SAN FRANCISCO (frontis del colegio Ciencias))</i> .....	68
Figura 20. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 22-02-2018</i> .....	69
Figura 21. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZOLETA DE SAN BLAS)</i> .....	70
Figura 22. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 10-03-2018</i> .....	71
Figura 23. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZA LIMACPAMPA)</i> .....	72
Figura 24. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 26-03-2018</i> .....	73

Figura 25. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZOLETA PUMAQCHUPAN)</i> .....	74
Figura 26. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 06-04-2018</i> .....	75
Figura 27. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - CALLE MATARA)</i> .....	76
Figura 28. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 20-04-2018</i> .....	77
Figura 29. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - SANTIAGO - CENTRO DE SALUD BELENPAMPA)</i> .....	78
Figura 30. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 26-05-2018</i> .....	79
Figura 31. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - SAN SEBASTIAN - CENTRO DE SALUD DE SAN SEBASTIAN)</i> .....	81
Figura 32. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 22-06-2018</i> .....	82
Figura 33. <i>Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - SAN JERONIMO - CENTRO DE SALUD DE SAN JERONIMO)</i> .....	83
Figura 34. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 30-06-2018</i> .....	84
Figura 35. <i>Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por cada punto de monitoreo</i> .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

- OMS : Organización Mundial de la Salud
- MINAM: Ministerio del Ambiente del Perú
- OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.
- INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- UNSAAC: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
- MINSA: Ministerio de Salud.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- NO<sub>2</sub>: Dióxido de Nitrógeno.
- µg/m<sup>3</sup>: microgramos por metro cúbico.
- PM<sub>2.5</sub>: Material particulado en suspensión de 2.5 micrómetros o menos.
- PM<sub>10</sub>: Material particulado en suspensión de 10 micrómetros o menos.
- CO: Monóxido de Carbono.
- SO<sub>2</sub>: Dióxido de Azufre.
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono.
- O<sub>3</sub>: Ozono troposférico.
- NO<sub>x</sub>: Óxidos de Nitrógeno.
- SO<sub>x</sub>: Óxidos de Azufre.
- O<sub>2</sub>: Oxígeno molecular
- ECA: Estándares de Calidad Ambiental
- DCA: Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire

## RESUMEN

La investigación evaluó las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en 13 puntos estratégicos con flujos vehiculares diferenciados dentro de la cuenca atmosférica de la ciudad del Cusco durante el período 2016-2018. La metodología empleada incluyó un riguroso monitoreo in-situ mediante un analizador automático de NO<sub>2</sub> basado en la técnica de quimioluminiscencia de la marca ECOTECH con certificación EPA. Los datos recopilados fueron sometidos a una comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por la legislación nacional peruana y con las Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire (DCA). Los resultados revelaron una marcada heterogeneidad espacio-temporal en los niveles de NO<sub>2</sub>, evidenciando que varios puntos de monitoreo dentro de la cuenca atmosférica del Cusco superaron de manera persistente los ECA establecidos, destacando especialmente puntos con un alto flujo vehicular. Además, se pudo constatar que más del 80% de los puntos monitoreados excedieron el valor guía diario de 25 µg/m<sup>3</sup> establecido en las DCA-OMS (2021), lo cual resulta excesivo, ya que incluso aquellos puntos que cumplían con los promedios anuales mostraron episodios de concentraciones diarias que superaban los límites recomendados. Los resultados de esta evaluación proporcionan una base científica sólida, siendo una de las primeras investigaciones en la región que utiliza un analizador automático certificado por la EPA, estableciendo así un precedente metodológico importante y abriendo camino para futuras investigaciones que contribuyan al desarrollo de estrategias efectivas para el control y mitigación de la contaminación por NO<sub>2</sub> en la ciudad del Cusco.

**Palabras clave:** Dióxido de nitrógeno, Contaminación atmosférica, Calidad del aire, Tránsito vehicular.

## ABSTRACT

The research evaluated nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations at 13 strategic points with differentiated vehicular flows within the Cusco atmospheric basin from 2016 to 2018. The methodology included rigorous on-site monitoring using an automatic NO<sub>2</sub> analyzer based on the ECOTECH brand chemiluminescence technique with EPA certification. The data collected were subjected to a comparison with the Environmental Quality Standards (AQS) established by Peruvian national legislation and with the WHO Global Air Quality Guidelines (AQG). The results revealed marked spatiotemporal heterogeneity in NO<sub>2</sub> levels, showing that several monitoring points within the Cusco atmospheric basin persistently exceeded the established AQS, especially with high vehicular flow. Furthermore, it was found that more than 80% of the monitored points exceeded the daily guideline value of 25 µg/m<sup>3</sup> established in the WHO-AQG (2021), which is excessive since even those points that complied with the annual averages showed episodes of daily concentrations that exceeded the recommended limits. The results of this evaluation provide a solid scientific basis, being one of the first investigations in the region that uses an automatic analyzer certified by the EPA, thus establishing an important methodological precedent and paving the way for future research that contributes to the development of effective strategies for the control and mitigation of NO<sub>2</sub> pollution in the city of Cusco.

**Keywords:** Nitrogen dioxide, Air pollution, Air quality, Vehicular traffic.

## INTRODUCCION

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es un contaminante atmosférico que, además de contribuir al calentamiento global como gas de efecto invernadero, representa un riesgo significativo para la salud pública (Kox y Jetten, 2015). La exposición a este contaminante es particularmente preocupante en zonas urbanas con alta densidad poblacional, especialmente en áreas de gran concurrencia como centros educativos y hospitales, donde los transeúntes están expuestos a niveles variables de  $\text{NO}_2$  durante sus actividades diarias (B. Warthon et al., 2024; J. Warthon et al., 2024).

La contaminación del aire en la ciudad del Cusco se ha incrementado notablemente en las últimas décadas; en las primeras horas de cada día se observa una nube de gases contaminantes en la zona sur - este de la ciudad que abarca los distritos de San Jerónimo y San Sebastián. Las principales fuentes de emisiones de contaminantes atmosféricos corresponden a las fuentes antropogénicas (PRAL, 2006), la masa de los contaminantes se difunde por la cuenca atmosférica de la ciudad del Cusco en el transcurso del día.

El transporte automotor constituye una de las fuentes más significativas de emisión de gases de efecto invernadero y material particulado en la atmósfera. Según los reportes de la SUNARP (2021), el parque automotor en la ciudad del Cusco ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, alcanzando aproximadamente cien mil vehículos en funcionamiento. Las emisiones de  $\text{NO}_2$  se intensifican durante el día debido a las actividades socioeconómicas, generando una exposición variable de este contaminante en diferentes puntos estratégicos de la ciudad.

La evaluación de la calidad del aire en la ciudad del Cusco se ha realizado de manera esporádica en las dos últimas décadas, careciendo de mediciones sistemáticas y continuas que permitan comprender la dinámica de la contaminación por  $\text{NO}_2$ . Esta falta de información científica sobre los niveles de este contaminante en puntos estratégicos de alto y bajo flujo vehicular ha generado un vacío en el conocimiento necesario para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental urbana.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la concentración del dióxido de nitrógeno mediante un analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco durante el período 2016-2018.

# CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Situación problemática

El crecimiento acelerado del parque automotor a nivel mundial representa uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos, generando volúmenes cada vez mayores de emisiones de gases contaminantes que impactan directamente en la salud de la población, manifestándose en problemas respiratorios y pulmonares.

Este fenómeno se evidencia claramente en grandes urbes latinoamericanas. En la Ciudad de México, por ejemplo, el parque automotor ha experimentado un aumento del 62,53% entre 2010 y 2019, con una tasa de crecimiento promedio anual del 6,25%. Las proyecciones hacia el año 2050 son aún más preocupantes, anticipando un incremento sustancial de 25,6 millones a 151,7 millones de vehículos en circulación. Este crecimiento exponencial del parque automotor implica un aumento proporcional en las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), siendo el sector transporte responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones totales de gases contaminantes (Pérez et al., 2021).

En el contexto peruano, la situación es igualmente preocupante. Estudios recientes en la ciudad de Lima Perú (Tapia et al., 2018), ha registrado niveles significativos de NO<sub>2</sub> asociados al tránsito vehicular, requiriendo evaluaciones constantes basadas en los Estándares de Calidad Ambiental Nacional (ECA) establecidos por el MINAM y las directrices de la OMS.

En la ciudad del Cusco, el problema se agudiza debido al desconocimiento de los niveles de concentración de NO<sub>2</sub> en las inmediaciones de tránsito vehicular durante el período 2016-2018. La escasez de información científica y la falta de investigaciones de alto impacto sobre este contaminante específico han creado un vacío significativo en el conocimiento. Si bien el Centro de Investigación de Energía y Atmósfera de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco realiza mediciones de Gases de Efecto Invernadero y material particulado, aún no se cuenta con una evaluación exhaustiva de estos parámetros desde la perspectiva química, específicamente en lo que respecta a las concentraciones de NO<sub>2</sub> asociadas al creciente parque automotor de la ciudad.

La evaluación de los niveles de NO<sub>2</sub> en puntos estratégicos de tránsito vehicular en Cusco constituye una necesidad prioritaria para comprender el impacto real de la contaminación atmosférica en la salud pública y el ambiente, especialmente considerando el

crecimiento sostenido del parque automotor en la región y su contribución a la emisión de este contaminante.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cuál es el nivel de la concentración del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco entre los años 2016, 2017 y 2018?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿De qué manera varía la concentración de dióxido de nitrógeno respecto del tiempo en los puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco entre los años 2016, 2017 y 2018?
- ¿Cuál es el promedio de la concentración de dióxido de nitrógeno en los puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco entre los años 2016, 2017 y 2018?
- ¿Cuáles son los valores mínimos y máximos de la concentración de dióxido de nitrógeno en los puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco entre los años 2016, 2017 y 2018?

## **1.3. Justificación de la Investigación**

El incremento del flujo vehicular y la contaminación del aire se han intensificado considerablemente en la ciudad del Cusco, siguiendo una tendencia global observada en las principales urbes del mundo. Las emisiones de gases contaminantes y material particulado hacia la atmósfera, generados principalmente por los vehículos automotores y la actividad industrial (Johansson, 2016), contribuyen significativamente al calentamiento global, provocan afecciones a la salud pública y alteran los ecosistemas (Malina y Scheffler, 2015).

La evaluación de la calidad del aire en la ciudad del Cusco ha sido históricamente limitada, con mediciones esporádicas durante las últimas dos décadas por parte de instituciones gubernamentales y no gubernamentales. Esta discontinuidad en el monitoreo ha generado un vacío significativo en la comprensión de los niveles reales de contaminación atmosférica en la ciudad, particularmente en lo referente a las concentraciones de NO<sub>2</sub> en puntos estratégicos del tránsito vehicular (Vîrghileanu et al., 2020).

La presente investigación se justifica por su contribución al conocimiento científico sobre la dinámica del NO<sub>2</sub> en el ambiente urbano del Cusco, proporcionando datos cruciales

sobre las concentraciones de este contaminante en puntos estratégicos con diferentes intensidades de tráfico vehicular. Esta información es fundamental para establecer una línea base científica que permita evaluar tendencias de contaminación, apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental urbana, proteger la salud pública mediante la identificación de zonas de riesgo, y facilitar el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación basadas en evidencia científica.

Los resultados de esta investigación constituirán un precedente importante para estudios posteriores y servirán como referencia científica para abordar la problemática de la contaminación por NO<sub>2</sub> en el contexto urbano del Cusco, contribuyendo así al desarrollo de soluciones efectivas para la mejora de la calidad del aire en la ciudad, estableciendo además un marco metodológico robusto para futuras investigaciones sobre calidad del aire en la región.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

- Evaluar la concentración del dióxido de nitrógeno mediante un analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar la concentración de dióxido de nitrógeno mediante mediciones instantáneas con un analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco.
- Obtener los valores promedios de la concentración de dióxido de nitrógeno en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco.
- Determinar los valores mínimos y máximos de la concentración de dióxido de nitrógeno mediante un analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

### 2.1. Bases teóricas

#### 2.1.1. Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema significativo que afecta tanto a los seres humanos como al ambiente. Se refiere a la presencia de sustancias y partículas en el aire que no se encuentran en su estado natural y que pueden tener efectos negativos en la salud humana y en la calidad del aire que respiramos. Estos contaminantes pueden provenir tanto de fuentes naturales, como, por ejemplo, los incendios forestales y las actividades volcánicas, como de fuentes antropogénicas, es decir, generadas por la actividad humana (Ruiz Vicente, 2020). Estas actividades liberan una variedad de contaminantes a la atmósfera, incluyendo óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), partículas finas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles (COV). Cada uno de estos contaminantes puede tener efectos adversos en la salud respiratoria, cardiovascular y neurológica de las personas (Palacios Anzules & Moreno Castro, 2022).

Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno, como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), son emitidos principalmente por vehículos y fuentes industriales. Estos contaminantes contribuyen a la formación de smog fotoquímico, que afecta negativamente la calidad del aire y puede agravar problemas respiratorios como el asma (Vela Flores & Susana Liliam, 2023). Las partículas finas, que son pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, también son un grave problema para la salud pública, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y el torrente sanguíneo, causando una variedad de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Sukumaran et al., 2023).

#### 2.1.2. La Contaminación del Aire: Un Proceso Físico Químico

La polución atmosférica es un evento de naturaleza intrincada y de múltiples dimensiones que comprende fenómenos tanto físicos como químicos, los cuales influyen en la estructura de la atmósfera. Esta situación se relaciona con la existencia en el aire de compuestos perjudiciales en proporciones mayores a las habituales en el entorno natural, lo que potencialmente conlleva impactos desfavorables en la salud de las personas, en el ecosistema y en el equilibrio climático (Miller, 2022).

Este proceso físico-químico comienza con la emisión de contaminantes al aire, que provienen de diversas fuentes antropogénicas (generadas por actividades humanas) y naturales.

Las fuentes antropogénicas incluyen la combustión de combustibles fósiles en vehículos, plantas de energía y procesos industriales, así como actividades agrícolas, entre otras. Las fuentes naturales pueden incluir emisiones de volcanes y partículas de polvo, entre otros. (Lestari et al., 2022; Olson et al., 2021).

Una vez que los contaminantes son liberados al aire, comienzan a interactuar con la atmósfera a través de procesos físicos y químicos. Algunos de estos procesos incluyen:

#### **2.1.2.1. Deposición Atmosférica**

Parte de los contaminantes puede depositarse en la superficie terrestre a través de la lluvia ácida y la deposición seca. La lluvia ácida se forma cuando los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) se combinan con el agua en la atmósfera y caen a la tierra con la lluvia. (Ding et al., 2023)

#### **2.1.2.2. Difusión y Transporte**

Los elementos contaminantes se dispersan y trasladan a extensas distancias debido a los comportamientos del viento y las circunstancias atmosféricas. (Michaelides et al., 2018; L. Shao et al., 2022). Como consecuencia, es posible que zonas distantes de los puntos emisores también se vean afectadas por la polución atmosférica.

#### **2.1.2.3. Formación de Partículas**

Algunos contaminantes pueden condensarse y formar partículas sólidas o líquidas en el aire, como las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) que son especialmente preocupantes debido a su capacidad para penetrar profundamente en los pulmones (Yu et al., 2023).

#### **2.1.3. Contaminación Atmosférica Debido al Transporte Automotor**

La emisión de contaminantes atmosféricos derivados del transporte automotor se refiere a la liberación de una variedad de sustancias nocivas en la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles en los motores de combustión interna presentes en los vehículos. Esta fuente de polución tiene una importancia especialmente notable en áreas urbanas y en lugares con una elevada densidad de vehículos en circulación. (Y.-C. Lin et al., 2020)

Los automóviles, camiones y motocicletas, como ejemplos de vehículos a motor, emiten diversos contaminantes atmosféricos durante el proceso de combustión. Entre las sustancias más significativas se incluyen los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), las partículas ultrafinas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). (Dos Santos et al., 2021; X. Wu et al., 2023)

La formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) tiene lugar debido a la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire en condiciones de alta temperatura dentro del motor durante el proceso de combustión. Estos compuestos contribuyen significativamente a la producción de ozono troposférico y smog fotoquímico a nivel del suelo. (Blanco-Ward et al., 2021) Tanto el ozono como el smog fotoquímico pueden tener impactos negativos en la salud humana, ocasionando problemas respiratorios y cardiovasculares, además de ser perjudiciales para la vegetación y otros componentes del entorno. (P. Shao et al., 2020)

Otro resultado importante de la combustión de combustibles en los vehículos es la generación de partículas ultrafinas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>). Estas partículas surgen no solo como resultado de la quema de combustible, sino también debido al desgaste de neumáticos y frenos, así como a la interacción entre los vehículos y las carreteras (Martins & Carrilho Da Graça, 2018; Pio et al., 2020). Las partículas ultrafinas son particularmente preocupantes debido a su tamaño diminuto, lo que les permite penetrar profundamente en los pulmones al ser inhaladas. Esto puede dar lugar a trastornos respiratorios, empeorar condiciones médicas ya existentes y contribuir a problemas cardiovasculares (Mears et al., 2022).

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1 Nitrógeno**

El nitrógeno es un elemento químico (Camarero, 2017; Herrero et al., 2019). Su símbolo químico es "N" y su número atómico es 7, lo que lo convierte en uno de los elementos más abundantes en nuestro planeta. (Chang, 2003; Kox y Jetten, 2015).

El nitrógeno es un elemento químico de vital importancia para la vida en la Tierra y desempeña un papel fundamental en la composición de la atmósfera y en los ciclos biogeoquímicos (Gines, 2003).

En la naturaleza, el nitrógeno se presenta principalmente en forma gaseosa, formando parte del aire que respiramos (L. Li et al., 2021). Representa aproximadamente el 78% de la atmósfera terrestre, pero a pesar de su abundancia, se encuentra en una forma molecular inerte y no puede ser utilizado directamente por la mayoría de los organismos vivos. Para que las plantas y otros seres vivos puedan aprovechar el nitrógeno, este debe ser transformado en compuestos químicos más reactivos y asimilables, como los nitratos y las amidas (Stulen et al., 1998).

La comprensión del ciclo del nitrógeno es esencial para evaluar cómo las actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles y la agricultura intensiva, han perturbado este ciclo natural, llevando a la acumulación de óxidos de nitrógeno en la atmósfera y la contaminación del aire (Pereira et al., 2023).

### **2.2.2. Ciclo del nitrógeno**

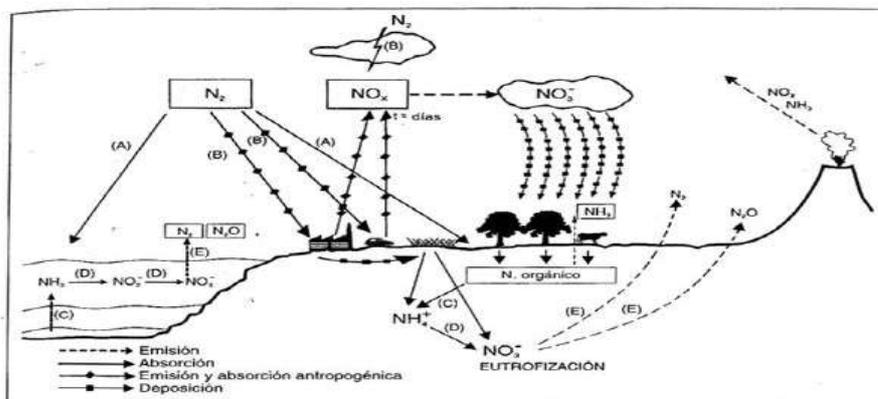
El ciclo del nitrógeno es un proceso biogeoquímico complejo que implica una serie de transformaciones y disponibilidad del nitrógeno en diferentes formas dentro del ambiente. Se caracteriza por ser un ciclo típicamente gaseoso, siendo la atmósfera el principal depósito de este elemento en forma de nitrógeno molecular, que es, en principio, un gas altamente estable. Además, las reservas naturales más importantes de nitrógeno incluyen la atmósfera (nitrógeno molecular y otros gases nitrogenados), los suelos (sales) y materia viva (proteínas vegetales y animales) y los océanos (Chen et al., 2021; Coppiarolo et al., 2022).

Los procesos esenciales que componen el ciclo del nitrógeno se pueden dividir en cinco etapas principales: fijación, absorción, asimilación, amonificación y desnitrificación (Nugroho & Kuwatsuka, 1992; Vourtsi Cordova, 2021).

En el proceso de fijación, el nitrógeno atmosférico se convierte en formas utilizables por los organismos gracias a bacterias, hongos y microorganismos específicos. Los organismos, a su vez, utilizan el nitrógeno fijado para sintetizar proteínas y otros compuestos nitrogenados esenciales para su crecimiento y desarrollo (Palma Ramírez, 2022).

A medida que los organismos mueren o producen residuos, el nitrógeno es liberado nuevamente al suelo y el agua a través de la descomposición bacteriana en el proceso de amonificación. Además, existen procesos de desnitrificación que devuelven el nitrógeno gaseoso a la atmósfera, cerrando así el ciclo (Reeve et al., 2019).

**Figura 1.**  
*Ciclo del Nitrógeno*



Nota: Saiz y González (2016)

### 2.2.3. Fijación del nitrógeno atmosférico

La fijación del nitrógeno atmosférico es el proceso mediante el cual el nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) presente en la atmósfera se convierte en compuestos nitrogenados más utilizables, como el amonio ( $NH_4^+$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ), que pueden ser asimilados por los organismos vivos. Este proceso es esencial para la síntesis de proteínas y otros compuestos nitrogenados necesarios para el crecimiento y desarrollo de plantas y animales (Guzmán Duchén et al., 2021).

Los procesos fundamentales de fijación del nitrógeno atmosférico, intrínsecos al ciclo, abarcan tanto mecanismos biológicos como fisicoquímicos. Estos procesos se pueden resumir de la siguiente manera:

#### 2.2.3.1. Fijación Fisicoquímica.

Existen dos tipos de fijación fisicoquímica del nitrógeno: una ocurre de forma natural en la alta atmósfera y la otra es resultado de actividades antropogénicas.

En la evolución atmosférica, la fijación fisicoquímica se da en la alta atmósfera donde el nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) es sometido a condiciones extremas, como la energía liberada por los rayos durante las tormentas eléctricas. Bajo estas condiciones, los enlaces del nitrógeno se rompen, y los átomos de nitrógeno se combinan con oxígeno ( $O_2$ ) para formar óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), como óxido de nitrógeno (I) ( $N_2O$ ), óxido de nitrógeno (II) ( $NO$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). Estos óxidos de nitrógeno pueden ser transportados a la superficie terrestre a través de la lluvia y contribuir a la fertilización natural de los suelos y la disponibilidad de

nitrógeno para los ecosistemas (Hastings et al., 2003), como se muestra en el proceso b de la figura 1.

Por otro lado, también existen actividades antropogénicas que generan fijación fisicoquímica del nitrógeno. Entre ellas se encuentran las descargas eléctricas artificiales, como las producidas durante procesos de combustión a altas temperaturas, donde el nitrógeno gaseoso se combina con oxígeno para formar óxidos de nitrógeno (NOx). Además, la fijación fisicoquímica industrial también juega un papel relevante, como en la fabricación de amoníaco y abonos.

Estos procesos de fijación fisicoquímica, tanto naturales como antropogénicos, contribuyen a la disponibilidad de nitrógeno en el ambiente y afectan la calidad del aire y la fertilidad del suelo. Es importante entender y controlar estos procesos para mantener un equilibrio adecuado en el ciclo del nitrógeno y minimizar sus impactos ambientales (Graciani Alvarez et al., 2020).

#### **2.2.4. Fuentes de Nitrógeno Atmosférico.**

El nitrógeno atmosférico proviene de diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas, y su ciclo es crucial para el equilibrio del ambiente. Entre las fuentes naturales, la fijación biológica del nitrógeno desempeñada por bacterias y microorganismos en el suelo y el agua es fundamental. Además, eventos naturales como actividades volcánicas y los incendios forestales también liberan nitrógeno a la atmósfera. Sin embargo, las actividades humanas han incrementado significativamente las emisiones de nitrógeno atmosférico (Muñoz Iglesias, 2023).

Las fuentes antropogénicas incluyen la quema de combustibles fósiles en el transporte, la industria y la generación de energía, así como la agricultura intensiva y el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Estas actividades liberan óxidos de nitrógeno (NOx) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) al aire, contribuyendo a la contaminación atmosférica y sus efectos negativos en la calidad del aire y los ecosistemas (Serafini et al., 2022).

El nitrógeno atmosférico también es devuelto a la atmósfera debido a su participación en la cadena trófica y la posterior descomposición de la materia orgánica. El nitrógeno presente en las plantas es asimilado por los consumidores y, finalmente, liberado nuevamente a la atmósfera a través de la descomposición de los detritus (Van der Hoek et al., 2018).

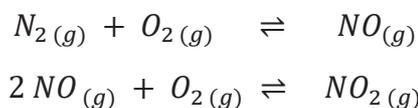
### 2.2.5. Óxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NOx) son compuestos químicos que contienen nitrógeno y oxígeno y se generan principalmente por la combustión de combustibles fósiles a altas temperaturas, como en vehículos y fuentes industriales. Los principales NOx son óxido nitrógeno (I) (N<sub>2</sub>O), óxido de nitrógeno (II) (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y trióxido de di nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Estos gases se emiten a la atmósfera y pueden causar una importante contaminación del aire, especialmente en zonas urbanas con tráfico y fuentes industriales. Los NOx son precursores del ozono troposférico y del smog, y también reaccionan con otros compuestos para formar partículas finas, lo que afecta la calidad del aire y la salud pública (Nguyen et al., 2022).

En el contexto de la contaminación atmosférica, se emplea la denominación NOx para englobar el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno. Aunque existen varios óxidos de nitrógeno posibles, solo se detectan en la atmósfera N<sub>2</sub>O, NO y NO<sub>2</sub>, ya que los demás son inestables y se disocian, conduciendo a la formación de algunos de los mencionados anteriormente. Cada uno de estos óxidos tiene características y comportamientos diferentes (Klosterköther et al., 2021).

#### 2.2.5.1. Formación de óxido de nitrógeno

La principal actividad humana responsable de la aparición de óxidos de nitrógeno (NOx) en la atmósfera es la combustión, ya sea en fuentes móviles como el transporte o en fuentes fijas. Durante la combustión, el nitrógeno presente en el aire, que se utiliza como comburente, reacciona con el oxígeno para formar óxido nitroso (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Estas reacciones ocurren principalmente a altas temperaturas, típicas de los procesos de combustión (Tortajada Pastor, 2020).



La primera reacción, que produce óxido nitroso (NO), es altamente endotérmica y solo tiene lugar en extensión apreciable a temperaturas muy elevadas, generalmente entre 1.300 y 2.500°C, como las que se generan en los procesos de combustión. A temperaturas más bajas, la formación de óxido nitroso es mínima (Mollá Robles, 2021).

Los datos de la tabla 1 proporcionan una idea de la concentración de NO en función de la temperatura y el tiempo de formación.

**Tabla 1. Concentración de NO en función de la temperatura y el tiempo de formación.**

Temperatura	[NO] en el equilibrio (mg/nm <sup>3</sup> )	Tiempo de formación (s) de 670 mg/nm <sup>3</sup> de NO
27°C	1,5-10'10	-
527°C	103	-
1.316°C	737	1.370
1.538°C	1.850	162
1.760°C	3.485	1,10
1.980°C	5.561	1,12

*Nota:* "Control Techniques for Nitrogen Oxide Emission from Stationary Sources," Departamento de Salud de los Estados Unidos.

Por otro lado, la segunda reacción que conduce a la formación de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es menos significativa en condiciones normales de combustión, ya que el NO<sub>2</sub> es inestable a altas temperaturas. A partir de 150°C, comienza a descomponerse en NO y O<sub>2</sub>, y a 600°C, esta descomposición es prácticamente completa. Además, la velocidad de esta reacción es muy lenta a temperaturas bajas. a 20°C, si la concentración de NO es alta, se necesita poco tiempo para oxidarse en un 90%, pero a concentraciones más bajas, el proceso de oxidación es extremadamente lento (Barrera González, 2020).

Sería tentador reducir las temperaturas de combustión y utilizar mezclas ricas en combustible para evitar la formación de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, esta estrategia conllevaría altos valores de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos debido a la ineficiencia de la combustión. Por lo tanto, las investigaciones se centran en operar en condiciones que minimicen la formación de CO y NO<sub>x</sub>, y se utilizan controles de temperatura de combustión para lograrlo (Restrepo Román, 2023).

#### **2.2.5.2. Ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno**

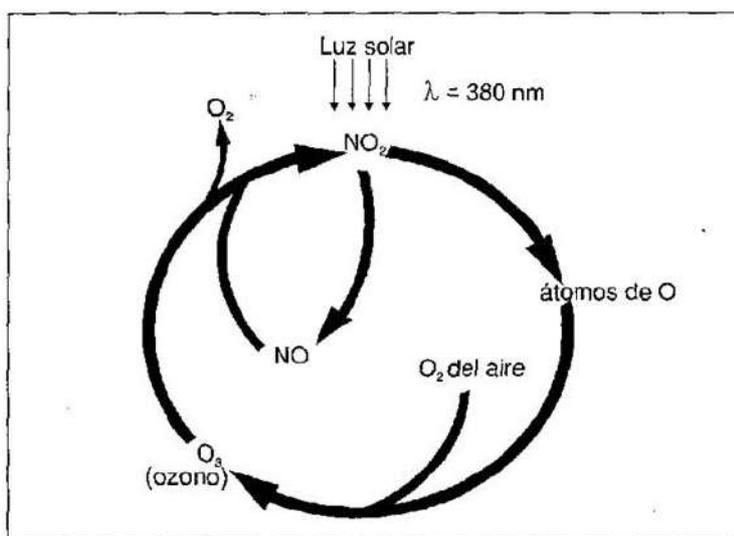
El ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno es un fenómeno esencial en la atmósfera que ocurre debido a la interacción de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) con la radiación solar. A pesar de la aparente inestabilidad del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a altas temperaturas y las bajas tasas de emisión de NO<sub>2</sub> durante la combustión, la relación entre NO<sub>2</sub> y óxido nítrico (NO) en la atmósfera es mayor de lo esperado. Esto se debe a que el NO que se libera en la atmósfera experimenta una lenta pero constante oxidación para formar NO<sub>2</sub> (Tamone, 2022).

El ciclo fotolítico comienza cuando el  $\text{NO}_2$  absorbe radiación de cierta longitud de onda de la luz solar, disociándose en  $\text{NO}$  y oxígeno atómico ( $\text{O}$ ). A continuación, el oxígeno atómico reacciona con oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) para formar ozono ( $\text{O}_3$ ), un contaminante secundario con alto poder oxidante. El ozono formado puede reaccionar nuevamente con  $\text{NO}$ , regenerando  $\text{NO}_2$  y liberando oxígeno molecular (Torrico & Gamarra, 2019).

En condiciones ideales, las concentraciones de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  se mantendrían constantes en sus valores de equilibrio debido a la tasa de emisión y la intensidad de la radiación solar. Sin embargo, la presencia de otros contaminantes en la atmósfera, como hidrocarburos, puede perturbar el ciclo y conducir a la formación de importantes contaminantes secundarios, como ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que contribuyen a la lluvia ácida y la degradación de materiales (Oquendo Contreras & Arcila Arcila, 2022).

### Figura 2.

*Ciclo fotolítico de los  $\text{NO}_x$*



*Nota:* La Docencia en Ciencias Medioambientales en la Universidad Autónoma de Madrid: Teoría y Práctica (Martin et al., 2015)

### 2.2.6. Oxidación atmosférica

La oxidación atmosférica es un proceso fundamental en la atmósfera, donde los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) juegan un papel importante. Los  $\text{NO}_x$  evolucionan a través de una serie de reacciones complejas que ocurren tanto durante el día como durante la noche. Durante el día, la química se basa principalmente en la presencia de radicales hidroxilo e hidropéroxido, que interactúan con el  $\text{NO}$  para formar ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). También se pueden formar peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en ciertas condiciones. Estas reacciones ocurren

a velocidades más bajas en comparación con el ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno, que ya hemos mencionado.

La presencia de monóxido de carbono (CO) como contaminante en atmósferas urbanas es una fuente adicional de radicales hidropéroxidos. El ácido nitroso formado puede disociarse y reiniciar la cadena de reacciones. Además, la existencia de hidrocarburos en la troposfera introduce procesos alternativos en la evolución de los óxidos de nitrógeno, lo cual será tratado posteriormente al estudiar la niebla (smog) fotoquímica (Bardet et al., 2022).

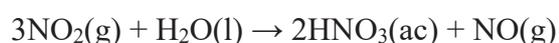
Por otro lado, la química nocturna se inicia por la presencia de un agente oxidante como el ozono, que oxida el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) hasta trióxido de di nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Este proceso ocurre en ausencia de radiación solar, ya que el N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se descompone fácilmente por la luz solar. La presencia de trióxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) durante la noche permite que reaccione con NO<sub>2</sub> para formar ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Finalmente, este ácido nítrico se combina con otras partículas presentes en la atmósfera, como metales o amoniaco, para formar nitratos que pueden ser depositados en forma de lluvia ácida o contribuir a la formación de neblinas ácidas en las primeras horas del día (Yun et al., 2018).

### 2.2.7. Dióxido de Nitrógeno

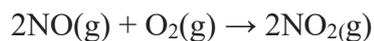
El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un gas tóxico y de color marrón rojizo que forma parte de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Es uno de los principales contaminantes atmosféricos generados por la combustión de combustibles fósiles, especialmente en el transporte y la industria (Guarnieri & Balmes, 2014; Mateos et al., 2018).

El NO<sub>2</sub> es un predecesor del ozono troposférico y de las partículas finas, lo que significa que juega un papel importante en la formación de smog fotoquímico en áreas urbanas. La exposición a altos niveles de NO<sub>2</sub> puede tener efectos negativos en la salud respiratoria y cardiovascular, especialmente en niños, ancianos y personas con afecciones médicas preexistentes. Por esta razón, la concentración de NO<sub>2</sub> en áreas urbanas con tráfico vehicular intenso se monitorea de cerca como un indicador importante de la calidad del aire (Hernández Cerda et al., 2022).

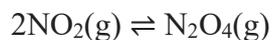
El NO<sub>2</sub> también es relevante en el contexto de la formación de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) mediante reacciones químicas (García et al., 2023).



El óxido nitroso (NO) se oxida y se convierte en dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) cuando se expone al aire:



por otra parte, el NO y el NO<sub>2</sub> tienen implicaciones adicionales en la química atmosférica. Como, el NO<sub>2</sub> se encuentra en equilibrio con el dímero N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:



Donde:  $\Delta H^\circ = -58 \text{ kJ}$

El NO<sub>2</sub> y NO también pueden reaccionar con otros compuestos, como el cloro (Cl<sub>2</sub>) y el oxígeno (O<sub>2</sub>), para formar diferentes productos. La formación de ácido nítrico y otros óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) contribuye a la formación de neblina fotoquímica o smog en grandes ciudades. (Qi et al., 2020)

### 2.2.8. Contaminación Atmosférica por NO<sub>2</sub>

La contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un problema de gran preocupación en áreas urbanas con alta densidad de tráfico vehicular y actividad industrial. El NO<sub>2</sub> es un gas tóxico y peligroso que surge principalmente como resultado de la combustión de combustibles fósiles en los motores de vehículos y diversos procesos industriales. (Nimbalkar et al., 2023). Una vez liberado a la atmósfera, el NO<sub>2</sub> puede desencadenar una serie de reacciones químicas y reacciones fotoquímicas que tienen un impacto significativo en la calidad del aire y la salud pública (Roohi y Rostami, 2020).

Una de las consecuencias más notables de la presencia de NO<sub>2</sub> en la atmósfera es su papel en la formación de ozono troposférico. Cuando el NO<sub>2</sub> reacciona con compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar, se produce ozono (O<sub>3</sub>) (Xi et al., 2023; Xu et al., 2019). Aunque el ozono en la estratosfera es beneficioso al proteger la Tierra de la radiación ultravioleta, el ozono troposférico es perjudicial. Este tipo de ozono es un componente del smog, y altas concentraciones de este pueden tener efectos graves en la salud humana y el ambiente (Zhang et al., 2023)

Además, el NO<sub>2</sub> también contribuye a la formación de partículas finas o material particulado (PM) en la atmósfera. Estas partículas pueden ser transportadas por el viento y, cuando son inhaladas, pueden penetrar profundamente en los pulmones, lo que resulta en problemas respiratorios y afecciones pulmonares crónicas. Las partículas finas también están asociadas con problemas cardiovasculares y otros problemas de salud, lo que hace que la contaminación atmosférica por NO<sub>2</sub> sea una seria preocupación para la salud pública (S. Lin et al., 2022).

Los grupos más vulnerables a los efectos nocivos del NO<sub>2</sub> son los niños, los ancianos y las personas que ya padecen enfermedades respiratorias o cardiovasculares preexistentes. La exposición prolongada a niveles elevados de NO<sub>2</sub> puede agravar los síntomas de asma, bronquitis crónica y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), así como aumentar el riesgo de ataques cardíacos y problemas circulatorios. (Linares et al., 2020).

### **2.2.9. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Aire para NO<sub>2</sub>**

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) representa una pauta científica y normativa establecida por entidades ambientales a nivel nacional, mientras que a nivel internacional la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece Directrices sobre la calidad del aire (DCA) para limitar la concentración máxima permisible de este contaminante en la atmósfera. El NO<sub>2</sub>, un gas tóxico y oxidante, tiene su origen principal en las emisiones vehiculares y fuentes industriales que involucran procesos de combustión a altas temperaturas (Y. Wu et al., 2018).

La misión fundamental de los ECA y DCA es proteger tanto la salud humana como el ambiente, estableciendo niveles seguros de NO<sub>2</sub> en el aire que no conlleven riesgos sustanciales para la población y los ecosistemas expuestos. La determinación de estos valores involucra un análisis exhaustivo de investigaciones científicas y datos epidemiológicos, permitiendo la identificación de los efectos adversos para la salud asociados con distintos niveles de exposición a este contaminante.

La fijación de los ECA y DCA para NO<sub>2</sub> implica un escrutinio meticuloso de los riesgos potenciales y los límites de exposición aceptables (Shoari et al., 2022). Estos valores se expresan en unidades de concentración, como microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) o partes por millón (ppm), y se establecen para diversos intervalos temporales, como promedios horarios, diarios o anuales (B. Zhu et al., 2019).

Las Directrices de la OMS sobre la calidad del aire fueron establecidas inicialmente en 2006 y posteriormente actualizadas en 2021, mientras que a nivel nacional, el MINAM estableció los ECA en 2017. Como se muestra en la tabla 2, tanto los estándares nacionales como las directrices internacionales sirven como una base completa para la evaluación de contaminantes ambientales.

En Perú, la problemática de la contaminación atmosférica, particularmente la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en áreas cercanas a zonas de tránsito vehicular, ha sido objeto de atención y acción por parte de las autoridades ambientales. Para abordar esta

preocupación, se promulgó la Ley N° 28611 (*Ley General del Ambiente*, 2005), estableciendo principios fundamentales para la conservación, protección y recuperación del entorno. Esta ley ha sentado las bases legales para la gestión ambiental en el país.

Las normativas ambientales en Perú se han establecido a través de los Estándares de Calidad Ambiental, con el propósito de establecer marcos legales coherentes para los gases de efecto invernadero. Un ejemplo reciente es el D.S. No 003-2017-MINAM (*MINAM*, 2017), que establece parámetros específicos para los límites máximos permisibles de NO<sub>2</sub>. Según esta resolución, durante cada hora de monitoreo, la concentración de NO<sub>2</sub> no debe superar los 200 µg/m<sup>3</sup>. Asimismo, para cada año de monitoreo, el promedio aritmético anual no debe exceder los 100 µg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 2. Estándar de Calidad Ambiental y Directrices mundiales sobre la calidad del aire en función a cada institución y tiempo promedio de medida**

INSTITUCIÓN	ESTÁNDAR/ DIRECTRIZ	TIEMPO PROMEDIO	Estándares de Calidad Ambiental y Directrices sobre la calidad del aire para NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
MINAM (2017)	ECA	ANUAL	100
	ECA	MEDIA DE UNA HORA	200
OMS (2006)	DCA	ANUAL	100
	DCA	MEDIA DE UNA HORA	200
OMS (2021)	DCA	ANUAL	10
	DCA	24 HORAS	25

*Nota: Elaboración propia*

### 2.3. Antecedentes de la investigación

#### 2.3.1. A nivel Internacional

Liu et al., 2024, en su investigación "Real-World Evidence of Multiple Air Pollutants and Mortality: A Prospective Cohort Study in an Oldest-Old Population," examinaron la relación entre contaminantes del aire (PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub>) y la mortalidad en una población anciana de China. Este estudio longitudinal incluyó a 13,207 personas de 23 provincias, en su mayoría mayores de 80 años, con datos recopilados entre 2008 y 2018. Utilizando modelos de riesgos proporcionales de Cox y g-computation, ajustados por factores climáticos y económicos, hallaron que el riesgo de mortalidad aumentaba con la exposición a estos contaminantes, siendo el PM<sub>2.5</sub> el mayor contribuyente. En el modelo de tres contaminantes, el aumento de 10 µg/m<sup>3</sup>

de NO<sub>2</sub> mostró un incremento del 8% en el riesgo de mortalidad (HR: 1.08, IC 95%: 1.05-1.12). Aunque los niveles de NO<sub>2</sub> disminuyeron de 9.3 a 7.7 µg/m<sup>3</sup> entre 2008 y 2018, sólo un tercio de los participantes cumplió con los estándares de la OMS en 2018. La investigación también encontró que el impacto de NO<sub>2</sub> fue mayor en zonas de alta densidad de carreteras, donde la relación entre este contaminante y la mortalidad fue significativamente más pronunciada. Este estudio concluye que la exposición conjunta a varios contaminantes y factores económicos y geográficos afecta la mortalidad, subrayando la necesidad de considerar estos elementos en políticas de calidad del aire.

(Yang et al., 2022), en su investigación "Health benefits by attaining the new WHO air quality guideline targets in China: A nationwide analysis", se centraron en evaluar los beneficios para la salud derivados de alcanzar las nuevas directrices de calidad del aire de la OMS en China. Los autores recopilaron datos diarios de contaminación del aire en 315 ciudades chinas durante 2019, incluyendo concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, y las tasas de mortalidad de la población. Se utilizaron funciones de concentración-respuesta para estimar las muertes evitables si las concentraciones de contaminantes cumplieran con los nuevos límites de la OMS (25 µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub>). Los resultados revelaron que alcanzar estos límites podría evitar 58,070 muertes relacionadas con el NO<sub>2</sub> en 2019, lo que representa una importante reducción en la mortalidad asociada a enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Los valores de NO<sub>2</sub> en las ciudades chinas variaron entre 7.3 µg/m<sup>3</sup> y 50.3 µg/m<sup>3</sup>, con una concentración promedio anual de 26.9 µg/m<sup>3</sup>. Este estudio destaca la urgencia de implementar medidas más estrictas de control de la contaminación para mejorar la salud pública, especialmente en zonas con niveles más altos de NO<sub>2</sub> como Hebei, donde los beneficios para la salud fueron más significativos.

**T. Zhu et al., 2022**, en su trabajo "Insights into the new WHO Global Air Quality Guidelines", revisaron las nuevas directrices de calidad del aire global de la OMS, publicadas en septiembre de 2021, que establecen límites más estrictos para varios contaminantes, incluido el NO<sub>2</sub>. Los autores señalaron que los límites anuales para el NO<sub>2</sub> se redujeron de 40 µg/m<sup>3</sup> a 10 µg/m<sup>3</sup>, basándose en nuevas evidencias científicas sobre los efectos adversos para la salud de exposiciones prolongadas a concentraciones más bajas de contaminantes. Subrayando a su vez la importancia de adaptar las políticas de calidad del aire a estos nuevos valores, considerando las condiciones locales y el contexto específico de cada país, como es el caso de China, que ya ha implementado medidas de control de contaminantes. El artículo también advierte que los efectos de la exposición a contaminantes en ambientes mixtos (varios contaminantes al mismo

tiempo) aún no están completamente comprendidos, lo que hace necesario realizar más estudios locales para evaluar cómo estos nuevos límites de la OMS se aplican en contextos con altos niveles de contaminación.

**Borge et al., 2022**, en su estudio "Assessment of the Madrid region air quality zoning based on mesoscale modelling and k-means clustering", analizaron la calidad del aire en la región de Madrid mediante un sistema de modelado de calidad del aire (WRF-CMAQ) y técnicas de agrupamiento k-means. Su objetivo fue revisar las zonas de calidad del aire de la región, específicamente para NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>, y proponer una nueva zonificación que mejorara la homogeneidad en la exposición de la población a los contaminantes. Para el NO<sub>2</sub>, los resultados mostraron diferencias significativas entre las zonas, especialmente dentro de Madrid ciudad, donde se observaron concentraciones más altas de NO<sub>2</sub>, lo que refleja una mayor variabilidad interna. Los resultados de la zonificación propuesta indicaron que la nueva metodología proporciona zonas más homogéneas en términos de concentración de NO<sub>2</sub>, lo que podría facilitar políticas de control más efectivas y dirigidas.

**Ramacher y Karl, 2020**, en su investigación "Integrating Modes of Transport in a Dynamic Modelling Approach to Evaluate Population Exposure to Ambient NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> Pollution in Urban Areas" desarrollaron un modelo dinámico para evaluar la exposición de la población a la contaminación del aire, específicamente NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, en áreas urbanas. Este estudio se centró en el impacto del tráfico rodado como fuente principal de emisiones y cómo diferentes modos de transporte afectan la exposición de los habitantes a estos contaminantes. A través de un sistema de modelado avanzado que incorporó datos sobre la densidad de tráfico y las características del transporte público, los autores simularon la exposición de la población a NO<sub>2</sub>. Los resultados mostraron que las áreas con mayor densidad de tráfico y mayores emisiones vehiculares presentaron niveles más altos de NO<sub>2</sub>, con concentraciones de hasta 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> en zonas de alta congestión. El modelo también destacó que las políticas de transporte alternativas, como el fomento del uso del transporte público, podrían reducir la exposición a los contaminantes. Además, los resultados indicaron que los niveles de NO<sub>2</sub> estaban fuertemente correlacionados con las áreas cercanas a grandes avenidas y autopistas. Este estudio resalta la necesidad de incorporar estrategias de movilidad sostenible para mejorar la calidad del aire urbano y reducir los riesgos para la salud asociados con la exposición al NO<sub>2</sub>.

### 2.3.2. A nivel Regional

**Velayarce et al., 2022**, en su estudio "Air Quality Analysis in Lima, Peru Using the NO<sub>2</sub> Levels during the COVID-19 Pandemic Lockdown", analizaron los cambios en los niveles de NO<sub>2</sub> en Lima durante el confinamiento por COVID-19, utilizando imágenes satelitales del Sentinel-5P. Los resultados mostraron reducciones en las concentraciones ambientales de NO<sub>2</sub> de entre 60% y 40% en las primeras dos semanas, y entre 50% y 25% en las siguientes dos semanas del confinamiento, resaltando el impacto de las restricciones de movilidad en la reducción de las emisiones vehiculares y la contaminación por NO<sub>2</sub>.

**Jurado Sandoval y Valentín Vásquez , 2021**, en su trabajo de investigación "Efectos del aislamiento social obligatorio por COVID-19 en el aire (NO<sub>2</sub>, PM 2.5) de San Juan de Lurigancho, Lima – Perú" se enfocaron en evaluar los efectos del aislamiento social obligatorio por COVID-19 en la calidad del aire de San Juan de Lurigancho durante dos períodos: del 16 de marzo al 30 de abril de 2019 (meses sin aislamiento social obligatorio) y del 16 de marzo al 30 de abril de 2020 (meses con aislamiento social obligatorio). Para este propósito, se procesaron los datos de concentraciones de NO<sub>2</sub> y PM 2.5 de la estación de Monitoreo de Calidad de Aire de San Juan de Lurigancho. La frecuencia de los datos procesados fue horaria y se utilizaron técnicas de imputación para completar los datos faltantes. Posteriormente, se aplicó la prueba de t-student para analizar los resultados. Los resultados mostraron una reducción significativa de 18.9 ug/m<sup>3</sup> y 11.74 ug/m<sup>3</sup> en los parámetros PM 2.5 y NO<sub>2</sub> respectivamente, durante los meses con aislamiento social obligatorio en comparación con los meses sin esta medida. Estos hallazgos indican que el aislamiento social obligatorio tuvo un impacto positivo en la calidad del aire en San Juan de Lurigancho, siendo determinante para la reducción de estos contaminantes atmosféricos debido a la conexión de estos contaminantes con los vehículos y contaminación antropogénica en general.

**Romero et al., 2020**, en su estudio titulado "Temporal and spatial analysis of traffic-related pollutants under the influence of the seasonality and meteorological variables over an urban city in Peru," se centraron en analizar la variabilidad temporal y espacial de los contaminantes relacionados con el tráfico en Lima, Perú, entre los años 2015 y 2018. Utilizaron datos de monitoreo de la calidad del aire obtenidos de ocho estaciones, bajo la supervisión del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), y evaluaron la influencia de variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, sobre la concentración de contaminantes como CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. En su investigación,

los valores de NO<sub>2</sub> mostraron picos de concentración significativos durante las horas punta de tráfico, especialmente entre las 7:00 y 10:00 h, y entre las 18:00 y 23:00 h. Por ejemplo, en la estación de Santa Anita (AQSA Anita), se observó que las concentraciones de NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> están fuertemente correlacionadas, lo que sugiere que ambos contaminantes provienen de fuentes similares, como las emisiones de los vehículos. Las concentraciones diarias de NO<sub>2</sub> variaron, con los picos más altos coincidiendo con los momentos de mayor congestión vehicular. La investigación también indicó que el NO<sub>2</sub> mostró una correlación positiva con las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> durante los días laborables, pero menos pronunciada durante los fines de semana, cuando el tráfico disminuye. Los resultados sugieren que las concentraciones de NO<sub>2</sub> aumentan en función del tráfico, y que la temporada también juega un papel importante, con las concentraciones más altas observadas en otoño e invierno, debido a las condiciones meteorológicas y el comportamiento del tráfico en esas estaciones. En conclusión, Romero et al. subrayan la importancia de seguir investigando los efectos del tráfico sobre la calidad del aire y la salud humana, además de promover políticas ambientales nacionales para mitigar la contaminación en áreas urbanas de Lima.

**Tapia et al., 2018**, en su investigación "Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú", evalúan el impacto del reordenamiento vehicular en la calidad del aire. El estudio se centró en la Avenida Abancay entre 2013-2015, comparándola con dos avenidas sin intervención. Los resultados mostraron una reducción significativa del 65% en los niveles de NO<sub>2</sub> ( $\beta$ : -41,71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , IC 95%: -48,18 a -35,23) en la avenida intervenida, mientras que en las otras dos avenidas analizadas no se observó disminución. Los hallazgos demuestran que el reordenamiento del tráfico vehicular puede ser una estrategia efectiva para reducir la contaminación atmosférica urbana, sugiriendo que la extensión de esta medida podría mejorar la calidad del aire en Lima.

### **2.3.3. A nivel Local**

**Holguín Ramos, 2022**, en su trabajo de investigación "Gestión de tráfico vehicular y calidad del aire del Centro Histórico de Cusco, 2021" se enfocó en describir la influencia de la gestión del tráfico vehicular en la calidad del aire del Centro Histórico de Cusco. Mediante la Gerencia Regional de Salud (GERESA), se identificaron como agentes contaminantes el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y material particulado menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>), los cuales fueron medidos

y controlados en tres estaciones de monitoreo. Los resultados obtenidos para el  $\text{NO}_2$  se encuentran por debajo del límite máximo permisible (LMP), sin sobrepasar los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales, mientras que el LMP es de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales. En cuanto al  $\text{PM}_{10}$ , se observó un ligero incremento en las concentraciones durante los años 2015, 2016 y 2021, superando ligeramente los límites máximos permisibles, con una lectura máxima de  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales, donde el LMP es de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales. A partir del año 2018, con la implementación del Plan Maestro del Centro Histórico de Cusco, se realizó una comparación entre los datos de las estaciones de monitoreo y la cantidad de vehículos, información proporcionada por la Gerencia de Tráfico de la Municipalidad Provincial de Cusco. Finalmente, se concluye que existe una ligera influencia de la gestión del tráfico vehicular en la mejora de la calidad del aire en el Centro Histórico de Cusco durante el año 2021.

**Trelles Motte, 2018**, en su trabajo de investigación "Determinación del material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) en el distrito de Ocoruro-Provincia Espinar-Región Cusco", llevó a cabo un estudio centrado en la evaluación de la calidad del aire en el distrito de Ocoruro durante la construcción de la carretera de Yauri-Negromayo-Imata. Para ello, se emplearon tres estaciones de monitoreo de calidad del aire en los meses de julio y octubre de 2017, así como febrero de 2018. Los métodos utilizados incluyeron un Hi-Vol para  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , un tren de muestreo de gases para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}$ , y una estación meteorológica para obtener datos climáticos relevantes. Los resultados del estudio mostraron concentraciones preocupantes de  $\text{NO}_2$  y material particulado  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en julio de 2017, superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) debido al tránsito de maquinaria pesada y vehículos en la zona de construcción. Sin embargo, en octubre de 2017 y febrero de 2018, las concentraciones se encontraron por debajo de los ECA, indicando una mejora en la calidad del aire en ese período.

**Condori Alca y Huisa Chacca, 2022**, en su investigación "Evaluación de la calidad ambiental de aire en las comunidades campesinas de Cala Cala y Nueva Esperanza, Espinar, Cusco", analizaron la calidad del aire en dos comunidades cercanas a la minera Antapaccay. Se evaluaron cinco parámetros: dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), material particulado  $\text{PM}_{2.5}$ , dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y material particulado  $\text{PM}_{10}$ , utilizando equipos de muestreo durante 24 horas. Los resultados mostraron que las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en ambas estaciones de monitoreo (C-1 y C-2) fueron inferiores a  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por debajo del límite de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA).

**PRAL, 2006**, en su plan “PROGRAMA REGIONAL DE AIRE LIMPIO”, se analizó el impacto del transporte vehicular en la calidad del aire de Cusco, enfocándose en las emisiones de diversos GEI, entre los cuales estaba el de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) generadas por la combustión de combustibles fósiles. El estudio revela que los vehículos, especialmente aquellos que usan gasolina y diésel, son responsables de una significativa contaminación del aire. El sector de transporte público (taxis, buses, combis) es el principal emisor de contaminantes. La investigación indica que el NO<sub>2</sub> representa el 1.52% de las emisiones totales del parque automotor, alcanzando 2437.5 toneladas al año. Los buses son los mayores emisores de NO<sub>2</sub> debido a su uso de diésel, que, al generar altas temperaturas, favorece la formación de este gas.

## **CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **3.1. Hipótesis de investigación**

#### **a. Hipótesis general**

- Se puede determinar la concentración de dióxido de nitrógeno en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco mediante el uso de un analizador automático.

### **3.2. Identificación de variables e indicadores**

#### **Variable Independiente**

- Lugar de monitoreo: Puntos estratégicos del tránsito vehicular

#### **Variable Dependiente**

- Concentración de dióxido de nitrógeno

#### **Variable Interviniente**

- Tiempo de medición

### 3.1.5. Operacionalización de variables

**Tabla 3. Operacionalización de las variables: nivel de conciencia ambiental y hábitos de consumo**

	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INSTRUMENTOS</b>
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	Lugar de monitoreo en puntos estratégicos del tránsito vehicular: El lugar de monitoreo se refiere a las ubicaciones específicas donde se realizan las mediciones (Saucedo y Regalado, 2024), en este caso específico en cuanto a las mediciones de concentración de dióxido de nitrógeno en inmediaciones de tránsito vehicular en la ciudad del Cusco, considerando diferentes momentos del día y zonas.	D1: Localización geográfica de la medición.	Descripción de la ubicación y contexto del monitoreo, especificando las coordenadas geográficas	Registro geográfico mediante latitud y longitud.
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	Concentración de dióxido de nitrógeno: El dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) es un gas contaminante de color marrón rojizo, altamente reactivo. Es uno de los principales contaminantes atmosféricos producido por la combustión de vehículos motorizados y tiene efectos significativos en la calidad del aire y la salud humana.	D1: concentración de NO <sub>2</sub> . D2: Valor promedio de concentración de NO <sub>2</sub> . D3: Valor mínimo de concentración de NO <sub>2</sub> . D4: Valor máximo de concentración de NO <sub>2</sub> .	Microgramos por metro cúbico (µg/m <sup>3</sup> )	Visualización digital en el analizador automático de NO <sub>2</sub> .
<b>VARIABLE INTERVINIENTE</b>	Tiempo de medición: El tiempo de medición se refiere al período durante el cual el analizador automático de NO <sub>2</sub> registra el nivel de concentración de dióxido de nitrógeno.	D1: Duración de la medición en segundos.	Horas.	Registro de la duración de la medición realizada por el analizador automático de NO <sub>2</sub> .

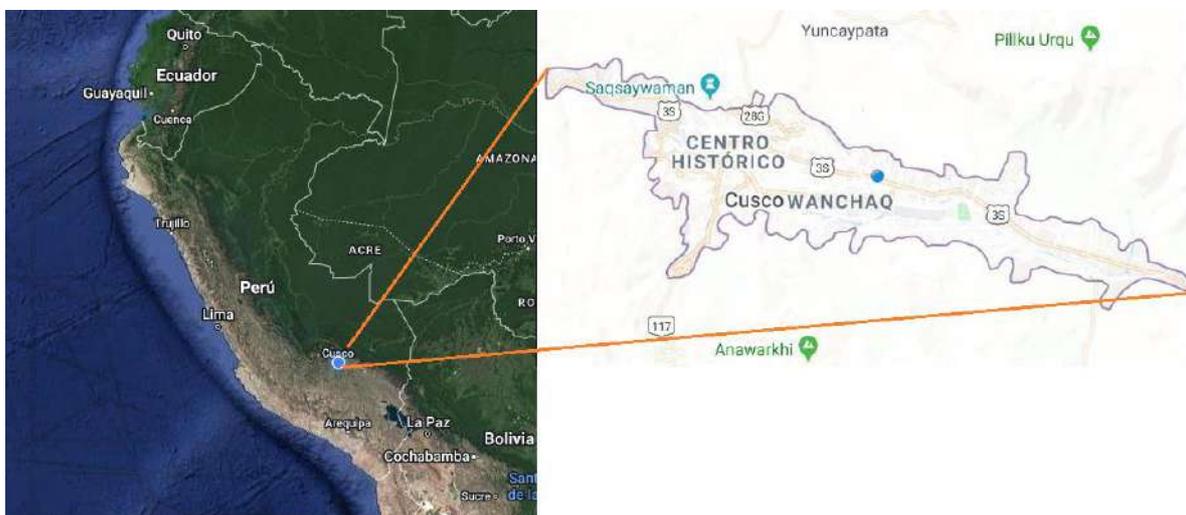
## CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

### 4.1. Ámbito de Estudio

El ámbito de estudio fue la ciudad de Cusco ubicada en la sierra sur del Perú, se encuentra entre las altitudes de 3214 (Granja Kayra del distrito de San Jerónimo) a 3400 m.s.n.m. (Tica Tica, distrito de Cusco) ("Departamento del Cusco", 2023). La ciudad de Cusco es un lugar histórico debido a que fue el centro de la cultura Inca asimismo es ahora una ciudad cosmopolita y en crecimiento demográfico y socioeconómico.

#### Figura 3.

*Ubicación de la ciudad del Cusco*



*Nota:* Elaboración propia (2023); Imagen procesada en Google Earth (2023).

#### 4.1.1. Localización Política

La Provincia de Cusco es una de las trece subdivisiones administrativas que integran el departamento del Cusco, ubicado en el sur del territorio peruano. Geográficamente, presenta límites al norte con las provincias de Calca y Urubamba, al este con la provincia de Quispicanchi, al sur con la provincia de Paruro, y al oeste con la provincia de Anta. La ciudad de Cusco se erige como la capital de esta provincia.

De acuerdo con los datos del censo nacional del año 2017 (INEI, 2018), la población total de esta provincia asciende a 447,588 habitantes.

En términos de extensión territorial, abarca un área total de 617 kilómetros cuadrados y se divide administrativamente en 8 distritos: Cusco, Ccorca, Poroy, San Jerónimo, San

Sebastián, Santiago, Saylla y Wánchaq ("Departamento del Cusco", 2023), sin embargo, en el contexto de este estudio, se realizaron mediciones de NO<sub>2</sub> en los distritos de Wanchaq, San Jerónimo, San Sebastián y Santiago que tienen límites geográficos claramente definidos. Wanchaq limita al norte con San Sebastián, al este con San Jerónimo, al sur con Santiago y al oeste con otros distritos de la provincia de Cusco. Por su parte, San Jerónimo limita al norte con el distrito de Cusco, al este con Wanchaq, al sur con Saylla y al oeste con otros distritos de la provincia. San Sebastián, por otro lado, tiene fronteras al norte con Cusco, al este con Wanchaq, al sur con Cusco y Saylla, y al oeste con otros distritos de la provincia de Cusco. Finalmente, Santiago limita al norte con Cusco, al este con San Sebastián, al sur con Saylla y al oeste con otros distritos de la provincia de Cusco.

#### 4.1.2. Localización Geográfica

La ciudad del Cusco se encuentra está a un aproximado de 3403 m.s.n.m. En la tabla 4 se presentan los datos correspondientes a la evaluación de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) realizada en cada uno de los distritos de esta provincia.

**Tabla 4. Puntos de monitoreo con sus respectivas coordenadas.**

N	PUNTO DE MONITOREO	Latitud	Longitud
1	WANCHAQ - CENTRO DE SALUD	-13.5225281	-71.9706128
2	CUSCO - PLAZA DE ARMAS	-13.5167024	-71.9789146
3	SAN SEBASTIAN - PLAZA DE ARMAS	-13.5300737	-71.937376
4	SAN SEBASTIAN - OCTAVO PARADERO	-13.5326715	-71.9207295
5	UNSAAC - PUERTA 6 (AV. UNIVERSITARIA)	-13.5209061	-71.9608474
6	PLAZA SAN FRANCISCO	-13.5188616	-71.9815207
7	PLAZOLETA DE SAN BLAS	-13.5151739	-71.9745747
8	PLAZA LIMACPAMPA	-13.5195413	-71.9736632
9	PLAZOLETA PUMAQCHUPAN	-13.5238343	-71.9732203
10	CALLE MATARA	-13.5216556	-71.9785657
11	SANTIAGO - CENTRO DE SALUD BELENPAMPA	-13.5255457	-71.9787936
12	SAN SEBASTIAN - CENTRO DE SALUD DE SAN SEBASTIAN	-13.532672	-71.9294593
13	SAN JERONIMO - CENTRO DE SALUD DE SAN JERONIMO	-13.5488286	-71.8801196

*Nota:* Elaboración propia en base a los lugares de monitoreo durante los años 2016, 2017 y 2018.

En la figura 4 se puede apreciar de manera gráfica la distribución de los puntos de monitoreo de NO<sub>2</sub>, los cuales se encuentran estratégicamente distribuidos a lo largo de la ciudad y están próximos a vías de tránsito vehicular clave. Estas ubicaciones incluyen centros de salud, plazas públicas, paraderos de transporte público y otros lugares de importancia. La

elección de estos puntos de muestreo obedece a la necesidad de evaluar la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en áreas donde la exposición de la población es significativa.

#### Figura 4.

*Distribución Geográfica de los puntos de monitoreo*



*Nota:* Elaboración propia (2023); Imagen procesada en Google Earth (2023).

Cada uno de los puntos geográficos seleccionados para la investigación representa una ubicación estratégica dentro de la ciudad y posee características distintivas que influyen en la calidad del aire y la exposición de la población a la contaminación. A continuación, se detallan las características de estos puntos de estudio:

1. **Centro de Salud del distrito de Wanchaq:** Limita con la avenida Garcilaso que es una avenida de alto tránsito, el distrito de Wanchaq es una zona con alta densidad poblada con una importante actividad comercial y de transporte, por la Av. Garcilaso transitan vehículos de varias empresas de transporte urbano, taxis, transporte privado y comercial. La presencia de un centro de salud en esta área lo convierte en un punto de interés adicional para la evaluación de la salud pública.
2. **Plaza de Armas del Cusco:** La Plaza de Armas de Cusco es un lugar de alto tránsito peatonal y de vehículos, rodeada de edificios históricos, por su importancia histórica se tiene la afluencia de visitantes de 3000 a 5000 cada día (referencia). La presencia de tráfico vehicular y peatonal, así como actividades comerciales y culturales, hace que la calidad del aire en este lugar sea de particular interés. Además, es una ubicación emblemática que destaca la necesidad de proteger el patrimonio cultural de la ciudad de los efectos perjudiciales de la contaminación atmosférica.
3. **Plaza de Armas del distrito de San Sebastián:** La Plaza de Armas es un lugar importante debido a que se realizan actividades públicas y comerciales. Limita con una

avenida de alto tránsito vehicular y una alta densidad de población hacen que este lugar sea esencial para evaluar la calidad del aire.

4. **Octavo Paradero de la Avenida de la Cultura en el distrito de San Sebastián:** Este punto de muestreo se encuentra en una la vía de mayor tránsito vehicular de la ciudad del Cusco. La concentración de personas en paraderos de transporte público es alta, lo que puede tener implicaciones para la salud pública.
5. **Puerta número 06 de la UNSAAC (Av. Universitaria) del Distrito del Cusco:** La Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) es un importante centro educativo, limita con la Av. Universitaria que es una vía de alto tránsito automotor. Este punto es relevante para entender cómo la contaminación puede afectar a las personas que acuden a las instituciones académicas y a las zonas circundantes.
6. **Plaza San Francisco del distrito de Cusco:** El punto de muestreo en la Plaza San Francisco se ubicó cerca de una vía de alto tránsito vehicular y de actividades culturales y comerciales. Pertenece al centro histórico y lo convierte en un lugar relevante para la evaluación de la contaminación atmosférica en áreas de carácter patrimonial.
7. **Plazoleta de San Blas del distrito de Cusco:** Pertenece al centro histórico de la ciudad conocido por su arquitectura colonial y su vida cultural. La plazoleta es un lugar de reunión para residentes y visitantes con reglar tránsito vehicular, lo que lo convierte en un punto interesante para comprender cómo la contaminación puede afectar áreas turísticas y culturales.
8. **Plaza Limacpampa del distrito de Cusco:** Es un lugar de alto tránsito vehicular y peatonal, es una zona de importante actividad comercial, su monitoreo es importante para evaluar la calidad del aire en áreas de alta concurrencia peatonal.
9. **Plazoleta Pumaqchupan del distrito de Cusco:** Lugar que limita con vías de alto tránsito vehicular durante todo el día, se encentra rodeada de centros comerciales e instalaciones hoteleras.
10. **Calle Matara del distrito de Cusco:** Pertenece al centro histórico del Cusco, por esta calle se da alto tránsito vehicular debido que en los alrededores se encentran instituciones estatales y privadas asimismo por s cercanía a los locales turísticos, existen varias instituciones educativas en s entorno.
11. **Centro de Salud Belenpampa del distrito de Santiago:** El sitio de monitoreo ubicado en el centro de salud colinda con la Avenida ejercito que es na vía de alto tránsito vehicular.

12. **Centro de Salud del distrito de San Sebastián:** Se ubica en una zona de alto tránsito vehicular y de considerable actividad antrópica, colinda con el mercado de abastos, de comercios, grifos y de centros educativos.
13. **Centro de Salud del distrito de San Jerónimo:** Se ubica cerca de la avenida de la cultura y es el punto de salida de la ciudad del Cusco, en su entorno se encuentra un centro policial, instituciones educativas y el acceso al mercado de abastos del distrito.

#### **4.2. Alcance de investigación**

El propósito de la investigación fue la evaluación de la concentración del dióxido de nitrógeno mediante un analizador automático en inmediaciones de tránsito vehicular en la ciudad del Cusco, en los años 2016 a 2018, los resultados han permitido cuantificar la contaminación del aire por NO<sub>2</sub>

Mediante equipamiento moderno y certificado por la EPA, las avenidas seleccionadas para el muestreo son representativas en la ciudad del Cusco, el común denominador es el alto tránsito vehicular y peatonal, por otra parte, el análisis estadístico ha permitido comparar los promedios de la concentración de NO<sub>2</sub> y los ECA establecidos por el MINAM (2017) y las directrices de calidad del aire de la OMS (2021).

La elección de estas áreas geográficas específicas se basó en su diversidad de características urbanas y su importancia tanto para la calidad del aire como para la salud pública en la Ciudad de Cusco. Además, se incorporó un análisis de datos geoespaciales para caracterizar cada área de estudio. Esto incluyó factores como la densidad de población, la presencia de vías principales y la ubicación geográfica.

El período de estudio abarcó desde 2016 hasta 2018. Este marco temporal permitió obtener datos durante un período representativo y evaluar posibles variaciones estacionales y temporales en la concentración de NO<sub>2</sub>.

#### **4.3. Tipo y Nivel de Investigación**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicando un nivel explicativo, siguiendo una metodología sistemática y rigurosa para la evaluación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la atmósfera de la ciudad del Cusco.

El enfoque cuantitativo permitió la recolección y análisis sistemático de datos numéricos mediante un analizador automático certificado por la EPA, facilitando la cuantificación precisa de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y su correlación estadística con

patrones de tránsito vehicular. Este método garantizó la objetividad y reproducibilidad de los resultados, elementos fundamentales en la investigación científica ambiental.

A nivel explicativo, la investigación estableció relaciones causales entre las variables de estudio, determinando cómo los patrones de tráfico vehicular y las características urbanas influyen en las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Este nivel permitió comprender los mecanismos subyacentes que determinan la distribución espacio-temporal del contaminante en la cuenca atmosférica de la ciudad. El análisis exhaustivo de estas relaciones causales proporcionó una base sólida para la comprensión de la dinámica de la contaminación atmosférica en la ciudad, permitiendo establecer perfiles de contaminación específicos para diferentes zonas urbanas y contribuyendo significativamente al conocimiento científico sobre la contaminación atmosférica en ciudades de altura.

Esta investigación cuantitativa-explicativa proporciona una línea base metodológica fundamental para la evaluación de la calidad del aire en la región, estableciendo precedentes importantes para futuras investigaciones y la toma de decisiones en materia de gestión ambiental urbana.

#### **4.4. Unidad de Análisis**

La unidad de análisis en la investigación fue el conjunto de mediciones de concentración de NO<sub>2</sub> realizadas mediante un analizador automático en cercanías de tránsito vehicular en la ciudad del Cusco.

Los elementos de la unidad de análisis fue cada sitio de muestreo y las mediciones de la concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo.

#### **4.5. Población de Estudio**

La población de estudio en nuestra investigación se refiere a la atmósfera a nivel del suelo que abarca las zonas próximas al tránsito vehicular y peatonal en la ciudad del Cusco. Dentro de esta atmósfera, la variable que nos interesa es la concentración del contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Este contaminante es especialmente relevante debido a sus efectos negativos en la salud pública y su influencia en la calidad del aire en entornos urbanos.

### Figura 5.

*Población afectada directamente por los contaminantes emitidos por los vehículos.*



*Nota:* Elaboración propia (2023); Imagen procesada en Google Maps (2023).

Debido a la complejidad de determinar toda la masa de aire en la ciudad del Cusco en las cercanías de tránsito vehicular se puede aproximar a valor muy grande y de naturaleza continua.

La población de estudio consistió en zonas o volúmenes de masa en sectores cercanas a vías de tránsito vehicular hasta lugares de menor flujo vehicular y peatonal. La selección predeterminada de los lugares se fundamentó principalmente en los siguientes aspectos:

- Cercanía a vía de tránsito vehicular
- Cercanía a tránsito peatonal
- Logística para el funcionamiento del equipo, el suministro de energía eléctrica debe ser de 220 VCC, seguridad para un funcionamiento permanente, acceso del o los investigadores al equipo.

#### 4.6. Tamaño de Muestra

El tamaño de la muestra es la masa de aire estudiada en 13 puntos de monitoreo en cercanías de tránsito vehicular en la ciudad del Cusco. La variable en estudio es la concentración de contaminante atmosférico ( $\text{NO}_2$ ) en la masa de aire en cada sitio de monitoreo. Cuantitativamente la muestra considera 13 puntos de monitoreo

Simultáneamente se ha tomado en cuenta información del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en 2007 y 2018, que arrojaron una población de 367,791 y 447,588 habitantes respectivamente. Según las pautas de la Dirección General de Salud Ambiental

(DIGESA) de 2005, que establecen recomendaciones para el número mínimo de estaciones de monitoreo en función de la población como se muestra en la tabla 5, se determinó que, en áreas urbanas con una población inferior a un millón, se requería al menos una estación. Dado que esta condición se cumplía en la provincia de Cusco, se empleó una estación de monitoreo.

**Tabla 5. Recomendaciones de número mínimo de estaciones.**

Población urbana (millones)	Parámetros de monitoreo					
	PM-10	SO <sub>2</sub>	NOX	Oxidantes	CO	Meteorológicos
Menos de 1	2	4	1	1	1	1
1 - 4	5	5	2	2	2	2
4 - 8	8	8	4	3	4	2
Más de 8	10	10	5	4	5	3

Nota: DIGESA (2005).

Sin embargo, la singularidad de esta investigación radica en que no se basó únicamente en una estación de monitoreo en un punto de monitoreo para representar a toda la población. Para obtener una muestra más representativa y precisa de la variabilidad de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en distintos lugares, se implementaron múltiples puntos de monitoreo. Cada uno de estos puntos se evaluó siguiendo las pautas del Ministerio del Ambiente (MINAM) de 2019 (Actual normativa) visualizadas en la tabla 6, que especifican requisitos de frecuencia y períodos para el monitoreo de áreas asociadas a actividades productivas y de servicios.

**Tabla 6. Requisitos de frecuencia y periodos de monitoreo para redes vinculadas a planes de acción.**

Tipo de tecnología	Tipo de monitoreo	Periodo a promediar (en base al ECA)	Mínima suficiencia de información Valida requerida)	Frecuencia mínima por muestra o registro
Automática	Continuo	1 hora	>75% (45 minutos)	Continua
		8 horas	>75% (6 horas)	Continua
		24 horas	>75% (18 horas)	Continua
		Mensual	>75% (23 días)	Continua
		Anual	>75% (9 meses)	Continua

Nota: MINAM (2019).

De acuerdo con estas pautas, se realizó el monitoreo de NO<sub>2</sub> de forma continua durante un mínimo de cinco días en cada punto o en caso solo se evalué un día, se tenga previsto que para las horas de monitoreo sea mayor el porcentaje al 75%. La información válida se definió como aquella recopilada durante un período mayor de 18 horas. Esta estrategia aseguró que las mediciones capturaran las variaciones a lo largo del tiempo, incluyendo las fluctuaciones

diurnas y nocturnas. La combinación de múltiples puntos de monitoreo y una duración óptima de medición según el punto de monitoreo y característica geográfica permitió obtener una muestra rica y representativa de la concentración de NO<sub>2</sub> en la provincia de Cusco.

#### 4.7. Técnicas de muestreo

Técnica de muestreo no probabilístico intencional: se aplicó esta técnica para seleccionar los puntos de muestreo, Para lograr este propósito, se identificaron áreas o puntos de monitoreo que reunieran los siguientes criterios:

**Cercanía a vías de mediano y alto tránsito vehicular:** Se priorizaron las ubicaciones cercanas a vías con un flujo vehicular significativo, ya que se buscaba evaluar la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en áreas con mayor actividad vehicular, que suelen ser las principales fuentes de emisión de este contaminante.

**Seguridad para el equipamiento:** Se aseguró que los puntos de monitoreo fueran seguros para la instalación y operación del equipamiento necesario para la medición de las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Esto implicó considerar factores como la estabilidad del entorno, la ausencia de riesgos físicos o ambientales que pudieran afectar el equipo y la integridad de los datos recolectados.

**Suministro eléctrico adecuado:** Se verificó que los lugares seleccionados contaran con un suministro eléctrico confiable y suficiente para alimentar el equipo de monitoreo durante el periodo de estudio. Esto garantizó la continuidad de las mediciones y evitó interrupciones que pudieran afectar la calidad de los datos obtenidos.

**Permisos para el traslado y ubicación del shelter:** Se obtuvieron los permisos necesarios por parte del municipio provincial del Cusco para el traslado e instalación del shelter (cobertizo o estructura que protege el equipo de monitoreo) en la cercanía de las vías de tránsito vehicular seleccionadas.

La aplicación de este criterio de muestreo no probabilístico intencional garantizó la selección de puntos representativos y adecuados para la evaluación de la concentración de NO<sub>2</sub> en las cercanías de vías de tránsito vehicular en la ciudad del Cusco.

#### 4.8. Técnicas de recolección de información

Mediante un analizador automático de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) de la marca ECOTECH instalado en una cabina de monitoreo ambiental (shelter) se obtuvo la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire cerca del suelo (3.0 m de altitud), los valores censados por el equipo se realizaba cada segundo y registrado digitalmente en un USB instalado en el interior del equipo.

#### 4.8.1. Shelter de Monitoreo Ambiental

El Shelter de Monitoreo Ambiental (Figura 6) es una estructura diseñada y construida para monitorear y evaluar la calidad del aire en diferentes ubicaciones. El Shelter de Monitoreo ambiental cumple con las normativas solicitadas por la EPA (1998), DIGESA (2005) y del MINAM (2019) para cada uno de sus componentes, con la finalidad de brindar un correcto control de calidad de datos obtenidos y mantener con respecto a las normativas cada uno de los equipos de monitoreo ambiental.

#### Figura 6.

*Shelter de Monitoreo Ambiental - UNSAAC*



*Nota:* Libro Energía Limpia y Cero Emisión (J. L. Warthon, 2017)

El Shelter de Monitoreo Ambiental está compuesto por una serie de componentes internos y externos que trabajan en conjunto para llevar a cabo su función principal que es la obtención de diferentes datos de contaminantes gaseosos como sólidos (material particulado).

Las partes del shelter son:

**Cabina:** La cabina tiene un largo de 3.00 metros, un ancho de 2.00 metros y una altura de 2.00 metros. La altura desde la superficie de la Tierra hasta la base de la cabina es de 0.70 metros. Además, cuenta con una baranda en la superficie superior.

**Estructura metálica:** La estructura metálica que rodea la cabina es desarmable y tiene las siguientes dimensiones: 3.00 metros de largo, 2.00 metros de ancho y 0.70 metros de altura.

**Puertas:** El Shelter cuenta con una puerta posterior de dos hojas posteriores y una puerta lateral de una hoja. Cada puerta tiene dimensiones de 1.00 metro de largo, 0.06 metros de espesor y 2.00 metros de altura.

**Ejes:** El Shelter tiene dos ejes, el eje posterior es fijo mientras que el delantero puede girar para facilitar el transporte. Las dimensiones del eje son las siguientes: longitud de 1.80 metros y aro de neumático de 14 pulgadas.

El diseño del Shelter se basa en las dimensiones externas y la estructura de equipos utilizados por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). Sin embargo, cada componente interno y externo se ha diseñado teniendo en cuenta los requisitos técnicos específicos, la seguridad y la estabilidad.

**Unidad de Control y Protección Eléctrica:** El Shelter cuenta con una unidad de control y protección eléctrica que garantiza un suministro eléctrico estable y seguro para todos los equipos. Esta unidad incluye un tablero eléctrico con protección temporizada y un regulador automático de voltaje. El tablero eléctrico evita cortes intempestivos y proporciona energía regulada, mientras que el regulador automático de voltaje compensa los cambios internos de voltaje.

**Sistema de Seguridad:** El sistema de seguridad del Shelter incluye un circuito de video vigilancia con cámaras en el interior y exterior, sensores de movimiento y alarma, y un sensor de humo. Estos componentes aseguran la seguridad de los equipos y del propio Shelter, además de proporcionar registros visuales y alertas en caso de situaciones anómalas.

**Sistema de Aire Acondicionado:** El sistema de aire acondicionado es esencial para mantener una temperatura adecuada en el interior del Shelter. Esto es fundamental para el funcionamiento eficiente de los equipos, ya que muchos de ellos generan calor durante su operación.

**Parámetros Eléctricos del Sistema:** Es importante destacar los parámetros eléctricos del sistema, que incluyen la potencia consumida por cada componente. La potencia total consumida puede variar según la operación de los analizadores, el sistema de aire acondicionado y otros componentes. Se prevé que la potencia máxima consumida puede llegar a 5 kW, lo que implica un amperaje que oscila entre 10 y 20 Amperios. La estabilidad y calidad del suministro eléctrico son esenciales para el funcionamiento confiable del Shelter.

#### 4.8.2. Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40

El Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40 (Figura 7), con su método de referencia basado en la quimioluminiscencia, es una herramienta de vital importancia en esta investigación para medir con precisión la concentración de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en el aire de la ciudad de Cusco. Este método cumple rigurosamente con las regulaciones y normativas a nivel nacional según los métodos automáticos de la calidad del aire del Decreto Supremo N° 003-2017 MINAM y con las normativas internacionales mencionadas por la OMS (1985).

#### Figura 7.

*Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40*



*Nota:* ECOTECH (2015)

**Método de Referencia Quimioluminiscencia:** Este equipo utiliza el método de referencia de quimioluminiscencia para la medición de  $\text{NO}_x$ . La quimioluminiscencia es una técnica ampliamente reconocida y validada para la medición de  $\text{NO}_x$ . Su aplicación asegura la conformidad con las normativas nacionales e internacionales, ya que es un método preciso y confiable.

**Rangos Amplios y Selección de Unidades:** El equipo es capaz de medir concentraciones de  $\text{NO}_x$  en un rango de 0-20 partes por millón (ppm) y mostrar los resultados en diversas unidades según la preferencia del usuario, incluyendo  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{pg}/\text{m}^3$ , ppm, ppb y ppt. Esta versatilidad es crucial para adaptarse a diferentes escalas de medición.

**Precisión y Baja Detección de Ruido:** Con una precisión de 0.4 ppb o 0.5% de la lectura (la que sea mayor) y un ruido de menos de 0.2 ppb, el equipo demuestra su capacidad para proporcionar mediciones extremadamente precisas, incluso en niveles bajos de  $\text{NO}_x$ . Su límite inferior de detección (LDL) de menos de 0.4 ppb es fundamental para captar

concentraciones mínimas de NO<sub>x</sub>, sin embargo por su alta precisión y error mínimo del equipo es probable dentro del span, siempre uno o más valores que tiendan al -0.5, valor que se debe ignorar y despreciar al momento del análisis de datos.

**Linealidad y Estabilidad a Largo Plazo:** El analizador garantiza una linealidad del 1% de la escala total, lo que significa que las mediciones se mantienen precisas en un amplio rango de concentraciones. Además, con una desviación de cero inferior a 0.5 ppb en 24 horas y una deriva de span inferior al 1% de la lectura en 7 días, demuestra una excelente estabilidad a largo plazo.

**Tiempo de Respuesta Rápido:** Su tiempo de respuesta de tan solo 15 segundos al 95% permite capturar cambios en la concentración de NO<sub>x</sub> casi instantáneamente, lo que es fundamental para investigaciones en tiempo real.

**Condiciones Operativas Versátiles:** El analizador es capaz de operar en un rango de temperatura de 0-40°C y se adapta a diversas condiciones ambientales.

**Almacenamiento de Datos:** Para el registro de datos, el equipo está equipado con una memoria flash USB extraíble que almacena información en una variedad de formatos. Esto incluye datos instantáneos en intervalos de tiempo que varían desde 1 minuto hasta 60 minutos y promedios de datos de diferentes duraciones. Es capaz de almacenar datos de hasta 10 años, lo que resulta esencial para investigaciones a largo plazo.

Las características del analizador automático de óxidos de Nitrógeno Serinus 40, junto con su método de referencia de quimioluminiscencia y sus calibraciones en su debido momento siguiendo la normativa, hacen que este equipo sea una herramienta confiable y precisa para medir la concentración de NO<sub>x</sub> en la Ciudad de Cusco. La combinación de precisión, velocidad y capacidad de almacenamiento de datos a largo plazo es esencial para esta investigación y proporciona una base sólida para el análisis de la contaminación del aire en la ciudad, cumpliendo con las más estrictas normativas nacionales e internacionales.

Finalmente, Los datos se recopilaron mediante el analizador automático de manera continua en diferentes puntos de monitoreo durante un período que abarcó los años 2016 a 2018. Esta duración permitió una evaluación a largo plazo de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la ciudad, lo que posibilitó la identificación de patrones temporales y tendencias debido a las zonas geográficas.

La recolección de datos se llevó a cabo siguiendo los estándares y protocolos internacionales de Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1998) para garantizar su coherencia y comparabilidad, también se siguieron los estándares y protocolos para los métodos

automáticos de la calidad del aire proporcionados por la normativa Nacional del DIGESA (2005) y del MINAM (2017). Además, se implementaron procedimientos de control de calidad rigurosos para verificar y garantizar la precisión de las mediciones.

La información recopilada se almacenó de manera segura y se sometió a un proceso de análisis posterior para extraer conclusiones significativas en relación con los objetivos de la investigación.

#### **4.9. Técnicas de análisis e interpretación de la información**

El estudio se basa en la comparación de los datos recopilados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y las pautas de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para llevar a cabo esto, se calcularon estadísticas descriptivas para resumir y caracterizar la distribución de las concentraciones de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en los puntos de monitoreo. Estas estadísticas proporcionaron una imagen clara de la tendencia central y la dispersión de los datos.

Luego, se compararon los datos con los límites y valores objetivo establecidos en los ECA del MINAM y las directrices de la OMS para el  $\text{NO}_2$ . Este proceso implicó determinar cuántas de las mediciones superaron los límites recomendados y si había áreas geográficas que consistentemente mostraban concentraciones de  $\text{NO}_2$  por encima de los estándares.

Además, se realizó un análisis espacial para evaluar cómo se distribuían las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en la Ciudad de Cusco en relación con las regulaciones del MINAM y la OMS. Esto ayudó a identificar áreas que podrían requerir una atención particular debido a la alta concentración de  $\text{NO}_2$ .

En última instancia, las técnicas de análisis se centraron en determinar si las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en el estudio cumplían con los estándares de calidad ambiental nacionales e internacionales.

#### **4.10. Técnicas estadísticas**

Dado que trabajábamos con datos de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) recopilados a lo largo de un período de tiempo y en múltiples ubicaciones geográficas, se utilizó estadística descriptiva, análisis temporal y análisis espacial.

**Estadística Descriptiva:** En primer lugar, se calcularon estadísticas descriptivas, como el promedio y la desviación estándar de los datos de  $\text{NO}_2$ . Para garantizar la calidad de los datos, se eliminaron los valores que pudieran atribuirse a errores propios del equipo, es decir,

los valores anómalos y no representativos, que eran menores a un valor mínimo significativo. El promedio resultante se utilizó como medida central para comprender la concentración promedio de NO<sub>2</sub> en las áreas de estudio durante un día típico.

**Gráfico de la concentración en función del tiempo:** Se realizaron gráficos que permitieron visualizar la distribución de las concentraciones de NO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo. Esto ayudó a identificar patrones y tendencias temporales en los niveles de NO<sub>2</sub> en los puntos de medición. Además, generamos mapas de calor georreferenciados para analizar las variaciones espaciales en la concentración de NO<sub>2</sub> en diferentes ubicaciones de la ciudad de Cusco.

**Análisis Temporal:** El análisis temporal implicó evaluar cómo las concentraciones de NO<sub>2</sub> variaban a lo largo del día, semana, mes y año. Esto reveló patrones estacionales, diurnos o semanales en la concentración de NO<sub>2</sub>, lo que podría estar relacionado con factores como el tráfico vehicular y las condiciones meteorológicas. Este enfoque fue fundamental para comprender la influencia temporal en los niveles de NO<sub>2</sub>.

**Análisis Espacial:** El análisis espacial se centró en identificar patrones geográficos en las concentraciones de NO<sub>2</sub>. ¿Existían áreas de la ciudad con concentraciones significativamente más altas que otras? Este análisis se llevó a cabo mediante la creación de mapas de calor y técnicas de análisis geoespacial.

#### 4.11. Recolección de datos de NO<sub>2</sub>

La recopilación de datos de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se llevó a cabo de manera rigurosa y precisa para garantizar la calidad y representatividad de los resultados obtenidos. En el transcurso de tres años, desde 2016 a 2018, se realizaron mediciones continuas de NO<sub>2</sub> en múltiples puntos estratégicos en la Ciudad de Cusco. Estos puntos de monitoreo se seleccionaron cuidadosamente para abarcar una amplia gama de entornos urbanos, desde áreas altamente congestionadas hasta lugares menos transitados, puntos de monitoreo que se presentan en la tabla 4. Esto se hizo con el fin de capturar las diferencias en las concentraciones de NO<sub>2</sub> en relación con el tráfico vehicular y otros factores en diversas partes de la ciudad.

El equipo utilizado para la recolección de datos fue el Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40. Este equipo se configuró de manera específica para medir las concentraciones de NO<sub>2</sub> en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo que es una unidad de medida ampliamente reconocida y aceptada en la comunidad científica y regulatoria. La elección de esta unidad de medida garantizó que los resultados fueran fácilmente comparables con estándares y regulaciones tanto a nivel nacional como internacional.

La precisión del equipo Serinus 40 fue excepcional, con una variación mínima de solo 0.4 partes por mil millones (ppb) o el 0.5% de la lectura, lo que sea mayor. Esta alta precisión aseguró la fiabilidad de las mediciones y la capacidad de detectar incluso las fluctuaciones más pequeñas en las concentraciones de NO<sub>2</sub>. La resolución del equipo fue de 0.001 µg/m<sup>3</sup>, lo que permitió la captura de detalles muy finos en los datos.

Para garantizar la obtención de datos a alta resolución temporal y poder analizar patrones temporales específicos, el equipo se configuró para recopilar datos en promedios de un minuto. Esta frecuencia de muestreo resultó ser fundamental para identificar cambios horarios, diarios y espaciales en las concentraciones de NO<sub>2</sub>.

La elección de tres años para la duración de la investigación permitió capturar no solo patrones diarios y horarios, sino también tendencias diversas en función al punto de monitoreo. Esto es esencial para comprender cómo las concentraciones de NO<sub>2</sub> pueden variar a lo largo los años y el lugar de medida, lo que es valioso para abordar cuestiones medioambientales a largo plazo.

Es importante destacar que, para garantizar la integridad y la seguridad de los datos recopilados, se implementaron sólidas medidas de respaldo. Los datos se almacenaron en más de una unidad de estado sólido (SSD) externa, lo que aseguró la protección y la preservación de esta información crítica.

En conjunto, esta extensa recopilación de datos proporciona una base sólida para el análisis y la discusión subsiguientes en esta investigación. Los resultados obtenidos no solo abarcan una variedad de entornos urbanos, sino que también se benefician de la alta precisión y resolución temporal del equipo de monitoreo utilizado.

#### **4.12. Procesamiento de datos de NO<sub>2</sub>**

Es La etapa de procesamiento de los datos de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se llevó a cabo de manera meticulosa y estructurada, asegurando que la información recopilada se convirtiera en datos útiles y manejables para su posterior análisis. El proceso involucró varias fases fundamentales mostradas gráficamente en la figura 8 y posteriormente detallada paso a paso.

**Figura 8.**  
*Procesamiento de Datos*



*Nota:* Imagen Propia

### **Primer paso: Almacenamiento de Datos en Formato .TXT**

Cada día de recolección de datos generó un archivo en formato de documento de texto (.TXT). Estos archivos contenían las mediciones continuas de NO<sub>2</sub> realizadas por el Analizador Automático de Óxidos de Nitrógeno Serinus 40.

### **Segundo paso: Transferencia a una Unidad SSD Externo**

Para garantizar la seguridad y la integridad de los datos, estos archivos de formato .TXT se transfirieron desde el equipo de monitoreo a una unidad de estado sólido externo (SSD) mediante un conector USB. Esta medida sirvió como respaldo y protección de la información crítica obtenida.

### **Tercer paso: Procesamiento en Microsoft Excel**

Una vez que los datos se almacenaron en la unidad SSD, se procedió a su procesamiento y organización. Para esto, se utilizó el programa de hojas de cálculo Microsoft Excel, que proporcionó una plataforma versátil y potente para manejar los datos.

### **Cuarto paso: Organización de los Datos en Excel**

En Excel, se llevó a cabo un proceso de delimitación de datos mediante el cual los valores separados por comas en los archivos .TXT se asignaron a columnas específicas. Esta acción aseguró que los datos se organizaran en columnas según el protocolo de la hoja de cálculo.

### **Quinto paso: Selección de Columnas Requeridas**

Un paso crítico en la preparación de los datos fue la selección de las columnas pertinentes para la evaluación de NO<sub>2</sub>. Esto se realizó en concordancia con el manual del equipo Serinus 40, que proporcionó directrices claras sobre la organización de los datos. De acuerdo con el manual, la Concentración de gas calculada que se muestra en la pantalla frontal

(por ejemplo, NO<sub>2</sub>) se encontraba en la columna número 52. En conjunto, se eligieron las columnas B y C para la fecha y la hora, respectivamente.

#### **Sexto paso: Organización Final en la Hoja de Cálculo Excel**

El resultado final de este proceso fue una hoja de cálculo de Excel donde los datos de NO<sub>2</sub> se estructuraron de manera efectiva. La primera columna se dedicó a la fecha, la segunda a la hora y la tercera a las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Este formato proporcionó una visión clara y ordenada de los datos que permitiría un análisis más eficiente y significativo.

#### **4.13. Análisis de datos**

La fase de análisis e interpretación de los datos recopilados de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) representa un componente esencial de esta investigación. Con el fin de obtener una comprensión profunda de la calidad del aire en la Ciudad de Cusco y cómo se relaciona con la movilidad vehicular, se llevaron a cabo análisis rigurosos que abarcaron tanto la representación gráfica de los datos como la comparación con estándares y regulaciones establecidos a nivel nacional e internacional.

#### **Análisis Gráfico de Datos en Python**

La visualización de datos es una herramienta fundamental en la exploración y comprensión de conjuntos de datos complejos. Para abordar esta tarea, se empleó Python, un lenguaje de programación altamente versátil y de código abierto que se ha convertido en un pilar en el campo del análisis de datos. En esta investigación, Python desempeñó un papel esencial en la generación de gráficos que representaban la concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo y la ubicación.

Los gráficos obtenidos proporcionaron una vista clara y visualmente accesible de las tendencias temporales y espaciales en las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Esto fue crucial para observar patrones emergentes y evaluar el impacto de la movilidad vehicular en la calidad del aire en distintas áreas de la ciudad. Para este fin, se calcularon promedios diarios para cada ubicación de monitoreo. Este proceso permitió identificar picos de contaminación, cambios estacionales y tendencias a lo largo de los años de medición.

#### **Comparación con Estándares y Regulaciones**

La interpretación de los datos no se limitó únicamente a la representación gráfica. Se procedió a comparar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental

(ECA) del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) y las normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en diferentes momentos.

En el primer nivel de comparación, se evaluó el promedio diario de NO<sub>2</sub> en cada punto de monitoreo con los ECA del MINAM de 2017. Además, se hizo referencia a las directrices de la OMS para la calidad del aire en 2006 y 2021, que establecían limitaciones para la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire ambiente. Esta comparación permitió determinar si las concentraciones de NO<sub>2</sub> en los lugares de monitoreo cumplían con los estándares de calidad establecidos por estas instituciones tanto a nivel nacional como internacional.

Para lograr una evaluación más detallada de la calidad del aire en cada punto de monitoreo, se seleccionó el día más contaminado en función del promedio diario. Este día representativo se comparó con los ECA del MINAM en 2017 y las normas de la OMS de 2006 y 2021 para la media de una hora. También se evaluó la concentración de NO<sub>2</sub> según la media de 24 horas de la OMS en 2021.

Este enfoque permitió identificar situaciones críticas en las que las concentraciones de NO<sub>2</sub> superaron significativamente los límites de calidad del aire en puntos específicos de la ciudad. La selección del día más contaminado se basó en la premisa de que este representaría el escenario más desafiante para la salud pública. La comparación con los estándares tanto nacionales como internacionales arrojó luz sobre los niveles de contaminación en la Ciudad de Cusco y las posibles implicaciones para la salud de sus habitantes.

### **Herramientas de Análisis y Generación de Gráficos en Python**

La generación de gráficos en Python fue una tarea significativa para el análisis de datos. Se implementaron bibliotecas y herramientas específicas de Python para este propósito. El código Python desarrollado permitió crear gráficos que presentaban claramente las concentraciones de NO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo y en función de la ubicación.

El análisis de datos en Python no se limitó a la generación de gráficos, también abarcó la aplicación de medidas de tendencia central y de dispersión. Estas medidas, como los promedios y las desviaciones estándar, proporcionaron información detallada sobre la variabilidad de las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Esta variabilidad es crucial para comprender cómo los niveles de NO<sub>2</sub> fluctúan a lo largo del tiempo y en diferentes puntos de monitoreo.

## CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Resultados

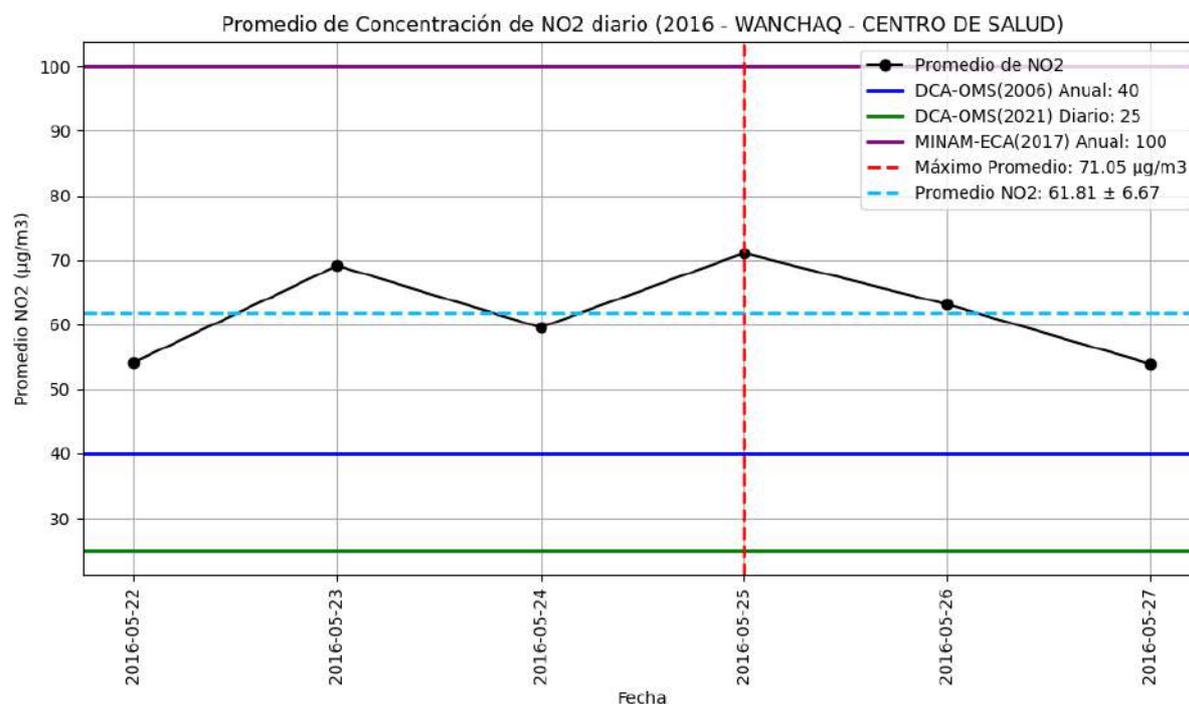
A continuación, se presentan los resultados de concentración de NO<sub>2</sub> obtenidos para cada punto de monitoreo a lo largo de tres años de mediciones (Anexo 14). Se han creado dos gráficos para cada punto de monitoreo, los que permiten comparaciones espacio-temporales significantes.

#### 5.1.1. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en Wanchaq - Centro de Salud – 2016

Entre las fechas del 22/05/2016 al 26/05/2016, se trasladó el refugio de monitoreo ambiental con el analizador de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) al Centro de Salud de Wanchaq, lo que permitió cinco días consecutivos de mediciones continuas. En pro de obtener una muestra representativa de este emplazamiento, se seleccionaron y procesaron un total de 7922 datos válidos para la evaluación del NO<sub>2</sub>.

#### Figura 9.

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - WANCHAQ - CENTRO DE SALUD)*



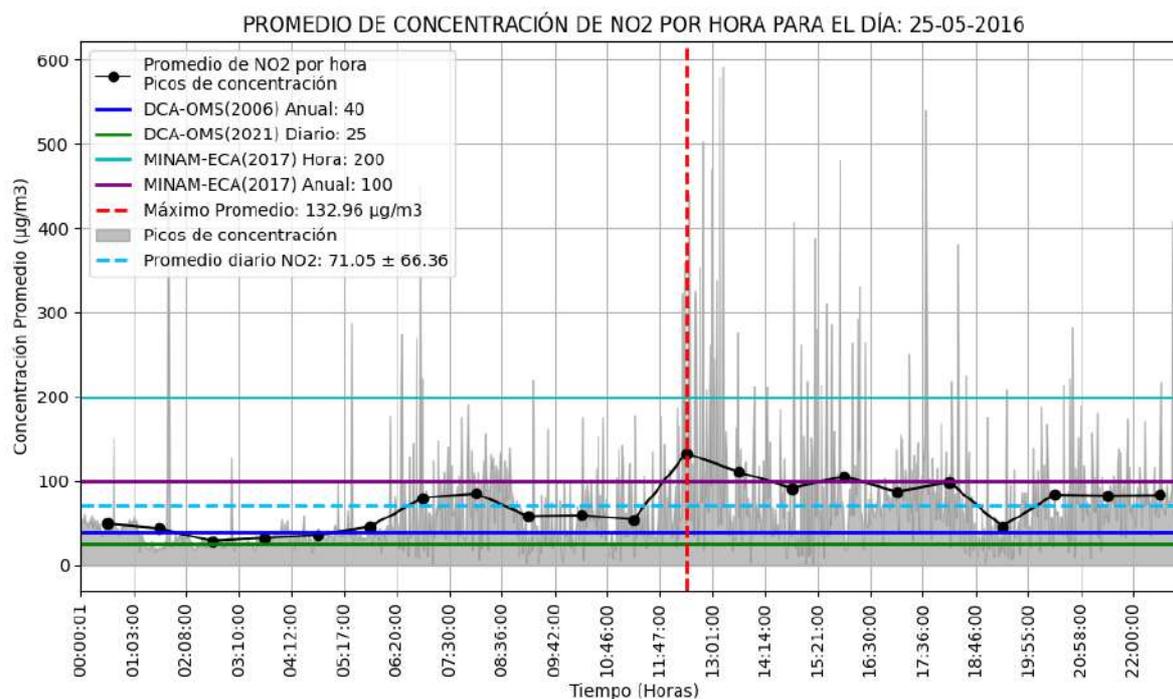
*Nota:* Imagen Propia

La Figura 9 representa la concentración promedio de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a lo largo de un período de cinco días de medición continua. Se identificó un valor máximo en el gráfico de 71.05 µg/m<sup>3</sup>, registrado el 25 de mayo de 2016.

Al analizar los datos a la luz de las normativas vigentes en el momento de la medición y las actuales, se evidencia que el valor promedio de  $\text{NO}_2$ , el cual asciende a  $61.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , supera el límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. Además, el promedio diario de  $\text{NO}_2$  durante el período de los cinco días excede el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definido por la OMS en 2021.

### Figura 10.

*Promedio de concentración de  $\text{NO}_2$  por hora día: 25-05-2016*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 10 se concentra en la evaluación de los picos promedios de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) registrados el 25 de mayo de 2016. En este día en particular, se identificó un promedio de  $71.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que sobresale en el contexto de las mediciones realizadas durante este período.

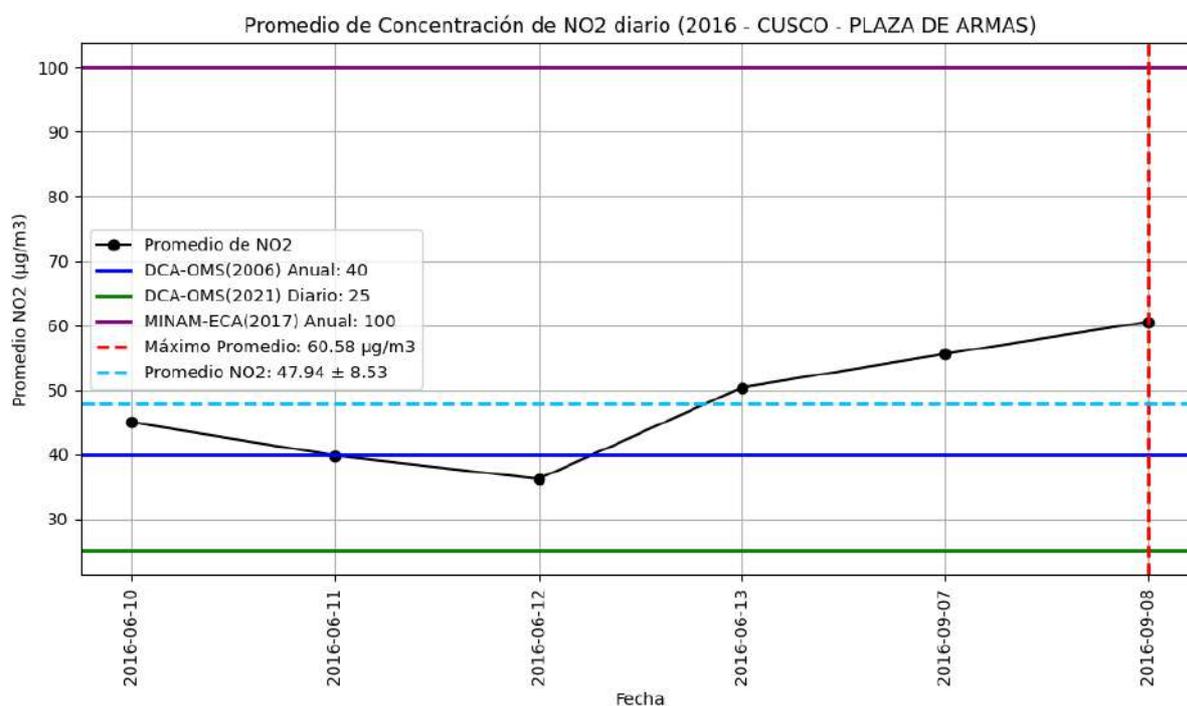
Al analizar estos datos en concordancia con las normativas ambientales vigentes en el momento de la medición y las normas actuales, se revela una perspectiva significativa. El pico máximo diario de  $\text{NO}_2$  en este día específico excede considerablemente el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2021. Además, si consideramos el límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la OMS en 2006, el pico del promedio máximo se ubica muy por encima de este umbral, a su vez se aprecia que según los picos de concentración muchos de estos llegaron a sobrepasar los límites horarios de los ECA definido por el MINAM.

### 5.1.2. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plaza de Armas – 2016

Entre las fechas del 10/06/2016 al 13/06/2016, y posteriormente, los días 7/09/2016 y 8/09/2016, se realizaron mediciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la Plaza de Armas de Cusco. Un total de 7546 datos válidos se obtuvieron y procesaron con el objetivo de evaluar la concentración de NO<sub>2</sub> en este emplazamiento.

#### Figura 11.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - CUSCO - PLAZA DE ARMAS)*



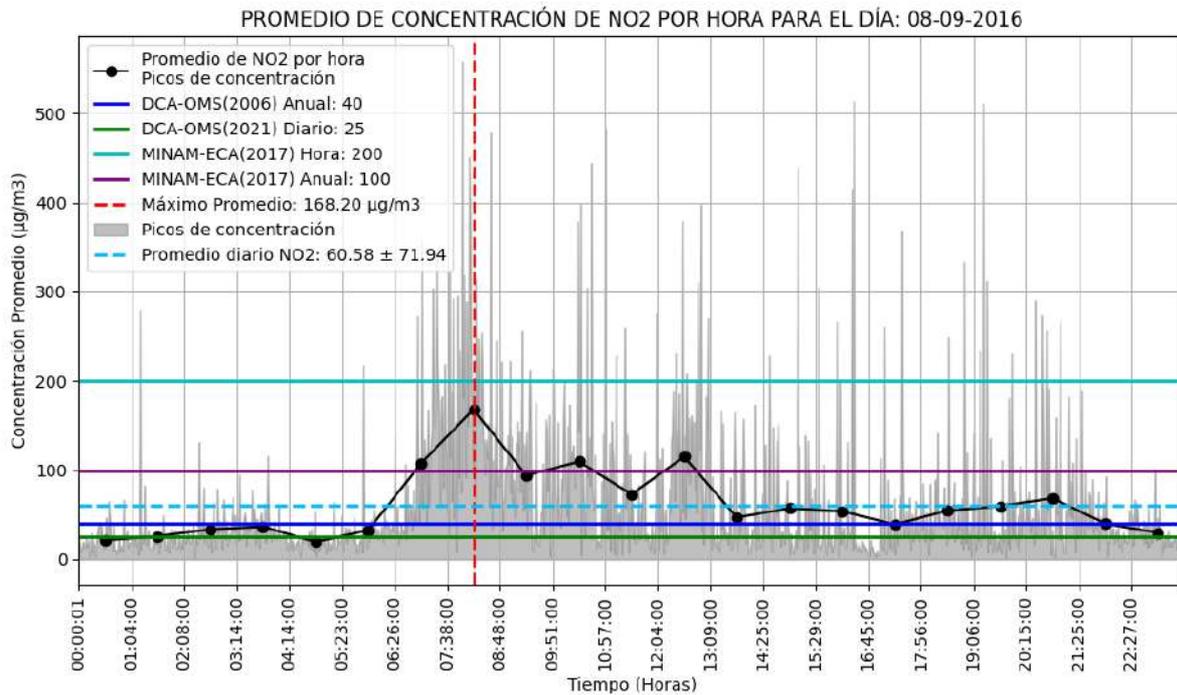
*Nota:* Imagen Propia

La Figura 11 representa la concentración promedio de NO<sub>2</sub> a lo largo de los dos períodos de medición. El promedio de NO<sub>2</sub> durante este tiempo se registró en 47.94 µg/m<sup>3</sup>, con un valor máximo de 60.58 µg/m<sup>3</sup>.

Cuando se analizan los datos en comparación con las normativas ambientales aplicables, se observa que el valor promedio de NO<sub>2</sub>, 47.94 µg/m<sup>3</sup>, está por encima del límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. Del mismo modo, el valor máximo de 60.58 µg/m<sup>3</sup> excede en aproximadamente 2.42 veces el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la OMS en 2021.

**Figura 12.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 08-09-2016*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 12 se enfoca en el análisis del promedio diario de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) registrado el 8 de septiembre de 2016. En este día particular, se identificó un promedio de 60.58 µg/m<sup>3</sup>. Este valor, en su mayoría, se mantiene por encima de los límites establecidos por las normativas tanto en 2006 como en 2021.

Cuando se evalúa estos datos en relación con las normativas ambientales, se revela una perspectiva significativa. El promedio diario de NO<sub>2</sub> excede notablemente el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2021. Además, si consideramos el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la OMS en 2006, este promedio se encuentra constantemente por encima de dicho umbral.

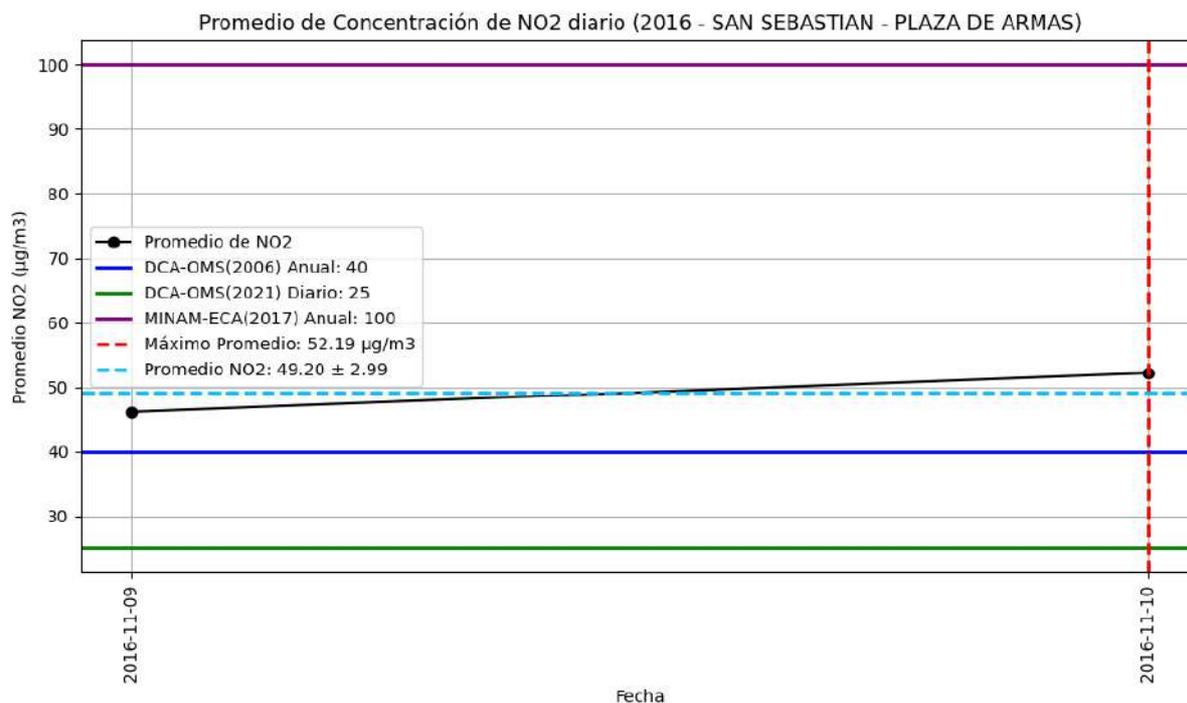
Es importante señalar que, si bien la evaluación principal se realiza en función del promedio diario, también se debe destacar que hubo momentos durante este día en que se registraron picos de concentración que superaron algunos de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) definidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) en 2017. Estos picos, aunque de corta duración, indican que hubo episodios de exposición a niveles peligrosos de NO<sub>2</sub> durante el día.

### 5.1.3. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastian - Plaza de Armas – 2016

Entre las fechas del 9/11/2016 al 10/11/2016, se llevó a cabo el monitoreo continuo de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la Plaza de Armas de San Sebastián. Durante este período, se procesaron un total de 2597 datos válidos para la evaluación de NO<sub>2</sub>.

#### Figura 13.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - SAN SEBASTIAN - PLAZA DE ARMAS)*



*Nota:* Imagen Propia

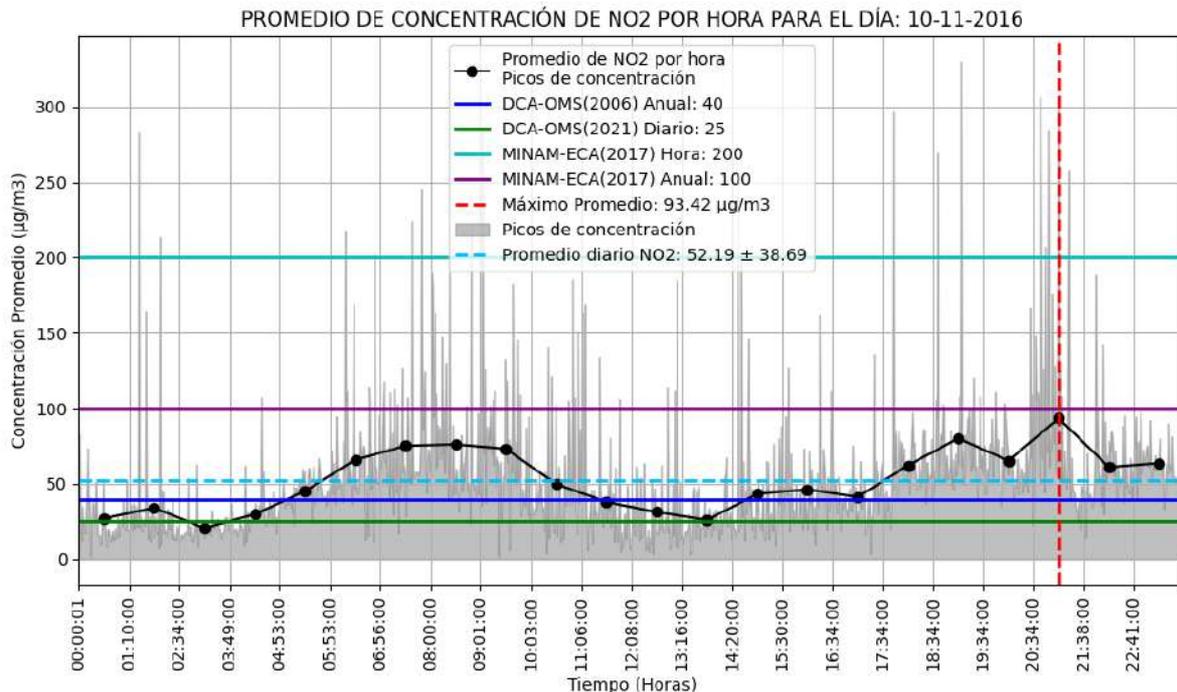
La Figura 13 representa la concentración promedio de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a lo largo de estos dos días de medición continua. El valor máximo registrado en el gráfico fue de 52.19 µg/m<sup>3</sup>.

Al evaluar estos datos en comparación con las normativas vigentes, se observa que el valor promedio de NO<sub>2</sub>, que es de 49.20 µg/m<sup>3</sup>, supera el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. Además, el valor máximo registrado está por encima del límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la OMS en 2021.

Estos resultados indican que la concentración de NO<sub>2</sub> en la Plaza de Armas de San Sebastián durante el período de medición excede los límites establecidos.

**Figura 14.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 10-11-2016*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 14 se enfoca en la evaluación del promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 10 de noviembre de 2016 en función del ECA del MINAM (hora), que es de 200 µg/m<sup>3</sup>.

Al analizar estos datos, observamos que el promedio de NO<sub>2</sub> para ese día específico es de 52.19 µg/m<sup>3</sup>, lo que está por debajo del límite del MINAM para concentraciones horarias, lo que indica que, durante las horas de ese día, la calidad del aire cumplió con los estándares del MINAM.

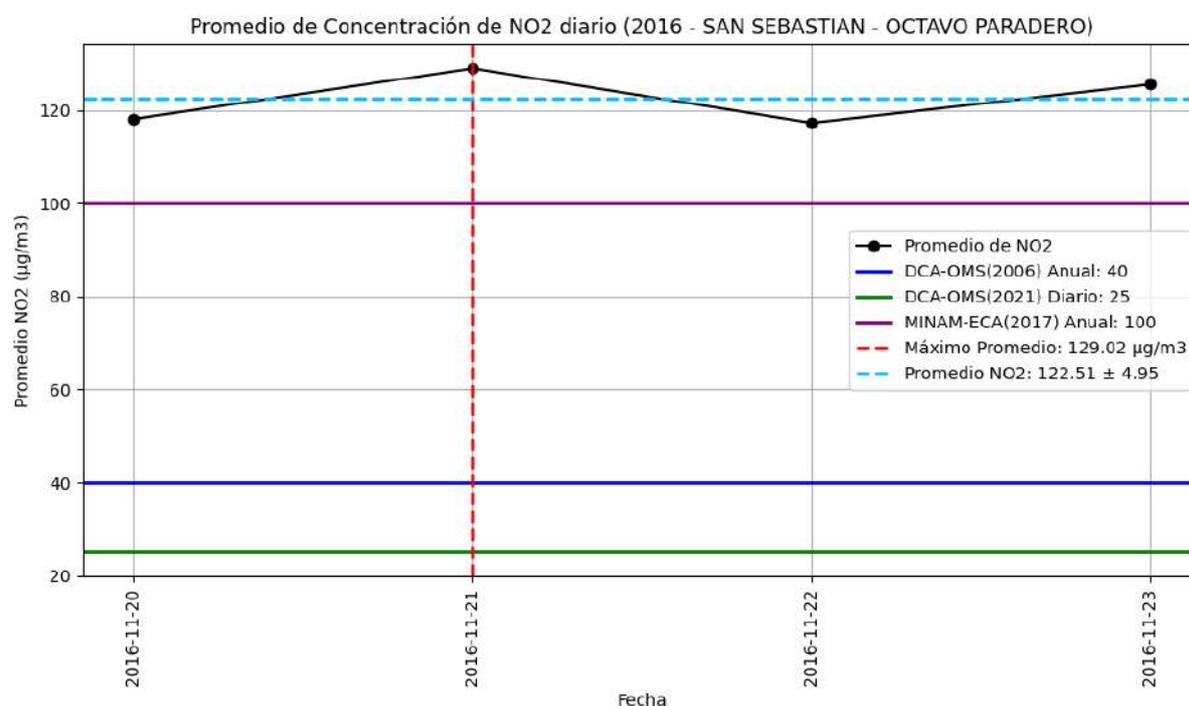
Sin embargo, cuando consideramos los límites de la OMS, tanto el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> como el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup>, el promedio de NO<sub>2</sub> supera ambos estándares. Además, se identifican picos de concentración que sobrepasan todos los DCA, lo que indica que, aunque el promedio horario era aceptable, hubo momentos de alta concentración de NO<sub>2</sub> en el aire. El pico máximo promedio alcanzó 93.42 µg/m<sup>3</sup>, lo que es considerablemente más alto que los límites establecidos.

#### 5.1.4. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastian - Octavo Paradero (Av. De la Cultura) – 2016

Durante el período comprendido entre el 20/11/2016 y el 23/11/2016, se realizó una evaluación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el Octavo Paradero de San Sebastian (Av. De la Cultura). En el lapso de este tiempo, se evaluaron un total de 4,086 datos válidos para su análisis.

#### Figura 15.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - SAN SEBASTIAN - OCTAVO PARADERO)*



*Nota:* Imagen Propia

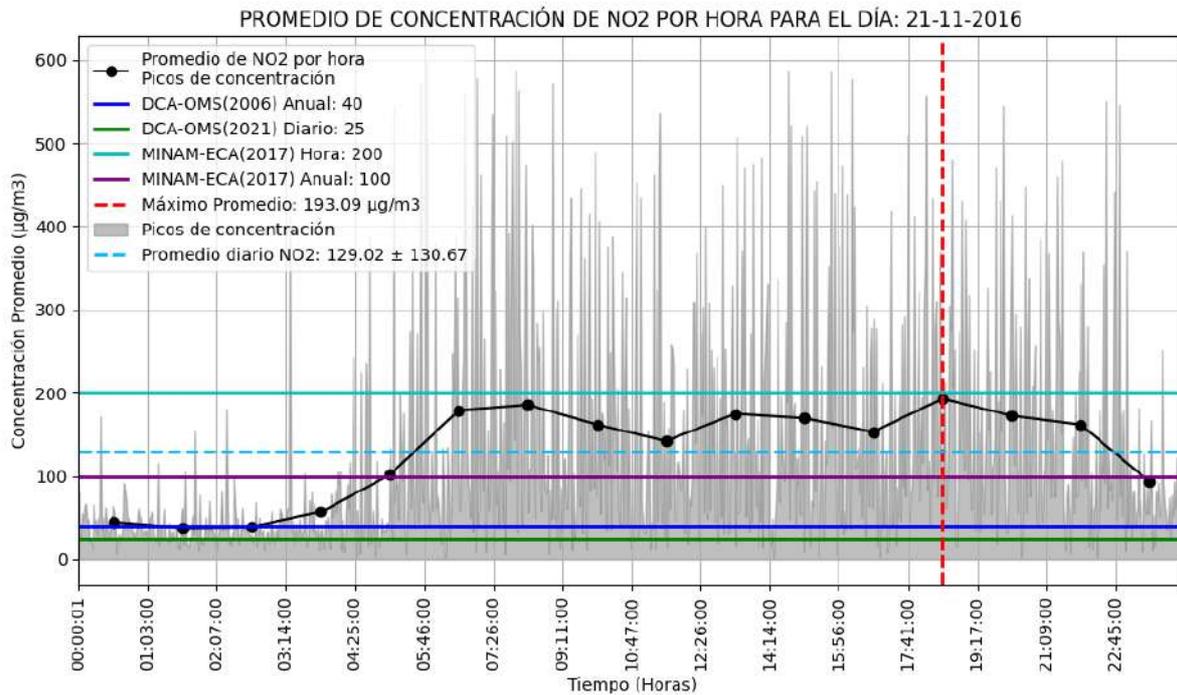
La Figura 15 muestra la concentración promedio de NO<sub>2</sub> en este sitio. Se identificó un valor máximo en el gráfico de 129.02 µg/m<sup>3</sup>, registrado el 21/11/2016.

Al analizar los datos a la luz de las normativas vigentes, se encuentra que el valor promedio de NO<sub>2</sub> en este lugar es de 122.51 µg/m<sup>3</sup>, lo que supera significativamente el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, el valor promedio diario de NO<sub>2</sub> durante este período excede el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la OMS en 2021.

Estos resultados indican que la concentración de NO<sub>2</sub> en el Octavo Paradero de San Sebastian (Av. De la Cultura) en este período de tiempo estuvo muy elevada y por encima de los ECA del MINAM y los DCA de la OMS.

**Figura 16.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 21-11-2016*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 16 se centra en la evaluación del promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 21 de noviembre de 2016 en función del ECA del MINAM (hora), que es de 200 µg/m<sup>3</sup>.

El análisis de estos datos revela que el promedio de NO<sub>2</sub> para este día específico es de 129.02 µg/m<sup>3</sup>, lo que indica que se mantiene por debajo del límite del MINAM para concentraciones horarias de 200 µg/m<sup>3</sup>. Esto sugiere que durante ese día, la calidad del aire cumplió con los estándares de calidad definidos por el MINAM en lo que respecta a concentraciones horarias.

Sin embargo, al considerar los límites de la OMS, tanto el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> como el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup>, se observa que el promedio de NO<sub>2</sub> supera ampliamente ambos estándares.

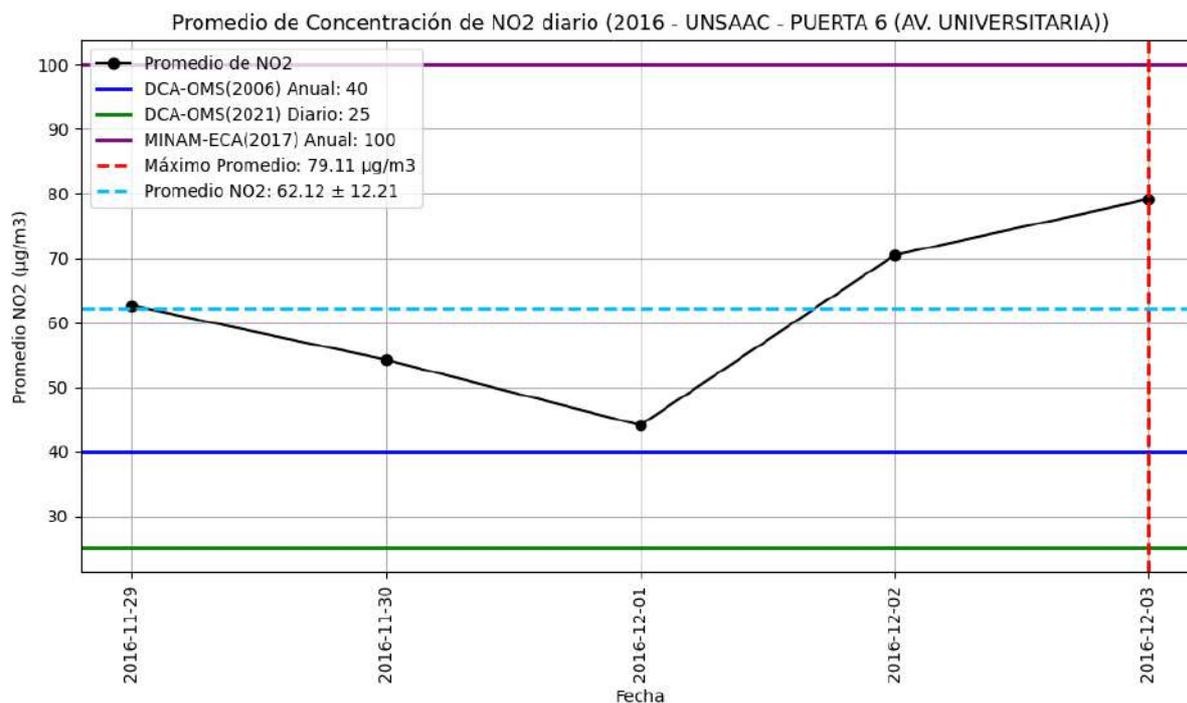
Además, es importante mencionar que se registraron muchos picos de concentración que superaron el valor del ECA en diferentes momentos del día. Aunque el promedio se mantuvo por debajo del ECA horario del MINAM, el pico máximo se acercó a este límite, lo que indica que la calidad del aire puede haber variado significativamente durante el día.

### 5.1.5. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en UNSAAC - Puerta 6 (Av. Universitaria) – 2016

Entre el 29/11/2016 y el 3/12/2016, se realizó una evaluación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la Puerta número 6 de la UNSAAC (Av. Universitaria). Se evaluaron un total de 5,468 datos válidos para su representación gráfica y analítica.

#### Figura 17.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2016 - UNSAAC - PUERTA 6 (AV. UNIVERSITARIA))*



*Nota:* Imagen Propia

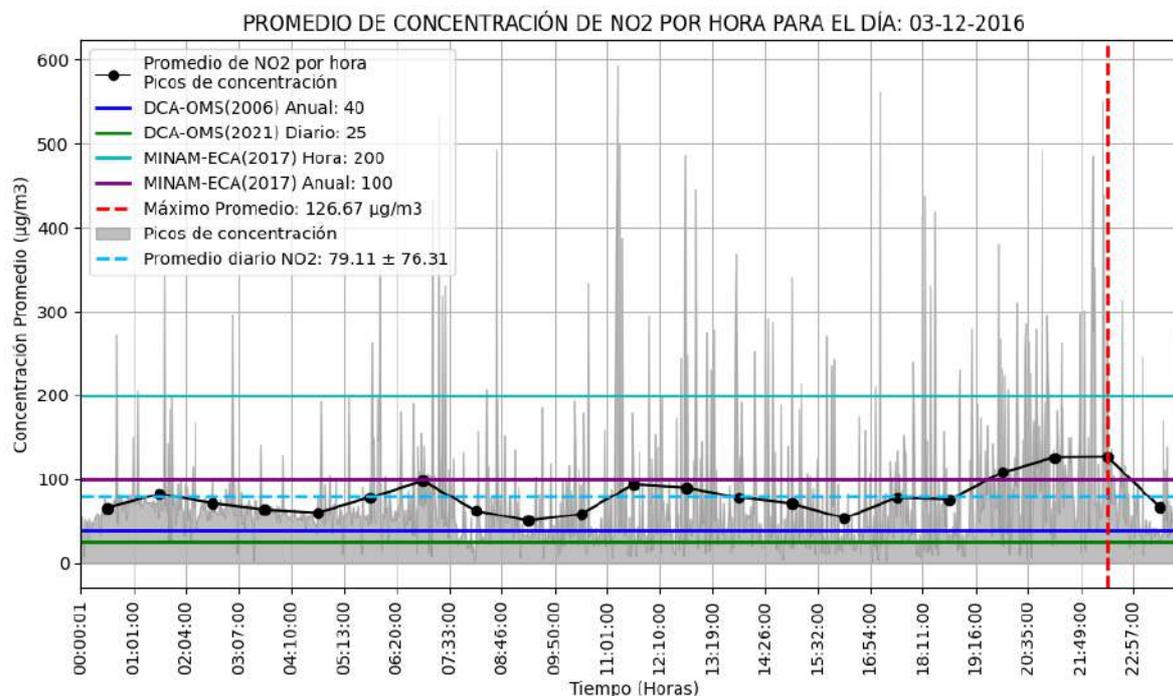
La Figura 17 presenta la concentración promedio de NO<sub>2</sub> durante este período de tiempo. Se observa que el valor máximo promedio en el gráfico fue de 79.11 µg/m<sup>3</sup>, registrado el 3/12/2016.

Al analizar estos datos en el contexto de las normativas, se encuentra que el valor promedio de NO<sub>2</sub>, que alcanza 62.12 µg/m<sup>3</sup>, está por encima del límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, el promedio diario de NO<sub>2</sub> durante el período excede el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la OMS en 2021. El valor máximo promedio registrado el 3/12/2016, de 79.11 µg/m<sup>3</sup>, es particularmente alto y sugiere una exposición significativa.

Estos datos indican que la concentración de NO<sub>2</sub> en la Puerta número 6 de la UNSAAC (Av. Universitaria) durante este período de tiempo es elevada.

**Figura 18.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 03-12-2016*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 18 se enfoca en el análisis del promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 3 de diciembre de 2016 en función de los límites establecidos por la OMS y el MINAM (hora).

Para este día específico, el promedio de NO<sub>2</sub> es de 79.11 µg/m<sup>3</sup>. En comparación con el ECA del MINAM para concentraciones horarias de 200 µg/m<sup>3</sup>, se observa que este valor está por debajo de dicho límite. Esto sugiere que, durante el 3 de diciembre de 2016, la calidad del aire cumplió con los estándares de calidad definidos por el MINAM en lo que respecta a concentraciones horarias.

Sin embargo, cuando se consideran los límites de la OMS, tanto el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> como el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup>, se observa que el promedio de NO<sub>2</sub> supera significativamente ambos estándares. Esto indica que la calidad del aire durante ese día no cumplió con las normativas internacionales de calidad del aire establecidas por la OMS.

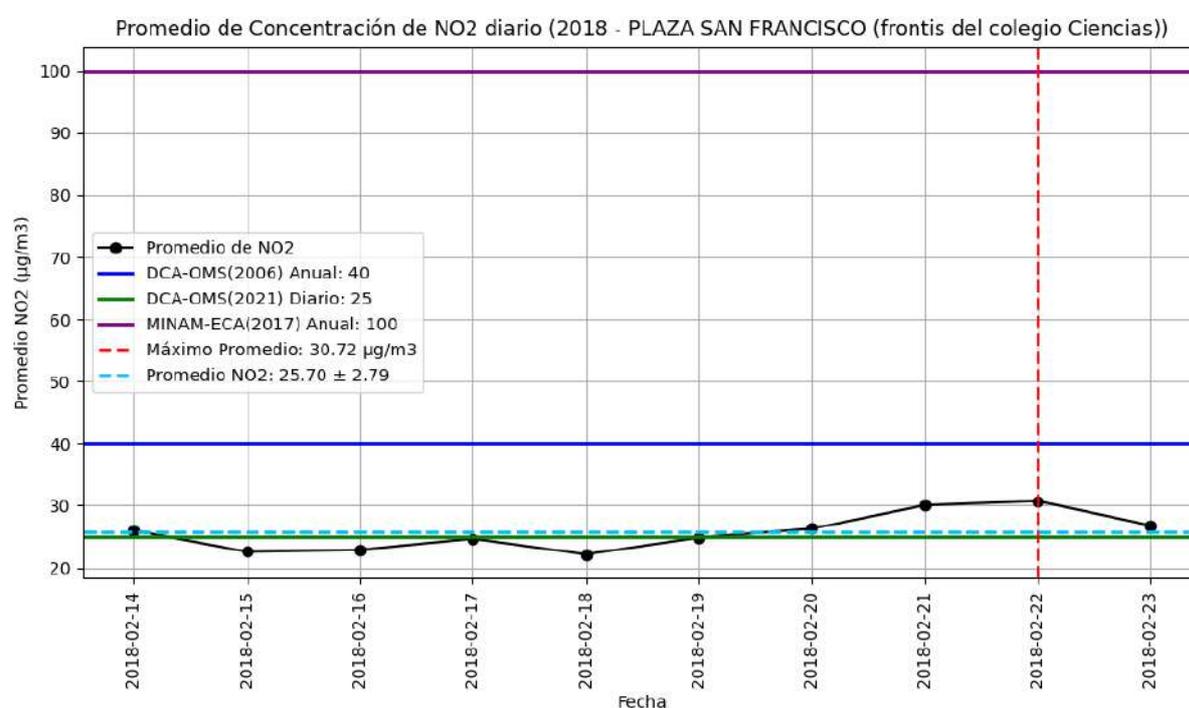
Además, se registraron numerosos picos de concentración en diferentes momentos del día que superaron el valor del ECA horario del MINAM. Aunque el promedio se mantuvo por debajo del ECA horario del MINAM, esto sugiere que la calidad del aire varió a lo largo del día, y en algunos momentos, la concentración de NO<sub>2</sub> superó los límites establecidos.

### 5.1.6. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - Plaza San Francisco (Frontis del Colegio Ciencias) – 2018

Durante el período que abarca desde el 14 de febrero de 2018 hasta el 23 de febrero de 2018, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el área de Plaza San Francisco, específicamente en el frontis del Colegio Ciencias. Se recopilaron y procesaron un total de 13,330 mediciones válidas para llevar a cabo un análisis detallado de la calidad del aire en esta ubicación durante estos diez días.

#### Figura 19.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZA SAN FRANCISCO (frontis del colegio Ciencias))*



*Nota:* Imagen Propia

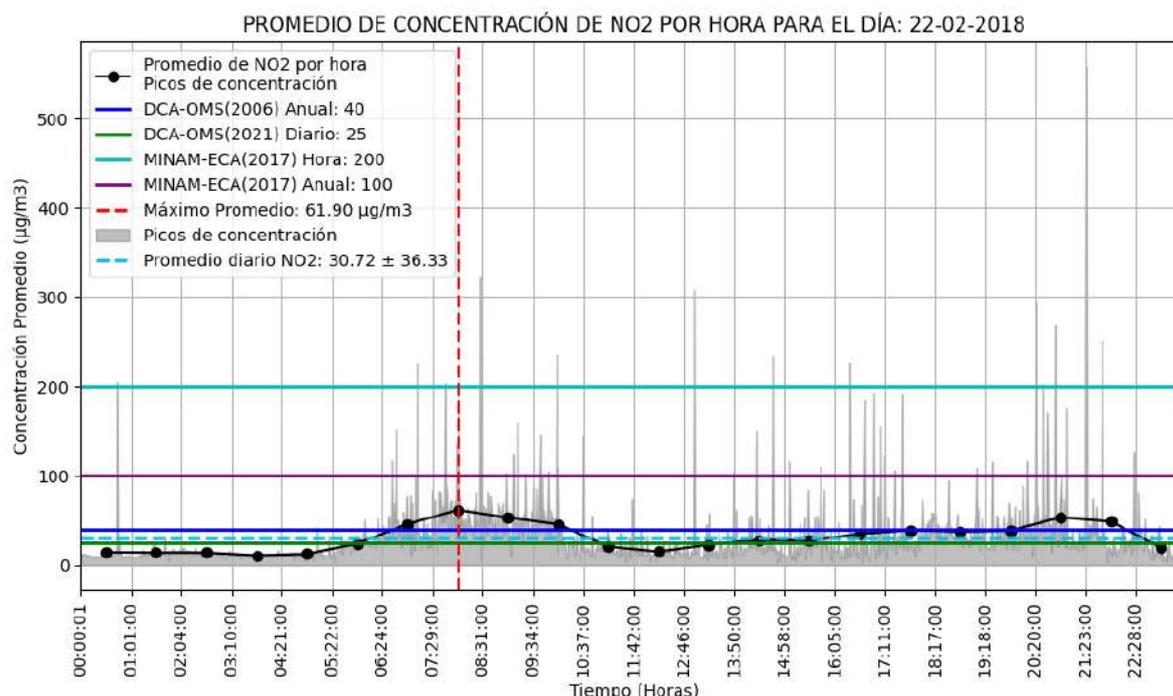
La Figura 19 representa la concentración promedio de NO<sub>2</sub> durante este período de tiempo. Se observa que se alcanzó un valor máximo promedio de 30.72 µg/m<sup>3</sup> el 22 de febrero de 2018.

Cuando se analizan estos datos a la luz de las normativas, se destaca que el valor promedio de NO<sub>2</sub> es de 25.70 µg/m<sup>3</sup>. Este valor supera ligeramente el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2021. Además, este valor es inferior al límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la OMS en 2006, lo que sugiere que la concentración de NO<sub>2</sub> en el área de Plaza San Francisco cumple con los estándares anuales internacionales.

Sin embargo, como el valor máximo promedio registrado el 22 de febrero de 2018, de  $30.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , supera el límite diario de la OMS ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), indica que, a pesar de mantenerse dentro de los límites anuales establecidos por la OMS, hubo más de un pico de concentración que excedió el estándar diario, lo que tiene implicaciones para la calidad del aire en el punto de monitoreo.

### Figura 20.

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 22-02-2018*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 20 se centra en la evaluación del promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 22 de febrero de 2018 en función de los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y los DCA de la OMS.

Durante este día en particular, se registró un promedio de NO<sub>2</sub> de  $30.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se compara con el ECA horario del MINAM, que es de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aquí, observamos que el promedio de NO<sub>2</sub> está significativamente por debajo del límite horario establecido por el MINAM, lo que indica que la calidad del aire en ese día cumplió con los estándares de calidad del aire en términos de concentraciones horarias.

En relación con las normativas de la OMS, el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la OMS, los valores de concentración de NO<sub>2</sub> se mantuvieron muchas horas dentro de los parámetros.

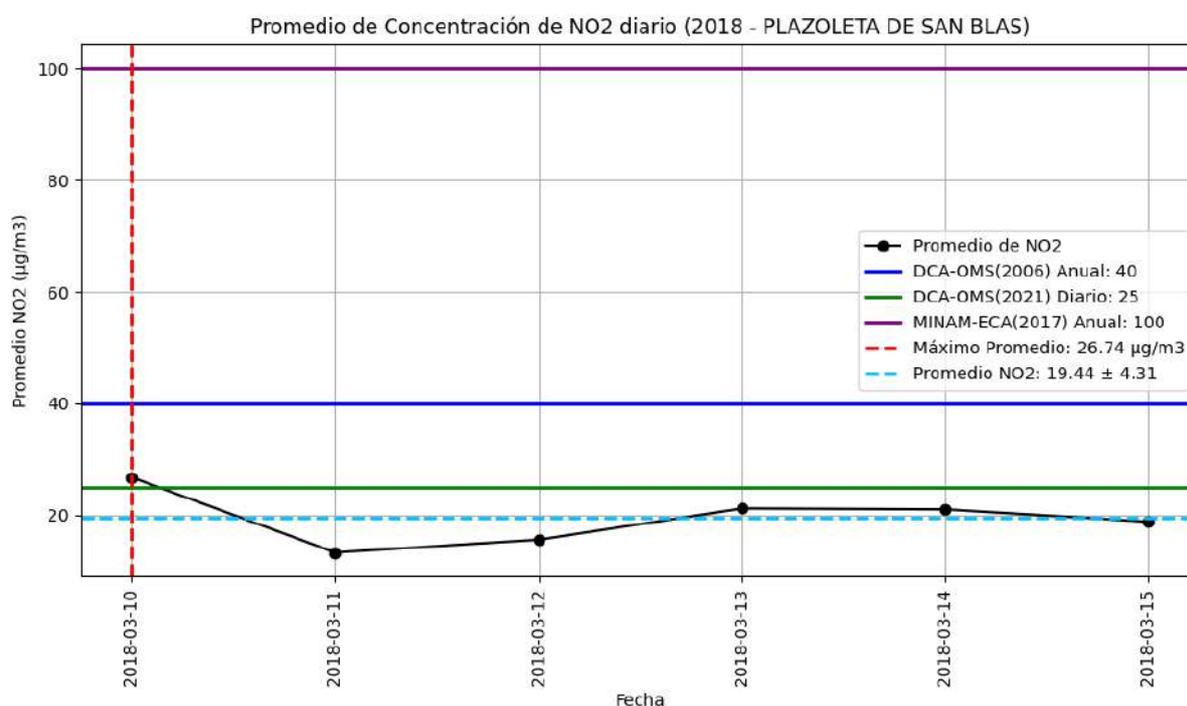
Aunque el promedio de NO<sub>2</sub> en este día específico es más bajo que los límites establecidos tanto por el MINAM como por la OMS, es importante destacar que el valor máximo promedio alcanzó 61.90 µg/m<sup>3</sup>. Esto significa que hubo momentos durante el día en que las concentraciones de NO<sub>2</sub> superaron significativamente los límites diarios de la OMS, a pesar de que el promedio diario se mantuvo por debajo de este umbral. Por lo tanto, la calidad del aire varió a lo largo del día, y hubo picos de concentración que superaron los límites diarios de la OMS.

### 5.1.7. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en Cusco - San Blas – 2018

Entre el 10 de marzo de 2018 y el 15 de marzo de 2018, se realizó la medición de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la plazoleta de San Blas, Cusco (frente al colegio el Carmelo). En este estudio, se procesaron un total de 8,147 mediciones válidas, lo que permitió una evaluación detallada de la calidad del aire en este lugar durante estos días.

#### Figura 21.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - PLAZOLETA DE SAN BLAS)*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 21 presenta la concentración promedio de NO<sub>2</sub> durante este período. Se observa que se alcanzó un valor máximo promedio de 26.74 µg/m<sup>3</sup> el 10 de marzo de 2018.

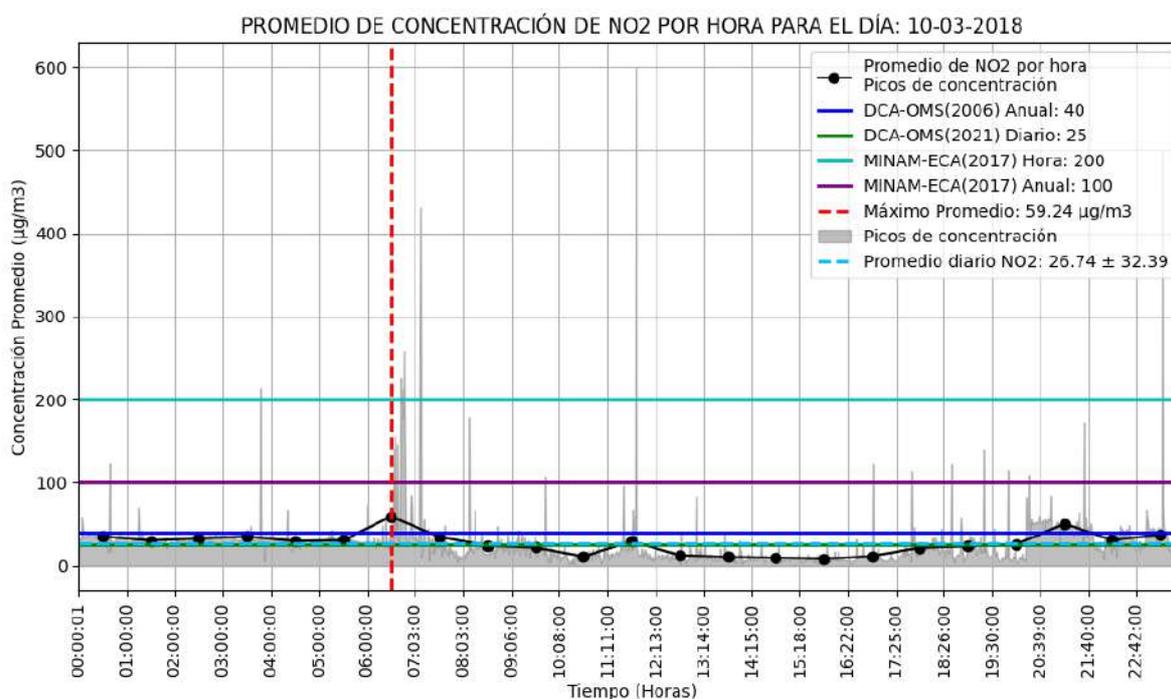
Cuando se analizan estos datos en comparación con las normativas internacionales vigentes, tanto en 2006 como en 2021, se destaca que el valor promedio de NO<sub>2</sub> es de 19.44

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se mantiene por debajo del límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. Además, cumple con el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definido por la OMS en 2021. Esto sugiere que la concentración de  $\text{NO}_2$  en San Blas se encuentra dentro de los estándares internacionales de calidad del aire.

Es relevante señalar que, aunque se registró un valor máximo promedio de  $26.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el 10 de marzo de 2018, este sigue estando dentro de los límites anuales establecidos por la OMS, lo que indica que, en general, la calidad del aire en esta ubicación se mantuvo en niveles aceptables durante este período.

### Figura 22.

*Promedio de concentración de  $\text{NO}_2$  por hora día: 10-03-2018*



*Nota:* Imagen Propia

En la Figura 22, se evalúa el promedio de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) el 10 de marzo de 2018 en función de los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de  $\text{NO}_2$  en este día específico fue de  $26.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se compara con el ECA horario del MINAM, que es de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aquí, se observa que el promedio de  $\text{NO}_2$  está muy por debajo del límite horario establecido por el MINAM. Esto indica que la calidad del aire durante el día 10 de marzo cumplió con los estándares de calidad del aire en términos de concentraciones horarias.

En cuanto a las directrices de la OMS, el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se superó en este día por un margen pequeño. Además, en cuanto al límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la OMS se mantuvo dentro de los parámetros.

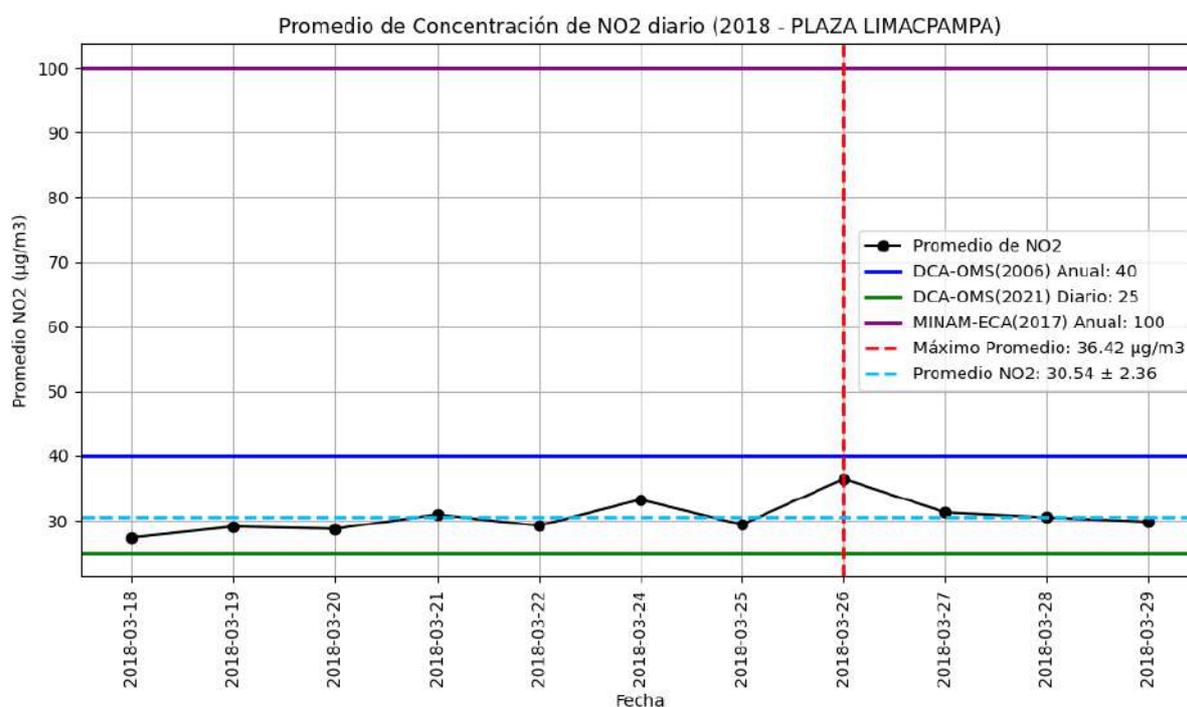
Sin embargo, es importante señalar que el valor máximo promedio de  $\text{NO}_2$  para este día alcanzó los  $59.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica que hubo momentos durante el día en los que las concentraciones de  $\text{NO}_2$  superaron significativamente los límites diarios de la OMS. En el análisis de los picos de concentración, se observa que la mayoría de los picos cercanos al pico del promedio máximo están por encima de los ECA, aunque el resto tiende a estar por debajo del ECA horario del MINAM.

### 5.1.8. Concentración de $\text{NO}_2$ en función del tiempo en Cusco - Plazoleta Limacpampa – 2018

Del 18 de marzo de 2018 al 29 de marzo de 2018, se realizó la evaluación continua de la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en la Plazoleta Limacpampa, Cusco. En este análisis, se procesaron un total de 14,558 mediciones válidas, lo que permitió una evaluación detallada de la calidad del aire en este lugar durante estos días.

#### Figura 23.

*Promedio de Concentración de  $\text{NO}_2$  diario (2018 - PLAZA LIMACPAMPA)*



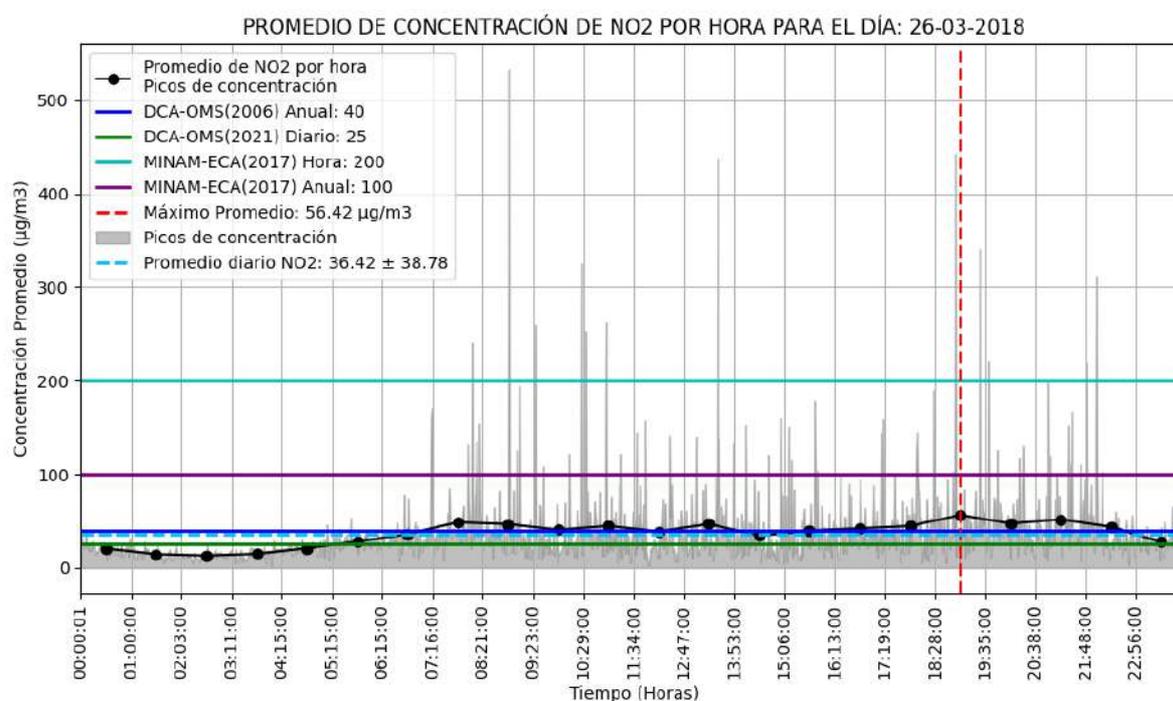
Nota: Imagen Propia

La Figura 23 presenta la concentración promedio de NO<sub>2</sub> durante este período. Se observa que se alcanzó un valor máximo promedio de 36.42 µg/m<sup>3</sup> el 26 de marzo de 2018.

Cuando se analizan estos datos en comparación con las normativas, se observa que el valor promedio de NO<sub>2</sub> es de 30.54 µg/m<sup>3</sup>. Este valor se mantiene por debajo del límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. Sin embargo, no cumple con el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> definido por la OMS en 2021. Esto sugiere que la concentración de NO<sub>2</sub> en Plazoleta Limacpampa se encuentra dentro de los estándares internacionales de calidad del aire anuales sin embargo ningún valor promedio diario logra estar ni siquiera cerca del promedio diario de las DCA de la OMS (2021).

### Figura 24.

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 26-03-2018*



*Nota:* Imagen Propia

La Figura 24 se centra en la evaluación de los picos promedios de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) registrados el 26 de marzo de 2018. En este día en particular, se identificó un promedio de 36.42 µg/m<sup>3</sup> que destaca en el contexto de las mediciones realizadas durante este período.

Al analizar estos datos en función de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) y las DCA de la OMS, se revelan algunas perspectivas significativas. El valor máximo promedio supera tanto el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> de la OMS en 2021 como el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> de la OMS en 2006.

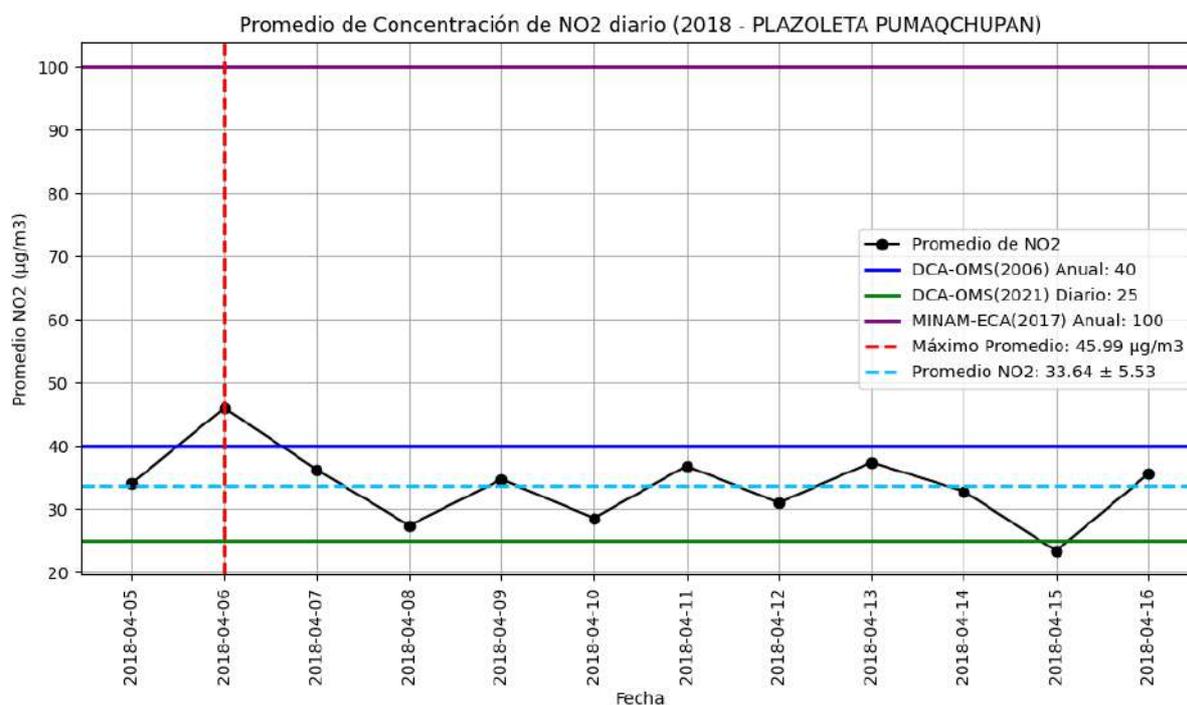
Además, si consideramos el ECA horario de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por el MINAM en 2017, muchos de los picos de concentración de minutos también superan este umbral, lo que indica que la calidad del aire en este día específico estuvo por encima de los estándares establecidos por minutos sin embargo ningún pico supero los ECA del MINAM del 2017.

### 5.1.9. Concentración de $\text{NO}_2$ en función del tiempo en Cusco - Plazoleta Pumaqchupan – 2018

Durante el período del 5 de abril al 16 de abril de 2018, se realizó un estudio exhaustivo para medir la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en la Plazoleta Pumaqchupan. Se recolectaron y evaluaron meticulosamente 15,370 datos válidos, lo que proporciona una imagen de la calidad del aire durante este intervalo de tiempo.

#### Figura 25.

*Promedio de Concentración de  $\text{NO}_2$  diario (2018 - PLAZOLETA PUMAQCHUPAN)*



*Nota:* Imagen Propia

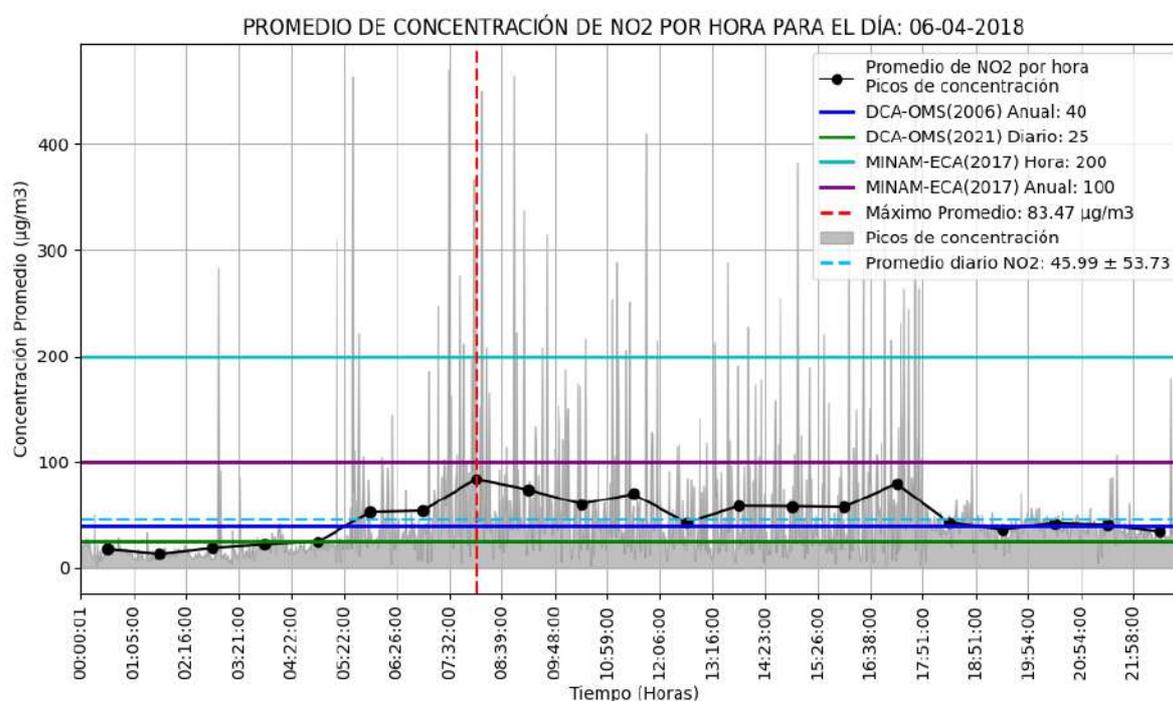
La Figura 25 representa el promedio de  $\text{NO}_2$  en este sitio durante el período de evaluación. Una comparación de estos resultados con las directrices de calidad del aire revela que el valor promedio de  $\text{NO}_2$  es de 33.64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor cumple con los estándares anuales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2006. No obstante, es importante señalar que supera el límite diario de 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  definido por la OMS en 2021. Esto

indica que, en promedio, la concentración de  $\text{NO}_2$  se mantiene dentro de los límites anuales, pero no cumple con las pautas diarias recomendadas por la OMS actuales.

Un aspecto relevante es el pico registrado el 6 de abril de 2018, con un valor máximo promedio de  $45.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor al igual que la mayoría de los promedios diarios de la evaluación de este punto de monitoreo, superan los límites diarios de la OMS, esto sugiere que, en términos generales, la calidad del aire en Plazoleta Pumaqchupan no se mantiene en niveles adecuados durante este período.

**Figura 26.**

*Promedio de concentración de  $\text{NO}_2$  por hora día: 06-04-2018*



*Nota:* Imagen Propia

La En la Figura 26, se analiza el promedio de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) durante el 6 de abril de 2018, considerando los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de  $\text{NO}_2$  en este día en particular fue de  $45.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cuando comparamos este valor con el ECA horario del MINAM, que es de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se observa que se encuentra por debajo de este límite, indicando que la calidad del aire se mantuvo dentro de los estándares de calidad del aire en términos de concentraciones horarias.

En relación a las normativas de la OMS, el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se superó en este día. No obstante, el límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la OMS se mantiene dentro de los parámetros, sugiriendo que el promedio anual de  $\text{NO}_2$  se adhiere a las normativas de la OMS.

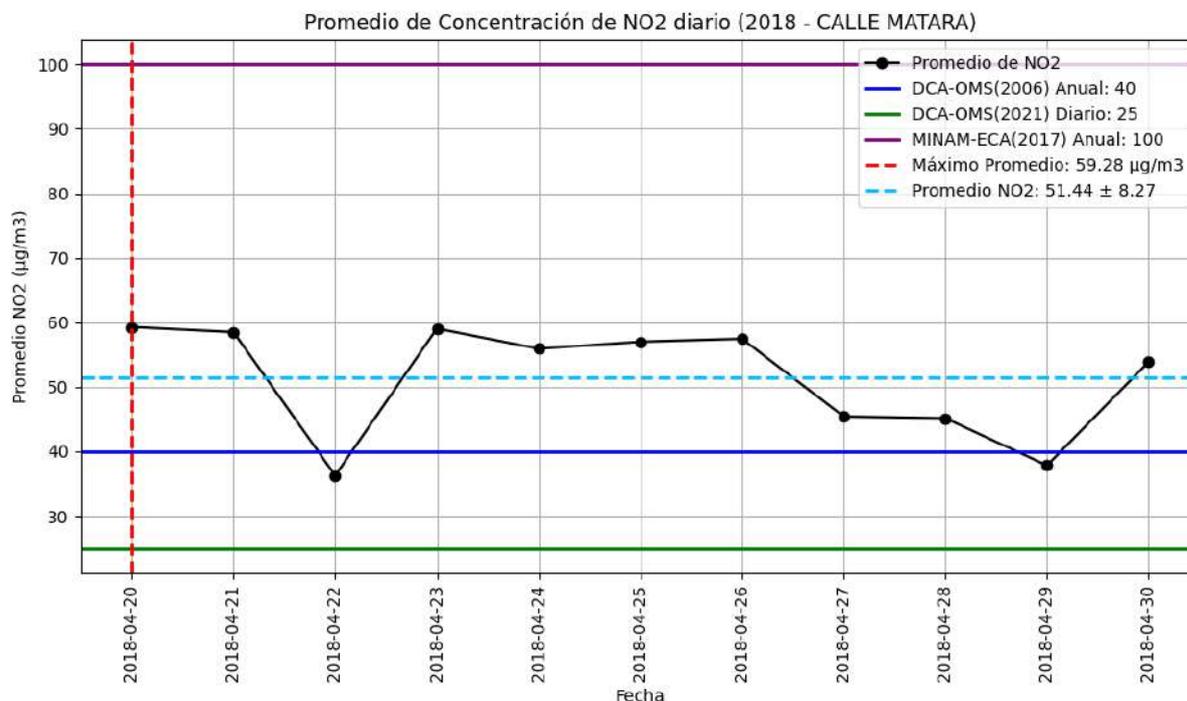
Es relevante señalar que el valor máximo promedio de  $\text{NO}_2$  registrado para este día alcanzó los  $83.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto indica que hubo momentos en los que las concentraciones de  $\text{NO}_2$  superaron considerablemente los límites diarios de la OMS. Al analizar los picos de concentración, se observa que la mayoría de estos superaron los ECA diario y anual de las DCA de la OMS, lo que sugiere episodios de mala calidad del aire durante el día.

### 5.1.10. Concentración de $\text{NO}_2$ en función del tiempo en Cusco – Calle Matara – 2018

Entre el 20 de abril y el 30 de abril de 2018, se llevó a cabo la evaluación de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en la Calle MATARA en Cusco. Durante este período, se recolectaron y evaluaron un total de 14,482 datos válidos, lo que proporcionó información detallada sobre la calidad del aire en esta ubicación.

#### Figura 27.

*Promedio de Concentración de  $\text{NO}_2$  diario (2018 - CALLE MATARA)*



Nota: Imagen Propia

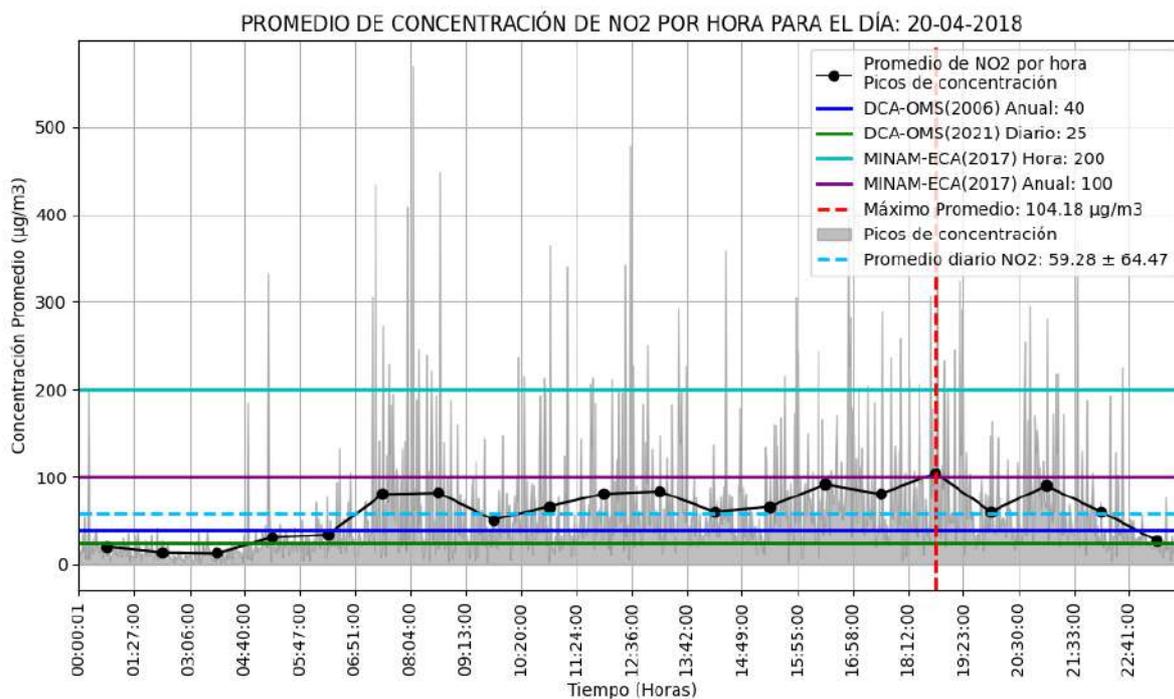
La Figura 27 presenta el promedio de  $\text{NO}_2$  en este sitio durante el período de evaluación. Un resultado significativo es el valor máximo promedio de  $59.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se registró el 20

de abril de 2018. Una comparación de estos resultados con las pautas de calidad del aire muestra que el valor promedio de  $\text{NO}_2$  es de  $51.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor cumple con los estándares anuales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el MINAM. Sin embargo, es esencial destacar que todos los valores registrados superan el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definido por la OMS en 2021.

Es relevante evidenciar que, a excepción de dos valores, la mayoría de los promedios diarios se mantienen por debajo del límite anual establecido por el MINAM. Sin embargo, todos los valores exceden el límite diario de la OMS en 2021. Esto sugiere que la calidad del aire en Calle MATARA no cumple con los estándares anuales y con las pautas diarias recomendadas por la OMS.

### Figura 28.

Promedio de concentración de  $\text{NO}_2$  por hora día: 20-04-2018



Nota: Imagen Propia

De En la Figura 28, se examina el promedio de concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) el 20 de abril de 2018, en consideración de los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de  $\text{NO}_2$  para este día fue de  $59.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se compara con el ECA horario del MINAM, que es de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y se encuentra por debajo de este límite. Esto

señala que, en términos de concentraciones horarias, la calidad del aire cumplió con los estándares del MINAM.

Sin embargo, en relación a las normativas de la OMS, el límite diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se superó significativamente en este día. Asimismo, el límite anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la OMS fue excedido. Esto indica que el promedio anual de  $\text{NO}_2$  supera los parámetros establecidos por la OMS.

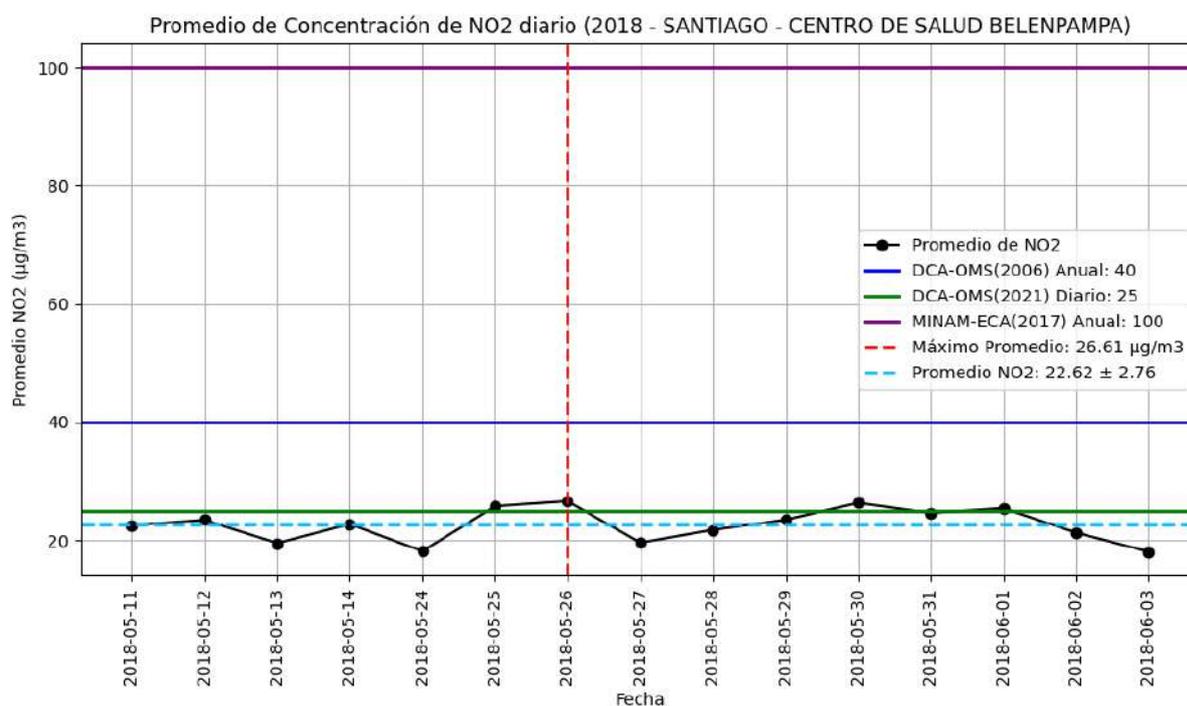
Un punto importante a destacar es que el valor máximo promedio de  $\text{NO}_2$  para este día alcanzó los  $104.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica que hubo momentos en los que las concentraciones de  $\text{NO}_2$  superaron considerablemente los límites diarios de la OMS. Al evaluar los picos de concentración, se observa que muchos de ellos superan los ECA diario y anual de la OMS, lo que sugiere episodios de mala calidad del aire durante este día.

### 5.1.11. Concentración de $\text{NO}_2$ en función del tiempo en Santiago - Centro de Salud, Belenpampa (CLAS) – 2018

Del 11 de mayo y el 3 de junio de 2018, se llevó a cabo el estudio detallado de la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el Centro de Salud de Santiago, Belenpampa. Se analizaron 20,397 registros válidos, lo que permitió una visión integral de la calidad del aire en esta ubicación a lo largo de ese período.

#### Figura 29.

*Promedio de Concentración de  $\text{NO}_2$  diario (2018 - SANTIAGO - CENTRO DE SALUD BELENPAMPA)*



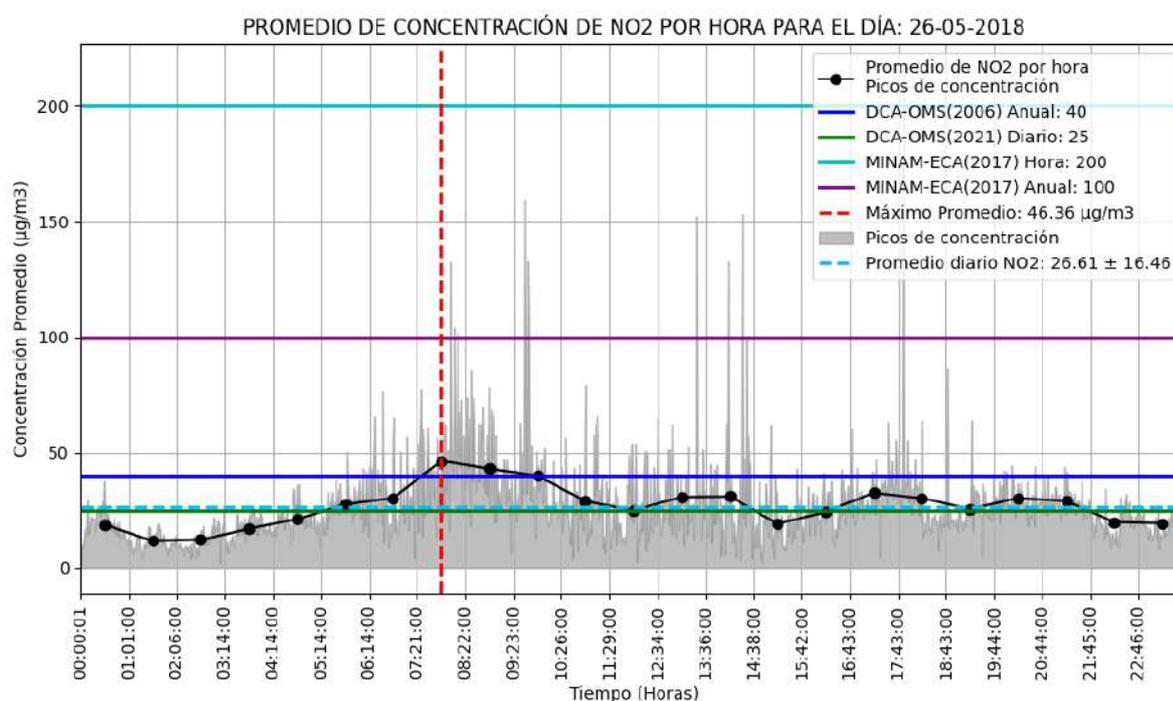
Nota: Imagen Propia

La Figura 29 representa el promedio de NO<sub>2</sub> en este lugar durante el tiempo evaluado. Un punto relevante es el valor máximo promedio, que alcanzó 26.61 µg/m<sup>3</sup> el 26 de mayo de 2018. Cuando se cotejan estos resultados con los estándares de calidad del aire, se aprecia que el promedio general de NO<sub>2</sub> es de 22.62 µg/m<sup>3</sup>, cumpliendo así con los límites anuales establecidos por el MINAM y la OMS. Es también apropiado mencionar y realzar que la mayoría de los valores promedio diarios no superan ni los límites anuales ni los límites diarios.

Estos hallazgos indican que, en general, la calidad del aire en el Centro de Salud de Santiago, Belenpampa, se mantiene en rangos aceptables. La mayoría de los valores diarios están en conformidad con los estándares establecidos tanto para periodos anuales como diarios, según lo indicado por las regulaciones pertinentes. Sin embargo, se destaca el valor máximo promedio del 26 de mayo de 2018. Aunque no excede los límites de calidad anuales ni diarios, sugiere que existen picos que suelen sobrepasar los ECA.

### Figura 30.

Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 26-05-2018



Nota: Imagen Propia

En la Figura 30, se realiza una evaluación del promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 26 de mayo de 2018, en relación a los Estándares de Calidad del Aire (ECA) establecidos por el MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de NO<sub>2</sub> para este día específico fue de 26.61 µg/m<sup>3</sup>. Al compararlo con el ECA horario del MINAM, que es de 200 µg/m<sup>3</sup>, se observa que el promedio se encuentra por debajo de este límite. Esto indica que, en términos de concentraciones horarias, la calidad del aire se mantuvo dentro de los estándares del MINAM.

En cuanto a las normativas de la OMS, el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> no se superó en este día. Además, el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> de la OMS se mantuvo dentro de los parámetros, lo que sugiere que el promedio anual de NO<sub>2</sub> está en conformidad con las normativas de la OMS.

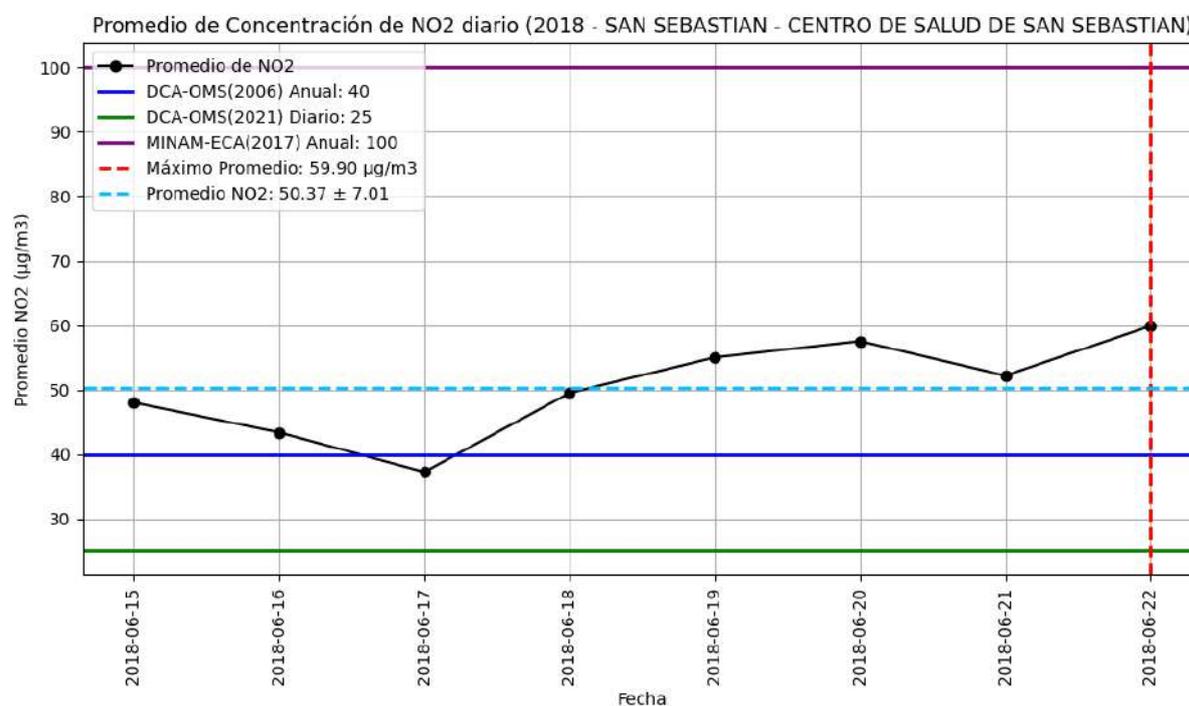
Un aspecto relevante es que el valor máximo promedio de NO<sub>2</sub> para este día fue de 46.36 µg/m<sup>3</sup>, indicando que hubo momentos durante el día en los que las concentraciones de NO<sub>2</sub> superaron el ECA horario del MINAM. Al analizar los picos de concentración, se observa que algunos picos de promedios de minutos superan el ECA anual del MINAM, pero no superan el ECA horario, lo que sugiere que los niveles de concentración no superaron el límite horario en este día en particular.

#### **5.1.12. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en San Sebastián - Centro de Salud – 2018**

Durante seis días, del 15 al 22 de junio de 2018, se llevó a cabo el monitoreo para evaluar la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el Centro de Salud de San Sebastián. Durante este período, se procesaron un total de 10,894 mediciones válidas.

**Figura 31.**

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - SAN SEBASTIAN - CENTRO DE SALUD DE SAN SEBASTIAN)*

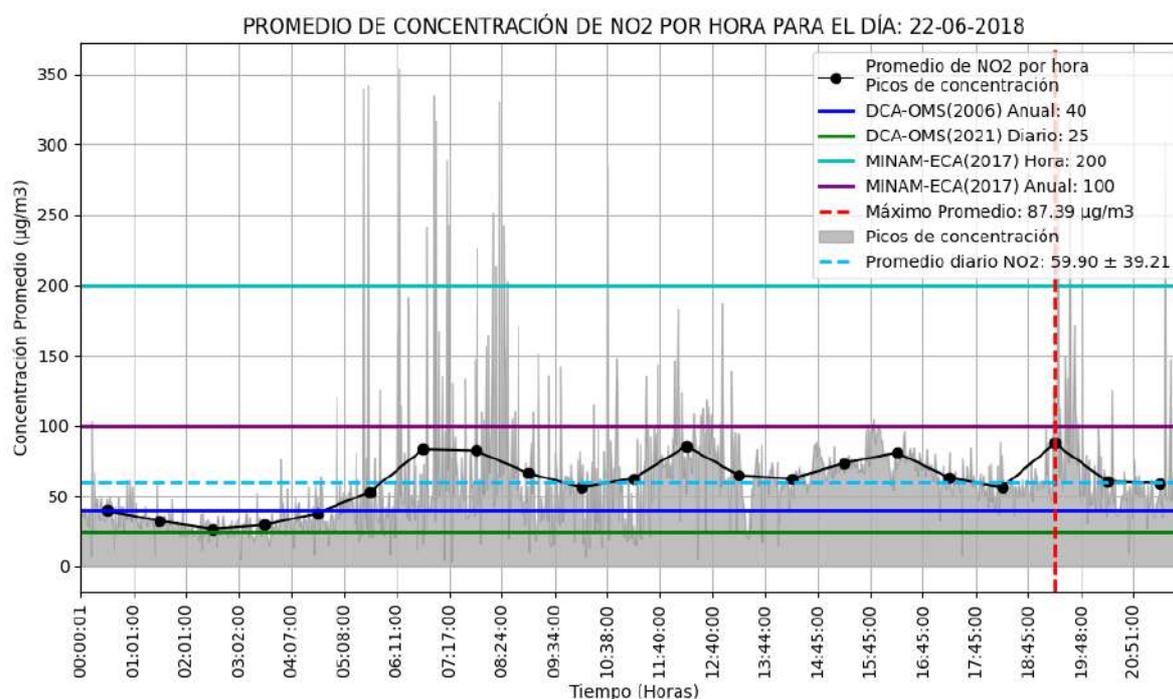


*Nota:* Imagen Propia

La Figura 31 ilustra la concentración promedio de NO<sub>2</sub> durante este período. En este análisis, se observa que el valor máximo promedio fue de 59.90 µg/m<sup>3</sup>, registrado el 22 de junio de 2018. Cuando se analizan estos datos en relación con las normativas internacionales vigentes, se destaca que el valor promedio de NO<sub>2</sub> es de 50.37 µg/m<sup>3</sup>. Este valor supera significativamente el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2021. Además, a pesar de que un solo valor no supera el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> de la OMS en 2021, el resto sigue por debajo del límite anual de 100 µg/m<sup>3</sup> establecido por el MINAM en 2017.

**Figura 32.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 22-06-2018*



*Nota:* Imagen Propia

De En la Figura 32, se examina el promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 22 de junio de 2018 en relación con los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de NO<sub>2</sub> para este día específico fue de 59.90 µg/m<sup>3</sup>. Al compararlo con el ECA horario del MINAM, que es de 200 µg/m<sup>3</sup>, se observa que el promedio está significativamente por debajo de este límite. Esto indica que, en términos de concentraciones horarias, la calidad del aire se mantuvo dentro de los estándares del MINAM.

En cuanto a las normativas de la OMS, el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> tampoco se superó en este día. Además, el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> de la OMS se mantuvo dentro de los parámetros, lo que sugiere que el promedio anual de NO<sub>2</sub> está en conformidad con las normativas de la OMS.

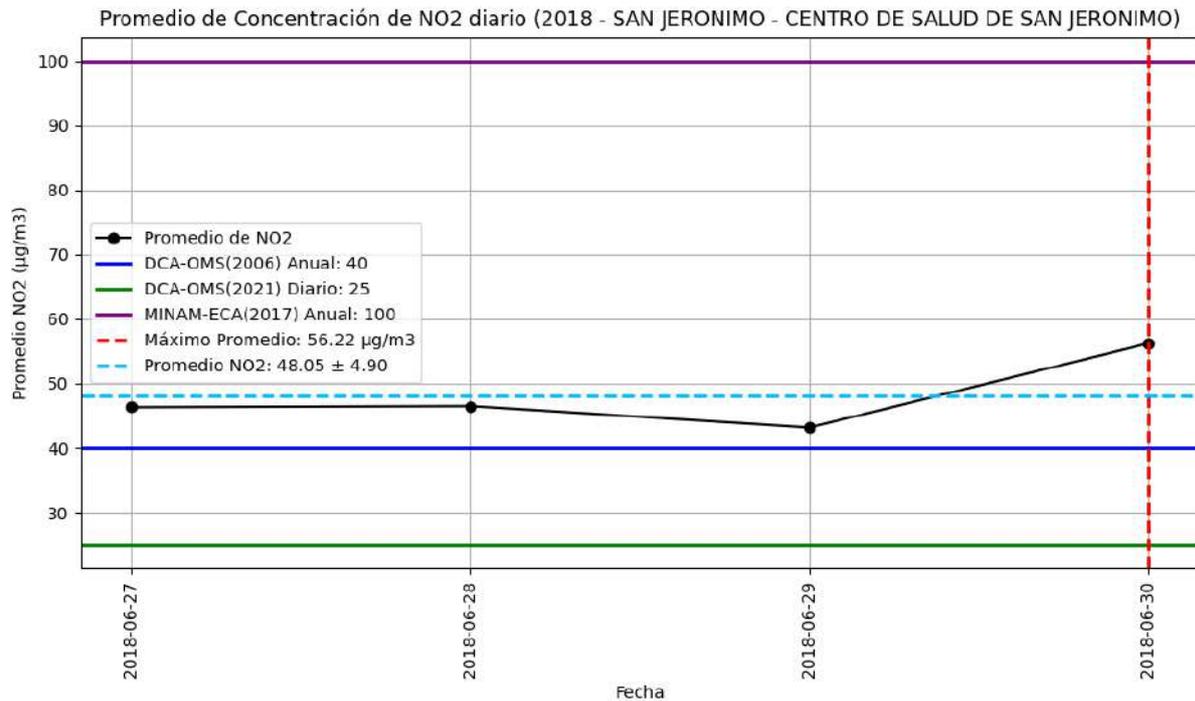
Es importante destacar que el valor máximo promedio de NO<sub>2</sub> para este día alcanzó los 87.39 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, al analizar los picos de concentración, se observa que pocos picos de concentración de promedios de minutos superan los ECA del MINAM por hora, lo que indica que, en términos de concentraciones horarias, la calidad del aire se mantuvo en conformidad con las normativas.

### 5.1.13. Concentración de NO<sub>2</sub> en función del tiempo en San Jeronimo - CLAS San Jeronimo – 2018

Entre el 27 y el 30 de junio de 2018, se realizó el minucioso análisis de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en San Jerónimo, específicamente en el CLAS San Jerónimo. Durante este corto período, se evaluaron un total de 5,065 mediciones válidas.

#### Figura 33.

*Promedio de Concentración de NO<sub>2</sub> diario (2018 - SAN JERONIMO - CENTRO DE SALUD DE SAN JERONIMO)*

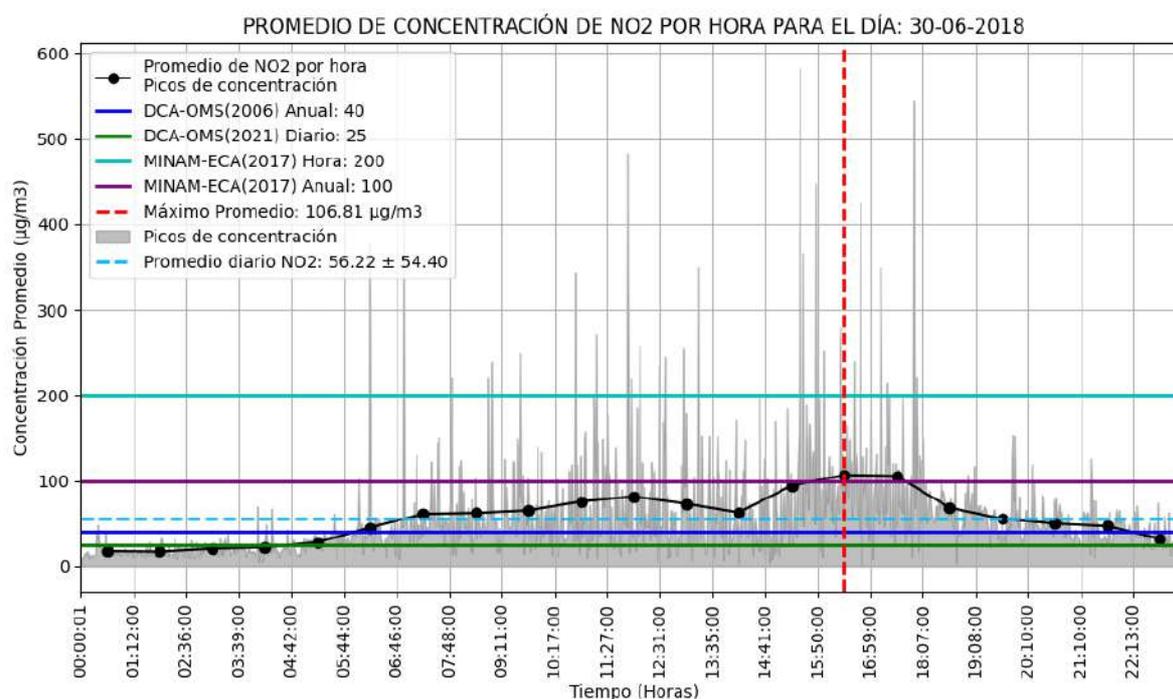


*Nota:* Imagen Propia

La Figura 33 nos muestra que se obtuvo el valor máximo promedio de 56.22 µg/m<sup>3</sup> el 30 de junio de 2018. Al comparar estos datos con las normativas internacionales, es evidente que el valor promedio de NO<sub>2</sub>, que alcanza 48.05 µg/m<sup>3</sup>, supera tanto el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2021 como el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup>.

**Figura 34.**

*Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por hora día: 30-06-2018*



*Nota:* Imagen Propia

De En la Figura 34, se analiza el promedio de concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) el 30 de junio de 2018 en relación con los Estándares de Calidad del Aire (ECA) del MINAM (hora) y las DCA de la OMS.

El promedio de NO<sub>2</sub> para este día específico fue de 56.22 µg/m<sup>3</sup>. Al compararlo con el ECA horario del MINAM, que es de 200 µg/m<sup>3</sup>, se observa que la mayoría de los valores promedio están por debajo de este límite. Esto sugiere que, en términos de concentraciones horarias, la calidad del aire en este día específico se mantuvo en conformidad con las normativas del MINAM.

En cuanto a las normativas de la OMS, el límite diario de 25 µg/m<sup>3</sup> tampoco se superó en este día. Además, el límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup> de la OMS se mantuvo dentro de los parámetros, lo que indica que el promedio anual de NO<sub>2</sub> está en conformidad con las normativas de la OMS.

Sin embargo, es importante señalar que el valor máximo promedio de NO<sub>2</sub> para este día alcanzó los 106.81 µg/m<sup>3</sup>. Al analizar los picos de concentración, se observa que muchos picos cercanos al pico del promedio máximo superan el ECA horario del MINAM. Esto sugiere que hubo momentos durante el día en los que las concentraciones de NO<sub>2</sub> superaron el límite

horario del MINAM. No obstante, ninguno de los valores promedio se acercó peligrosamente al límite del ECA diario.

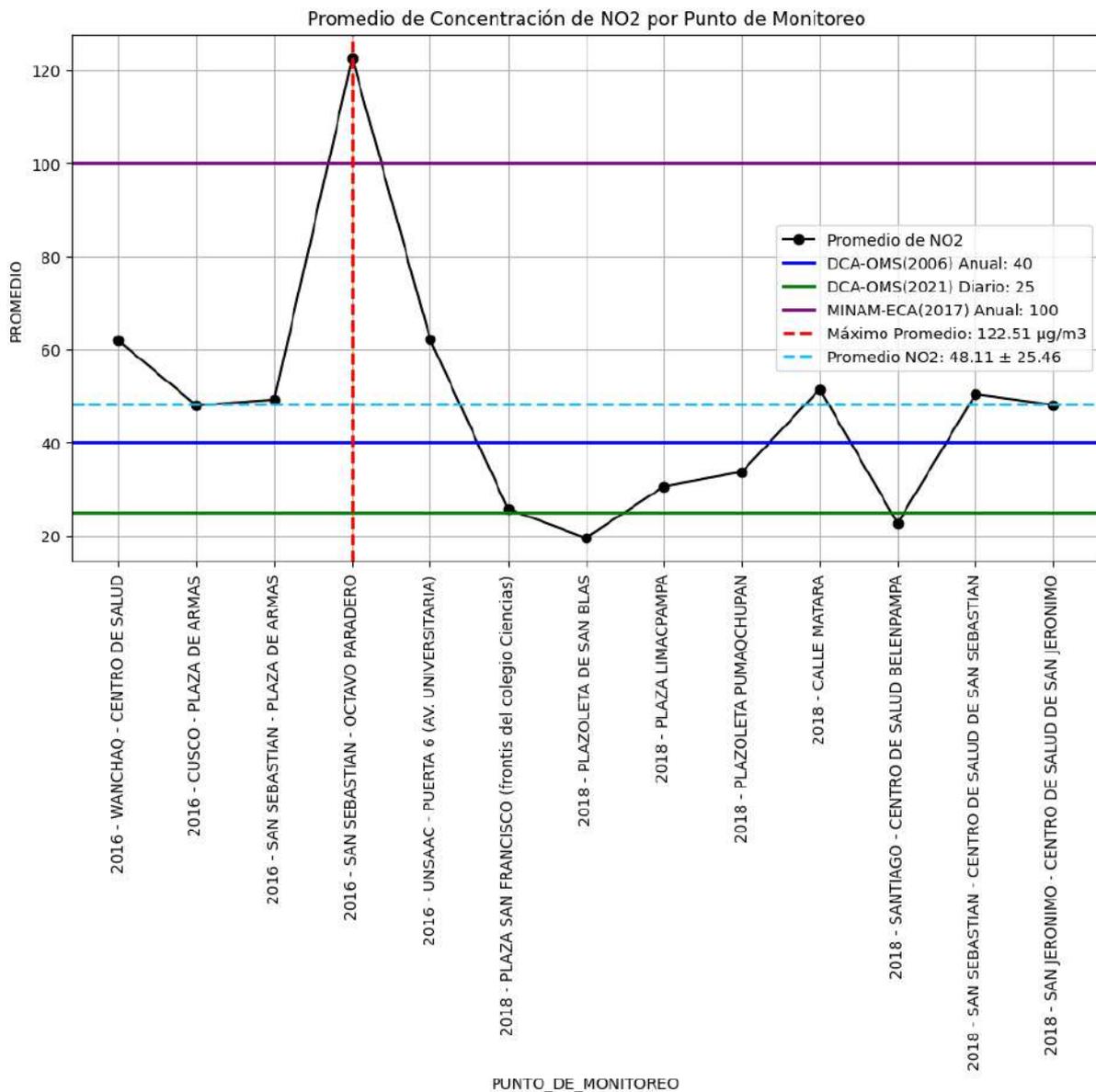
#### 5.1.14. Resultados de promedios de NO<sub>2</sub> por puntos de monitoreo a través de diferentes años.

Finalmente se convergen todos los resultados promedio por cada punto de monitoreo de NO<sub>2</sub> para relacionar los datos presentados en la tabla 7 con un análisis gráfico que se presenta en la figura 44.

**Tabla 7. Promedio general por punto de monitoreo de NO<sub>2</sub>**

<b>N</b>	<b>PUNTO DE MONITOREO NO<sub>2</sub></b>	<b>PROMEDIO</b>
1	2016 - WANCHAQ - CENTRO DE SALUD	61.81
2	2016 - CUSCO - PLAZA DE ARMAS	47.94
3	2016 - SAN SEBASTIAN - PLAZA DE ARMAS	49.20
4	2016 - SAN SEBASTIAN - OCTAVO PARADERO	122.51
5	2017 - UNSAAC – PUERTA 6 (AV. UNIVERSITARIA)	62.12
6	2018 - PLAZA SAN FRANCISCO	25.70
7	2018 - PLAZOLETA DE SAN BLAS	19.44
8	2018 - PLAZA LIMACPAMPA	30.54
9	2018 - PLAZOLETA PUMAQCHUPAN	33.64
10	2018 - CALLE MATARA	51.44
11	2018 - SANTIAGO - CENTRO DE SALUD BELENPAMPA	22.62
12	2018 - SAN SEBASTIAN - CENTRO DE SALUD DE SAN SEBASTIAN	50.37
13	2018 - SAN JERONIMO - CENTRO DE SALUD DE SAN JERONIMO	48.05

*Nota:* Elaboración propia

**Figura 35.***Promedio de concentración de NO<sub>2</sub> por cada punto de monitoreo*

*Nota:* Imagen Propia

La figura 35 brinda una perspectiva más generalizada sobre el promedio de la concentración de NO<sub>2</sub> por punto de monitoreo en función a las DCA de la OMS como nacional (MINAM), mostrando que el punto más alto de concentración durante las evaluaciones fue el octavo paradero de San Sebastian el año 2016, siendo este el único en superar el valor anual del ECA del MINAM. También podemos apreciar que la mayoría de los puntos de monitoreo están por encima de las DCA internacionales, con excepción de San Blas y el centro de Salud de Belenpampa.

## 5.2. Discusión

La presente investigación ha revelado patrones significativos de contaminación por dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la ciudad del Cusco durante el período 2016-2018. Los hallazgos obtenidos a través del monitoreo sistemático en 13 puntos estratégicos proporcionan una visión integral de la dinámica de este contaminante en el entorno urbano, permitiendo establecer comparaciones relevantes con estudios recientes a nivel global, regional y local.

Un hallazgo particularmente significativo es la marcada heterogeneidad espacial en las concentraciones de NO<sub>2</sub>, con valores que oscilan entre 19.44 µg/m<sup>3</sup> en zonas de bajo tráfico como San Blas hasta 122.51 µg/m<sup>3</sup> en áreas de alta congestión vehicular como el octavo paradero de San Sebastián. Esta variabilidad espacial coincide con los patrones identificados por Borge et al., (2022), en Madrid, donde las concentraciones de NO<sub>2</sub> mostraron diferencias significativas entre zonas, especialmente en áreas con alto flujo vehicular. La correlación entre los niveles elevados de NO<sub>2</sub> y las zonas de intenso tráfico vehicular también es consistente con los hallazgos de Ramacher y Karl, (2020), quienes documentaron concentraciones de hasta 40 µg/m<sup>3</sup> en zonas de alta congestión urbana.

Los resultados obtenidos en el octavo paradero de San Sebastián, donde se registraron concentraciones que ocasionalmente superaron el límite horario establecido por el MINAM, son particularmente preocupantes a la luz de las investigaciones recientes de Liu et al. (2024). Su estudio longitudinal demostró que un aumento de solo 10 µg/m<sup>3</sup> en la concentración de NO<sub>2</sub> está asociado con un incremento del 8% en el riesgo de mortalidad (HR: 1.08, IC 95%: 1.05-1.12), lo que sugiere que las altas concentraciones observadas en el presente estudio podrían tener implicaciones significativas para la salud pública.

La actualización de las directrices de la OMS en 2021, discutida por T. Zhu et al. (2022), que reduce el límite anual de NO<sub>2</sub> de 40 µg/m<sup>3</sup> a 10 µg/m<sup>3</sup>, pone en perspectiva la gravedad de los hallazgos encontrados. La mayoría de los puntos monitoreados en el presente trabajo de investigación excedieron incluso el límite anterior de 40 µg/m<sup>3</sup>, y ninguno cumplió con el nuevo estándar de 10 µg/m<sup>3</sup>. Esta situación es similar a la documentada por Yang et al. (2022) en ciudades chinas, donde las concentraciones promedio de NO<sub>2</sub> oscilaron entre 7.3 y 50.3 µg/m<sup>3</sup>, con un promedio de 26.9 µg/m<sup>3</sup>.

La distribución temporal de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el presente estudio mostró patrones consistentes con las actividades socioeconómicas y el flujo vehicular, observándose picos durante las horas de mayor tráfico. Estos patrones son similares a los reportados por

Romero et al. (2020) en Lima, donde las concentraciones más altas se registraron durante las horas punta de tráfico (7:00-10:00 y 18:00-23:00).

Los niveles más bajos de contaminación observados en el centro histórico de Cusco, en comparación con las zonas periféricas, sugieren un impacto positivo de las restricciones vehiculares en esta área. Este hallazgo es consistente con los resultados de Tapia et al. (2018) en Lima, donde el reordenamiento vehicular logró una reducción del 65% en los niveles de NO<sub>2</sub>. Sin embargo, incluso en estas zonas "menos contaminadas", las concentraciones diarias frecuentemente excedieron el nuevo límite de 25 µg/m<sup>3</sup> establecido por la OMS en 2021.

La presencia de concentraciones elevadas de NO<sub>2</sub> cerca de centros educativos y hospitales es particularmente preocupante, considerando la vulnerabilidad de las poblaciones expuestas. Este hallazgo coincide con las observaciones de Velayarce et al. (2022) sobre la importancia de proteger a las poblaciones vulnerables de la exposición a contaminantes atmosféricos.

Los resultados obtenidos respaldan las observaciones realizadas en el Programa Regional De Aire Limpio (PRAL, 2006) sobre la contribución significativa del transporte público a la contaminación atmosférica en Cusco. La concentración de NO<sub>2</sub> en puntos de alto tráfico vehicular, como el octavo paradero de San Sebastián, refleja claramente esta relación.

Los patrones de distribución espacial y temporal de NO<sub>2</sub> observados en el presente estudio son consistentes con las investigaciones de Holguín Ramos (2022), aunque el análisis proporciona una resolución espacial y temporal más detallada. Mientras que Holguín Ramos reportó niveles de NO<sub>2</sub> por debajo de los 40 µg/m<sup>3</sup> anuales en el centro histórico, los resultados obtenidos revelan que, si bien los promedios anuales pueden mantenerse dentro de los límites, los picos diarios y horarios frecuentemente exceden los estándares recomendados.

La comparación con estudios realizados durante la pandemia de COVID-19, como el de Jurado Sandoval y Valentín Vásquez (2021), que documentó reducciones significativas en los niveles de NO<sub>2</sub> durante el confinamiento, resalta la importancia del tráfico vehicular como fuente principal de este contaminante. Esta observación sugiere que las estrategias de control de tráfico podrían ser efectivas para reducir las concentraciones de NO<sub>2</sub> en Cusco.

Los resultados de nuestra investigación también deben considerarse en el contexto de las condiciones meteorológicas y topográficas específicas de Cusco. La acumulación de contaminantes en la zona sur-este de la ciudad, mencionada en la introducción, sugiere que los factores meteorológicos y topográficos juegan un papel importante en la distribución de NO<sub>2</sub>, un fenómeno también observado por Trelles Motte (2018) en sus estudios en la región.

El crecimiento exponencial del parque automotor en Cusco, que ha alcanzado aproximadamente cien mil vehículos según SUNARP (2021), se refleja en los resultados del presente estudio a través de las altas concentraciones de NO<sub>2</sub> en puntos de alto tráfico vehicular. Esta relación entre el aumento del parque automotor y la calidad del aire es consistente con las tendencias observadas en otros estudios urbanos, como los realizados por Romero et al. (2020) en Lima.

La variabilidad en las concentraciones de NO<sub>2</sub> entre diferentes puntos de monitoreo subraya la importancia de implementar estrategias de control diferenciadas según las características específicas de cada zona. Este enfoque es respaldado por las investigaciones de Borge et al. (2022), que destacan la importancia de la zonificación en la gestión de la calidad del aire urbano.

## CONCLUSIONES

1. La medición de la variación instantánea de la concentración de dióxido de nitrógeno mediante el analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco evidenció fluctuaciones temporales y espaciales significativas en las concentraciones, con picos recurrentes durante las horas de mayor actividad vehicular, registrando incluso valores que sobrepasaron los límites máximos permisibles para valores de  $\text{NO}_2$  medidos en una hora que es  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , establecidos por el MINAM en zonas de alto tráfico.
2. Los valores promedios de la concentración de dióxido de nitrógeno en los puntos estratégicos del tránsito vehicular variaron significativamente según la ubicación, siendo el punto crítico el octavo paradero de San Sebastián con  $122.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la mayoría de puntos monitoreados excedieron el valor guía diario de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en las DCA-OMS (2021).
3. La determinación de los valores mínimos y máximos de la concentración de dióxido de nitrógeno reveló que el valor mínimo promedio fue de  $19.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , registrado en la zona de San Blas (2018), mientras que el valor máximo promedio alcanzó los  $122.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el octavo paradero de la Avenida de la Cultura (2016). Es importante señalar que, si bien en ningún punto de monitoreo ni día se superaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del MINAM establecidos para el promedio horario ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la mayoría de los promedios diarios sobrepasaron las Directrices de Calidad del Aire (DCA) de la OMS 2021 ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), demostrando la marcada heterogeneidad en la distribución espacial de  $\text{NO}_2$  en la ciudad.

## RECOMENDACIONES

1. La base de datos generada por esta investigación debe ser utilizada por las autoridades ambientales locales (MINAM, OEFA, Municipalidad del Cusco) para establecer políticas efectivas de gestión de la calidad del aire, implementando un sistema de monitoreo continuo y permanente que amplíe los puntos de medición identificados como críticos, especialmente en zonas de alto tránsito vehicular y cerca de poblaciones vulnerables.
2. Los resultados de esta investigación deben servir como sustento técnico-científico para que los tomadores de decisiones implementen medidas urgentes de control de emisiones vehiculares, incluyendo la modernización del transporte público, restricciones de circulación en zonas críticas y el desarrollo de infraestructura para movilidad sostenible, considerando que se ha demostrado que varias zonas de la ciudad superan los estándares nacionales e internacionales de calidad del aire.
3. La metodología y los datos obtenidos en este estudio deben ser utilizados como punto de partida para futuras investigaciones en salud pública y calidad ambiental en la ciudad del Cusco, sugiriendo establecer convenios entre instituciones académicas, organismos de salud y autoridades ambientales para desarrollar estudios epidemiológicos que relacionen los niveles de exposición a  $\text{NO}_2$  con impactos en la salud de la población, particularmente en las zonas identificadas como críticas.
4. Implementar un sistema de monitoreo conjunto de  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ , considerando la relación precursor-producto entre estos contaminantes, para comprender mejor la dinámica de formación de ozono troposférico en la ciudad del Cusco y desarrollar estrategias de control más efectivas que aborden tanto las emisiones directas de  $\text{NO}_2$  como sus impactos secundarios en la formación de otros contaminantes atmosféricos.

## BIBLIOGRAFIA

- Air quality guidelines global update 2006*. (s. f.). Recuperado 15 de enero de 2024, de <https://www.who.int/publications-detail-redirect/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>
- Bardet, D., Spiga, A., & Guerlet, S. (2022). Joint evolution of equatorial oscillation and interhemispheric circulation in Saturn's stratosphere. *Nature Astronomy*, 6(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01670-7>
- Barrera González, H. (2020). *DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS, MEDIANTE UN PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109668>
- Blanco-Ward, D., Ribeiro, A., Paoletti, E., & Miranda, A. I. (2021). Assessment of tropospheric ozone phytotoxic effects on the grapevine (*Vitis vinifera* L.): A review. *Atmospheric Environment*, 244, 117924. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117924>
- Borge, R., Jung, D., Lejarraga, I., De La Paz, D., & Cordero, J. M. (2022). Assessment of the Madrid region air quality zoning based on mesoscale modelling and k-means clustering. *Atmospheric Environment*, 287, 119258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119258>
- Camarero, L. (2017). Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution. En J. Catalan, J. M. Ninot, & M. M. Aniz (Eds.), *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 325-341). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7_14)
- Chang, R. (2003). *General Chemistry: The Essential Concepts*. McGraw-Hill.
- Chen, T.-L., Chen, L.-H., Lin, Y. J., Yu, C.-P., Ma, H., & Chiang, P.-C. (2021). Advanced ammonia nitrogen removal and recovery technology using electrokinetic and stripping

- process towards a sustainable nitrogen cycle: A review. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127369>
- Condori Alcca, R., & Huisa Chacca, R. (2022). Evaluación de la calidad ambiental de aire en las comunidades campesinas de Cala Cala y Nueva Esperanza, Espinar, Cusco. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/110277>
- Coppiarolo, L. E., Pohl Schnake, V., Zamponi, A., Zilio, M. C., D'Amico, G. M., & Báez, S. (2022). *Conflictos ecológicos distributivos: Suelos y ciclos biogeoquímicos*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/147898>
- Departamento del Cuzco. (2023). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Departamento\\_del\\_Cuzco&oldid=1556150](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Departamento_del_Cuzco&oldid=1556150)
- 38
- Ding, L., Wang, Y., Qian, L., Qi, P., Xie, M., & Long, H. (2023). Flue gas deNOxing spent V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst: A review of deactivation mechanisms and current disposal status. *Fuel*, 338, 127268. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127268>
- Dos Santos, F. S., Andreão, W. L., Miranda, G. A., De Carvalho, A. N. M., Pinto, J. A., Pedruzzi, R., Carvalho, V. S. B., & De Almeida Albuquerque, T. T. (2021). Vehicular air pollutant emissions in a developing economy with the widespread use of biofuels. *Urban Climate*, 38, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100889>
- García, O. D. G., Arredondo, J. E. G., & Núñez, E. V. (2023). Nanocompositos magnéticos (biochar+magnetita/biochar+magnetita/ZnO) para remover contaminantes en agua: Caso de estudio con Cr(VI). *Jóvenes en la Ciencia: Veranos de la Ciencia XXVIII Vol. 21* (2023). <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/9447>

- GINES, N. G. (2003). *Química agrícola: El suelo y los elementos químicos: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Graciani Alvarez, J. D., Ribón Baena, I. M., & Rocha Suarez, L. F. (2020). *Grupos funcionales microbianos del ciclo del nitrógeno en el suelo del bosque seco tropical de la Universidad del Magdalena*.  
<http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/5482>
- Guarnieri, M., & Balmes, J. R. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383(9928), 1581-1592. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60617-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60617-6)
- Guzmán Duchén, D., Montero Torres, J., Guzmán Duchén, D., & Montero Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101.  
<https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Hastings, M. G., Sigman, D. M., & Lipschultz, F. (2003). Isotopic evidence for source changes of nitrate in rain at Bermuda. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D24). <https://doi.org/10.1029/2003JD003789>
- Hernández Cerda, C. N., Ávila Galarza, A., & Cerda Alonso, D. G. (2022). Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1-27. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.8>
- Herrero, A., Flores, E., & Imperial, J. (2019). Nitrogen Assimilation in Bacteria. En T. M. Schmidt (Ed.), *Encyclopedia of Microbiology (Fourth Edition)* (pp. 280-300). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20680-8>
- Holguín Ramos, C. R. (s. f.). *Gestión de tráfico vehicular y calidad del aire del Centro Histórico de Cusco, 2021*. Recuperado 10 de noviembre de 2024, de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/83235>

- Johansson, M. T. (2016). Effects on global CO<sub>2</sub> emissions when substituting LPG with bio-SNG as fuel in steel industry reheating furnaces—The impact of different perspectives on CO<sub>2</sub> assessment. *Energy Efficiency*, 9(6), 1437-1445. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9432-0>
- Jurado Sandoval, J. P., & Valentín Vásquez, L. L. (2021). *Efectos del aislamiento social obligatorio por COVID-19 en la calidad del aire (NO<sub>2</sub>, PM 2.5) en San Juan de Lurigancho, Lima – Perú*. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4489>
- Klosterköther, A., Kurtenbach, R., Wiesen, P., & Kleffmann, J. (2021). Determination of the emission indices for NO, NO<sub>2</sub>, HONO, HCHO, CO, and particles emitted from candles. *Indoor Air*, 31(1), 116-127. <https://doi.org/10.1111/ina.12714>
- Kox, M. A. R., & Jetten, M. S. M. (2015). The Nitrogen Cycle. En B. Lugtenberg (Ed.), *Principles of Plant-Microbe Interactions: Microbes for Sustainable Agriculture* (pp. 205-214). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_22)
- Lestari, P., Arrohman, M. K., Damayanti, S., & Klimont, Z. (2022). Emissions and spatial distribution of air pollutants from anthropogenic sources in Jakarta. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9), 101521. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101521>
- Ley General del Ambiente*. (s. f.). [Text]. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. Recuperado 25 de agosto de 2023, de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente>
- Li, L., He, Y., Zhang, Z., & Liu, Y. (2021). Nitrogen isotope fractionations among gaseous and aqueous NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, and metal-ammine complexes: Theoretical calculations and applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 295, 80-97. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.12.010>

- Lin, S., Ryan, I., Paul, S., Deng, X., Zhang, W., Luo, G., Dong, G.-H., Nair, A., & Yu, F. (2022). Particle surface area, ultrafine particle number concentration, and cardiovascular hospitalizations. *Environmental Pollution*, *310*, 119795. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119795>
- Lin, Y.-C., Li, Y.-C., Amesho, K. T. T., Shangdiar, S., Chou, F.-C., & Cheng, P.-C. (2020). Chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> emissions and atmospheric metallic element concentrations in PM<sub>2.5</sub> emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles. *Science of The Total Environment*, *739*, 139942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139942>
- Linares, C., Díaz, J., Negev, M., Martínez, G. S., Debono, R., & Paz, S. (2020). Impacts of climate change on the public health of the Mediterranean Basin population—Current situation, projections, preparedness and adaptation. *Environmental Research*, *182*, 109107. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109107>
- Liu, L., Zeng, Y., & Ji, J. S. (2024). Real-World Evidence of Multiple Air Pollutants and Mortality: A Prospective Cohort Study in an Oldest-Old Population. *Environment & Health*, *2*(1), 23-33. <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00106>
- Malina, C., & Scheffler, F. (2015). The impact of Low Emission Zones on particulate matter concentration and public health. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *77*, 372-385. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.029>
- Martin, E., Fernández, O., & Atienza, J. (2015). La Docencia en Ciencias Medioambientales en la Universidad Autónoma de Madrid: Teoría y Práctica. *Formación universitaria*, *8*, 03-12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062015000600002>
- Martins, N. R., & Carrilho Da Graça, G. (2018). Impact of PM<sub>2.5</sub> in indoor urban environments: A review. *Sustainable Cities and Society*, *42*, 259-275. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>

- Mateos, A. C., Amarillo, A. C., & Busso, I. T. (2018). *Evaluación espacial y temporal de la contaminación por SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO en la ciudad de Córdoba*. 5(2).
- Mears, M. J., Aslaner, D. M., Barson, C. T., Cohen, M. D., Gorr, M. W., & Wold, L. E. (2022). Health effects following exposure to dust from the World Trade Center disaster: An update. *Life Sciences*, 289, 120147. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2021.120147>
- Michaelides, S., Karacostas, T., Sánchez, J. L., Retalis, A., Pytharoulis, I., Homar, V., Romero, R., Zanis, P., Giannakopoulos, C., Bühl, J., Ansmann, A., Merino, A., Melcón, P., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bruggeman, A., López-Moreno, J. I., Berthet, C., Katragkou, E., ... Nisantzi, A. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Research*, 208, 4-44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>
- Miller, M. R. (2022). The cardiovascular effects of air pollution: Prevention and reversal by pharmacological agents. *Pharmacology & Therapeutics*, 232, 107996. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107996>
- Mollá Robles, A. (2021). *Diseño de un sistema para el control de la contaminación por óxidos de nitrógeno basado en catalizadores de hierro y manganeso*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/171198>
- Muñoz Iglesias, B. R. (2023). *Efecto de la agricultura regenerativa para disminuir las emisiones de carbono en el ambiente*. [bachelorThesis, BABAHOYO: UTB, 2023]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14766>
- Nguyen, D.-H., Lin, C., Vu, C.-T., Cheruiyot, N. K., Nguyen, M. K., Le, T. H., Lukkhasorn, W., Vo, T.-D.-H., & Bui, X.-T. (2022). Tropospheric ozone and NO<sub>x</sub>: A review of worldwide variation and meteorological influences. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102809. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102809>

- Nimbalkar, T. M., Jadhav, Y. M., Dhanawade, R. N., Pawar, N. S., Molane, A. C., Gavande, S. S., Chavan, G. T., Jeon, C.-W., Sartale, S. D., & Patil, V. B. (2023). Simple chemical synthesis of CeO<sub>2</sub> nanoparticles for toxic NO<sub>2</sub> gas detection. *Journal of Alloys and Compounds*, 966, 171461. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171461>
- Nugroho, S. G., & Kuwatsuka, S. (1992). Concurrent observation of several processes of nitrogen metabolism in soil amended with organic materials. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38(4), 593-600. <https://doi.org/10.1080/00380768.1992.10416688>
- Olson, E., Michalski, G., Welp, L., Larrea Valdivia, A. E., Reyes Larico, J., Salcedo Peña, J., Fang, H., Magara Gomez, K., & Li, J. (2021). Mineral dust and fossil fuel combustion dominate sources of aerosol sulfate in urban Peru identified by sulfur stable isotopes and water-soluble ions. *Atmospheric Environment*, 260, 118482. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118482>
- Oquendo Contreras, J. de J., & Arcila Arcila, J. D. (2022). *Efectos en la piel asociados a la contaminación del aire*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/26157>
- Palacios Anzules, Í. D. C., & Moreno Castro, D. W. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6(2), 93-103. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Palma Ramírez, Í. A. (2022). *Poblaciones de fijadores biológicos de nitrógeno en la producción del cultivo de soya en la zona de Los Ríos* [bachelorThesis, BABAHOYO: UTB, 2022]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11357>
- Pereira, J. N., Mantovani, V. A., de Mello, C. R., Fornaro, A., & Vieira-Filho, M. (2023). Nitrogen atmospheric deposition driven by seasonal processes in a Brazilian region with agricultural background. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 37174-37184. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24870-0>

- Pérez, S. M., Reátegui, J. S., & Mendoza, A. S. (2021). Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: Revisión de literatura. *INVENTUM*, 16(30), Article 30. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30>
- Pio, C., Alves, C., Nunes, T., Cerqueira, M., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Gianelle, V., Colombi, C., Amato, F., Karanasiou, A., & Querol, X. (2020). Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> by Ionic and Mass Balance (IMB) in a traffic-influenced urban atmosphere, in Portugal. *Atmospheric Environment*, 223, 117217. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117217>
- PRAL.pdf*. (s. f.).
- Ramacher, M. O. P., & Karl, M. (2020). Integrating Modes of Transport in a Dynamic Modelling Approach to Evaluate Population Exposure to Ambient NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> Pollution in Urban Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062099>
- Reeve, J. L., Hamme, R. C., & Williams, W. J. (2019). Tracing denitrification in the Canada Basin: N<sub>2</sub> loss to the atmosphere on the Chukchi Shelf and benthic inputs in deep waters. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 143, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.11.003>
- Resolución Ministerial N° 094-2017-MINAM*. (s. f.). Ministerio del Ambiente. Recuperado 25 de agosto de 2023, de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-n-094-2017-minam/>
- Restrepo Román, A. (2023). *Estudio numérico y experimental del efecto de la co-combustión del gas natural y el hidrógeno en un quemador autorregenerativo para un horno de crisol*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/33448>

- Romero, Y., Diaz, C., Meldrum, I., Velasquez, R. A., & Noel, J. (2020). Temporal and spatial analysis of traffic – Related pollutant under the influence of the seasonality and meteorological variables over an urban city in Peru. *Heliyon*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04029>
- Roohi, H., & Rostami, T. (2020). Mechanism of the photo triggered ring-opening reaction of spiropyran derivatives (SP-X1-7; X1-7 = H, NO<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>, CN, OH, OMe and NMe<sub>2</sub>) in the gas phase and various solvent media: A GD3-TD-DFT approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 392, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112410>
- Ruiz Vicente, M. A. (2020). Estado actual de la contaminación ambiental presente en la Mixteca Oaxaqueña. *Journal of Negative and No Positive Results*, 5(5), 535-553. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.3257>
- Saucedo Linares, C. Y., & Regalado Saucedo, G. R. (2024). *Monitoreo ambiental de las microcuencas Colpamayo y San Mateo utilizando estaciones meteorológicas e hidrológicas automáticas con tecnología GSM/GPRS, chota, 2022.*
- Serafini, M. M., Maddalon, A., Iulini, M., & Galbiati, V. (2022). Air Pollution: Possible Interaction between the Immune and Nervous System? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316037>
- Shao, L., Li, Y., Jones, T., Santosh, M., Liu, P., Zhang, M., Xu, L., Li, W., Lu, J., Yang, C.-X., Zhang, D., Feng, X., & BéruBé, K. (2022). Airborne microplastics: A review of current perspectives and environmental implications. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131048>
- Shao, P., Xu, X., Zhang, X., Xu, J., Wang, Y., & Ma, Z. (2020). Impact of volatile organic compounds and photochemical activities on particulate matters during a high ozone

- episode at urban, suburb and regional background stations in Beijing. *Atmospheric Environment*, 236, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117629>
- Shoari, N., Heydari, S., & Blangiardo, M. (2022). School neighbourhood and compliance with WHO-recommended annual NO<sub>2</sub> guideline: A case study of Greater London. *Science of The Total Environment*, 803, 150038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150038>
- Stulen, I., Perez-Soba, M., De Kok, L. J., & Van Der Eerden, L. (1998). Impact of gaseous nitrogen deposition on plant functioning. *New Phytologist*, 139(1), 61-70. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1998.00179.x>
- Sukumaran, K., Cardenas-Iniguez, C., Burnor, E., Bottenhorn, K. L., Hackman, D. A., McConnell, R., Berhane, K., Schwartz, J., Chen, J.-C., & Herting, M. M. (2023). Ambient fine particulate exposure and subcortical gray matter microarchitecture in 9- and 10-year-old children across the United States. *iScience*, 26(3), 106087. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106087>
- Tamone, L. M. (2022). *Estudio de reacciones de interés atmosférico* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/140402>
- Tapia, V., Carbajal, L., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez-Velásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 190-197. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250>
- TFG\_SaizMoralSergio.pdf*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2023, de [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/20199/TFG\\_SaizMoralSergio.pdf?sequence=3](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/20199/TFG_SaizMoralSergio.pdf?sequence=3)

- Torrice, C. E., & Gamarra, L. (2019). *USO CLINICO DE LA OZONOTERAPIA EN ANIMALES MAYORES*.
- Tortajada Pastor, E. (2020). *Modelado cinético de la oxidación del hollín usando TGA* [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València].  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/153096>
- Trelles Motte, R. C. (2018). *Determinación del material particulado (PM10 Y PM 2.5), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2) y monóxido de carbono (CO) en el Distrito de Ocoruro-Provincia Espinar- Región Cusco*.  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6733>
- Van der Hoek, J. P., Duijff, R., & Reijnders, O. (2018). Nitrogen Recovery from Wastewater: Possibilities, Competition with Other Resources, and Adaptation Pathways. *Sustainability*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124605>
- Velayarce, D., Bustos, Q., García, M. P., Timaná, C., Carbajal, R., Salvatierra, N., Horna, D., & Murray, V. (2022). Air Quality Analysis in Lima, Peru Using the NO2 Levels during the COVID-19 Pandemic Lockdown. *Atmosphere*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/atmos13030373>
- Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B.-A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>
- Vourtsi Cordova, A. I. (2021). Removilización de nitrógeno en el sistema Gunnera—Nostoc. *Repositorio Institucional – UCS*. <https://doi.org/10.21142/tb.2021.1972>
- Warthon, B., Zamalloa, A., Warthon, J. L., Miranda, I., Quispe, I., Ramos, V., Ponce, R., & Tupayachi, R. (2024). *Evaluación de la Contaminación del Aire por Material Particulado PM2.5 en la ciudad del Cusco Respecto de los Índices de Calidad del Aire*

entre 2017 y 2018 | *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*.

<https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/1112>

Warthon, J., Alvarez, M., Olarte, A., Quispe, Y., Jalixto, V., Valencia, N., Mio-Diaz, M., Zamalloa, A., & Warthon, B. (2024). Reduction of the concentration of particulate material at a sampling point in Cusco city at the beginning of the pandemic. *Scientific Reports*, 14(1), 849. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50955-y>

Warthon, J. L. (2017). *Energía Limpia y Cero Emisión* (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Vol. 1). JL Editores de Jorge Loiza Gonzales. <http://vrin.unsaac.edu.pe/data/51-LIBRO%20ENERGIA%20LIMPIA%20FINAL.pdf>

*WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. (s. f.). Recuperado 15 de enero de 2024, de <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240034228>

Wu, X., Harrison, R. M., Yan, J., Wu, T., Shen, Y., Cui, Y., Liu, X., Yi, H., Shi, Z., & Xue, Y. (2023). Present and future emission characteristics of air pollutants and CO<sub>2</sub> from the Beijing transport sector and their synergistic emission reduction benefits. *Atmospheric Pollution Research*, 14(9), 101844. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101844>

Wu, Y., Zhang, J., Liu, S., Jiang, Z., Arbi, I., Huang, X., & Macreadie, P. I. (2018). Nitrogen deposition in precipitation to a monsoon-affected eutrophic embayment: Fluxes, sources, and processes. *Atmospheric Environment*, 182, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.037>

Yang, J., Ma, J., Sun, Q., Han, C., Guo, Y., & Li, M. (2022). Health benefits by attaining the new WHO air quality guideline targets in China: A nationwide analysis. *Environmental Pollution*, 308, 119694. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119694>

- Yu, J., Xu, R., Zhang, J., & Zheng, A. (2023). A review on reduction technology of air pollutant in current China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, *414*, 137659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137659>
- Yun, H., Wang, W., Wang, T., Xia, M., Yu, C., Wang, Z., Poon, S. C. N., Yue, D., & Zhou, Y. (2018). Nitrate formation from heterogeneous uptake of dinitrogen pentoxide during a severe winter haze in southern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(23), 17515-17527. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17515-2018>
- Zhang, X., Zhang, X., Zhou, L., Cao, X., Deng, Z., & Jiang, Y. (2023). The impacts of Brewer-Dobson and Hadley circulation on tropospheric ozone variations over three city clusters in China. *Atmospheric Research*, *293*, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106901>
- Zhu, B., Zhang, Y., Chen, N., & Quan, J. (2019). Assessment of Air Pollution Aggravation during Straw Burning in Hubei, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/ijerph16081446>
- Zhu, T., Wan, W., Liu, J., Xue, T., Gong, J., & Zhang, S. (2022). Insights into the new WHO *Global Air Quality Guidelines*. *Chinese Science Bulletin*, *67*(8), 697-706. <https://doi.org/10.1360/TB-2021-1128>

## ANEXOS

### ANEXO 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL USO DEL EQUIPO SERINUS 40 PARA LAS MEDICIONES DE NO<sub>2</sub> EN DIFERENTES PUNTOS DE MONITOREO EN LA CIUDAD DEL CUSCO

**Figura A.1.**



*Nota:* Elaboración propia

**Figura A.2.**

*Nota:* Elaboración propia

**Figura A.3.**

*Nota:* Elaboración propia

**Figura A.4.**

*Nota:* Elaboración propia

**Figura A.4.**

*Nota:* Elaboración propia

## ANEXO 2. TABLAS DE ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL SEGÚN CADA ENTIDAD

Según las Guías de calidad del aire de la OMS realizadas el 2005 y publicadas el 2006 los estándares de calidad del aire son:

**Tabla A.1. Guías para Estándares de Calidad Ambiental**

PARAMETRO	CONCENTRACIÓN ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PERIODO PROMEDIO
<b>PM 2.5</b>	10	ANUAL
	25	24 HORAS
<b>PM 10</b>	20	ANUAL
	50	24 HORAS
<b>O<sub>3</sub></b>	100	OCHO HORAS
<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>100</b>	<b>ANUAL</b>
	<b>200</b>	<b>MEDIA DE UNA HORA</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	20	24 HORAS
	500	10 MINUTOS

*Nota:*OMS (2006)

Según los Estándares de calidad ambiental para aire realizados y promulgados por el MINAM, el año 2017 son:

**Tabla A.2. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire**

Parámetros	Período	Valor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Criterios de evaluación	de Método de análisis
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Anual	2	Media aritmética Anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (método automático)
<b>Dióxido de Nitrógeno</b>	<b>1 hora</b>	<b>200</b>	<b>NE más de 24 veces al año</b>	<b>Quimioluminiscencia</b>
	<b>Anual</b>	<b>100</b>	<b>Media aritmética Anual</b>	<b>(Método automático)</b>
Material particulado con diámetro	24 hora  Anual	50  25	NE más de 7 veces al año Media aritmética Anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)

menor a 2,5 micras (PM <sub>2.5</sub> )				
Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM <sub>10</sub> )	24 hora	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética Anual	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o
Mercurio Gaseoso Total (Hg)	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman (Métodos automáticos)
Monóxido de carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)
	8 horas	10000	Media aritmética Móvil	(Método automático)
Ozono (O <sub>3</sub> )	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM <sub>10</sub>	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM <sub>10</sub>
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	(Espectrofotometría de absorción atómica)
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

Nota: DS 003-2017-MINAM (2017)

Según las últimas directrices de la OMS realizadas el año 2021 y publicadas ese mismo año para los estándares de la calidad ambiental para el aire son:

**Tabla A.3. Directrices sobre la calidad del aire**

<b>Contaminación</b>	<b>Tiempo Promedio</b>	<b>Nivel de las directrices sobre la Calidad del aire</b>
<b>MP<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	Anual	5
	24 horas*	15
<b>MP<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	Anual	15
	24 horas*	45
<b>O<sub>3</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	Temporada alta <sup>b</sup>	60
	8 horas*	100
<b>NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	Anual	10
	24 horas*	25
<b>SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	24 horas*	40
	24 horas*	4

Nota:: OMS (2021)

\*Percentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año).

<sup>b</sup> Promedio de las concentraciones máximas diarias de O<sub>3</sub> (medidas hoctohorarias) en los seis meses consecutivos con la concentración media móvil de O<sub>3</sub> más alta.

**ANEXO 3. TABLA DE CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LA CIUDAD DEL  
CUSCO EN CADA UNA DE SUS PROVINCIAS**

**Tabla A.4. Crecimiento poblacional en la ciudad del cusco en cada una de sus  
provincias**

<b>PROVINCIA</b>	<b>POBLACIÓN CENSADA EN 2007</b>	<b>POBLACIÓN CENSADA EN 2007</b>
<b>Cusco</b>	<b>367,791</b>	<b>447,588</b>
Acomayo	27,357	22,940
Anta	54,828	56,206
Calca	65,407	63,155
Canas	38,293	32,484
Canchis	96,937	95,774
Chumbivilcas	75,585	66,410
Espinar	62,698	57,582
La Convención	166,833	147,148
Paruro	30,939	25,567
Paucartambo	45,877	42,504
Quispicanchi	82,173	87,430
Urubamba	56,685	60,739
<b>Total</b>	<b>1,171,403</b>	<b>567,916</b>

*Nota:* INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2007 y 2018.

## ANEXO 4. TABLA DE CANTIDAD DE VEHICULOS POR DEPARTAMENTO

Tabla A.5. crecimiento del parque automotor nacional estimado por años, según departamento: 2012 – 2021

DEPARTAMENTO	2012	2013 <sup>R</sup>	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Amazonas	2 400	2 351	2 314	2 275	2 273	2 227	2 182	2 142	2 119	2 079
Ancash	25 418	27 542	29 573	31 213	33 542	34 923	36 190	37 703	38 725	40 373
Apurímac	4 039	4 083	4 139	4 192	4 216	4 177	4 120	4 048	3 975	3 929
Arequipa	134 533	149 892	164 302	176 315	187 929	200 560	211 735	222 491	229 266	241 743
Ayacucho	5 941	5 968	6 021	6 022	6 041	6 015	5 918	5 798	5 686	5 687
Cajamarca	19 673	21 461	22 664	23 740	24 943	26 224	27 674	29 036	30 014	32 765
Cusco	53 675	59 459	64 820	69 213	73 997	79 874	84 942	89 338	91 802	95 835
Huancavelica	1 323	1 300	1 315	1 286	1 286	1 259	1 235	1 210	1 186	1 163
Huánuco	13 476	14 261	14 911	15 648	16 382	16 915	17 367	17 991	18 075	18 269
Ica	26 551	26 398	26 439	26 715	27 092	27 423	27 558	27 970	27 923	27 958
Junín	56 237	59 019	61 933	64 576	67 049	69 760	72 316	74 947	76 284	78 821
La Libertad	167 325	172 968	178 433	183 931	190 073	196 040	202 558	208 882	213 166	223 529
Lambayeque	53 902	58 142	61 896	65 160	68 261	71 328	74 092	76 586	78 677	82 789
Lima y Callao	1 395 576	1 498 037	1 590 755	1 674 145	1 752 919	1 837 347	1 908 672	1 982 650	2 025 227	2 090 001
Loreto	5 313	5 443	5 533	5 501	5 501	5 489	5 477	5 486	5 469	5 485
Madre de Dios	1 062	1 123	1 136	1 161	1 223	1 308	1 383	1 405	1 407	1 461
Moquegua	14 608	14 944	14 979	14 931	14 931	14 887	14 810	14 691	14 535	14 607
Pasco	7 238	7 108	6 956	6 804	6 804	6 660	6 545	6 441	6 790	7 402
Piura	42 404	46 029	49 576	52 390	55 060	57 740	60 006	62 419	64 836	69 457
Puno	40 543	43 477	45 056	46 200	47 696	49 387	51 041	52 689	53 692	55 720
San Martín	10 926	11 271	11 648	12 047	12 358	12 669	13 052	13 491	13 957	14 269
Tacna	44 430	45 960	47 180	48 201	49 382	50 858	52 161	53 271	53 978	58 892
Tumbes	3 257	3 320	3 372	3 415	3 451	3 423	3 375	3 313	3 246	3 181
Ucayali	7 987	8 319	8 745	9 052	9 310	9 608	9 918	10 310	10 669	11 315
<b>TOTAL</b>	<b>2 137 837</b>	<b>2 287 875</b>	<b>2 423 696</b>	<b>2 544 133</b>	<b>2 661 719</b>	<b>2 786 101</b>	<b>2 894 327</b>	<b>3 004 308</b>	<b>3 070 704</b>	<b>3 186 730</b>

*Nota:* Superintendencia Nacional de los Registros Públicos (2012 - 2021) y La Asociación Automotriz del Perú (2014 -2020)

## ANEXO 5. EQUIPAMIENTO INTERNO DE SHELTER EN REFERENCIA A NORMATIVA DIGESA Y USEPA

A continuación, se presenta la distribución interna del Shelter de monitoreo ambiental - UNSAAC (Figura A. ) en referencia a la normativa del DIGESA (2005) haciendo alusión al modelo planteado por la USEPA (Figura A. ).

**Figura A.1.**

*Estructura de Shelter – UNSAAC (b)*

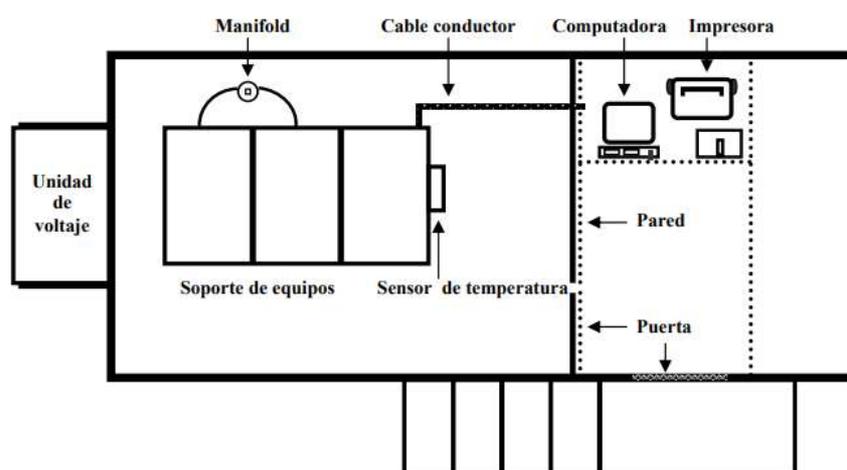


Largo : 3.00 m  
 Ancho : 2.00 m  
 Altura : 2.00 m  
 Altura desde la superficie de la Tierra hasta la base de la cabina: 0.70 m

*Nota:* Libro energía limpia y cero emisión (Warthon, 2017)

**Figura A.2.**

*Distribución y construcción de la estación de monitoreo*



*Nota:* DIGESA (2005)

## ANEXO 6. LISTA DE PARÁMETROS DE PROTOCOLO AVANZADO DEL EQUIPO

## SERINIUS 40

#	Descripción	Notas
1	Cal/Zero Valve	0=Zero, 1=Cal
2	Internal Span Valve	0=Closed, 1=Open
3	Spare Valve 1	0=Closed, 1=Open
4	Spare Valve 2	0=Closed, 1=Open
5	Spare Valve 3	0=Closed, 1=Open
6	Sample/Cal Valve	0=Sample, 1=Cal/Zero
7	NOx Measure Valve	0=NO, 1=NOx
8	NOx Bypass Valve	0=NO, 1=NOx
9	NOx Background Valve	0=Closed, 1=Open
10	Valve Sequencing	0=Off, 1=On
11	LCD Contrast Pot	0=Lightest, 255=Darkest
12	SO <sub>2</sub> Ref Zero Pot	S50 Reference zero pot
13	CO Input Pot	S30 Input pot
14	CO Reference Test Pot	Not Used
15	CO Measure Pot	Not Used
16	High Volt Adjust Pot	PMT High Voltage Adjust Pot for S50 & S40
17	SO <sub>2</sub> Lamp Adjust Pot	S50 Lamp adjustment Pot
18	O <sub>3</sub> Lamp Adjust Pot	S10 Lamp adjustment Pot
19	O <sub>3</sub> Meas. Zero Pot (Coarse)	S10 Signal zero measure (coarse)
20	O <sub>3</sub> Meas. Zero Pot (Fine)	S10 Signal zero measure (fine)
21	PMT Fan Pot	Optical Bench fan speed control pot
22	Rear Fan Pot	Chassis Fan speed control pot
23	Pump Coarse Pot	Internal Pump speed fine pot
24	Pump Fine Pot	Internal Pump speed coarse pot
25	Analog input 0	SO <sub>2</sub> Reference signal
26	Analog input 1	CO Reference signal
27	Analog input 2	O <sub>3</sub> Reference signal
28	Analog input 3	SO <sub>2</sub> & O <sub>3</sub> Lamp current
29	Analog input 4	Flow block pressure
30	Analog input 5	Cell pressure
31	Analog input 6	Ambient pressure
32	Analog input 7	Raw ADC calibration input
33	Analog input 8	MFC1 Not used
34	Analog input 9	Concentration data
35	Analog input 10	MFC2 Not used
36	Analog input 11	MFC3 Not used
37	Analog input 12	EXTERNAL ANALOG INPUT 0
38	Analog input 13	EXTERNAL ANALOG INPUT 1
39	Analog input 14	EXTERNAL ANALOG INPUT 1
40	Analog input 15	MFC0 Not used

---

41	CO Meas. Zero Pot (coarse)	S30 Measure ZERO coarse adjustment Pot
42	CO Meas. Zero Pot (fine)	S30 Measure ZERO fine adjustment Pot
43	SO <sub>2</sub> Input Pot	SO <sub>2</sub> Measure Signal Gain Pot
44	SO <sub>2</sub> Ref. Gain Pot	SO <sub>2</sub> Reference Signal Gain Pot
45	SO <sub>2</sub> Meas. Zero Pot	SO <sub>2</sub> Measure zero pot
46	O <sub>3</sub> Input Pot	O <sub>3</sub> Input signal gain pot
47	Diagnostic Test Pot	The Diagnostic mode adjustment pot for all the analysers except for S30
48	NO <sub>x</sub> Input Pot	PMT signal input gain control FOR NO <sub>x</sub>
49	PGA Gain	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
50	Gas 1 Conc.	Primary gas concentration currently displayed on the front screen E.g. NO
51	Gas 2 Conc.	Secondary gas concentration currently displayed on front screen E.g. NO <sub>x</sub>
52	Gas 3 Conc.	Calculated gas concentration currently displayed on front screen E.g. NO <sub>2</sub>
53	Gas 1 Avg.	Average of the readings (for Gas1) of the last n minutes where n is the averaging period
54	Gas 2 Avg.	Average of the readings (for Gas2) of the last n minutes where n is the averaging period
55	Gas 3 Avg.	Average of the readings (for Gas3) of the last n minutes where n is the averaging period
56	Instrument Gain	Current calibration value (default is 1.0)
57	Serial ID	Multidrop or Bayern-Hessen gas id
58	Bayern-Hessen 2nd ID	For multigas instruments only
59	Decimal Places	2-May
60	Noise	Instrument noise
61	Gas 1 Offset	A offset applied to Gas 1
62	Gas 3 Offset	A offset applied to Gas 3
63	Flow Temperature	Temperature of the flow block
64	Lamp Current	Lamp current in mA E.g. 35mA
65	Digital Supply	Digital Supply voltage (should always read close to 5 volts)
66	Conc. Voltage	Concentration Voltage
67	High Voltage	High Voltage reading for PMT
68	Ozonator	0=Off, 1=On
69	Control Loop	0=Off, 1=On (default is On)
70 - 215	...	...

---



Correo: info@rptechlab.com Web: www.rptechlab.com

**Certificado de Calibración**

N°1807- 02

Pagina 2 de 3

**Datos Técnicos del Instrumento**

<i>Linealidad</i>	1 % de la escala total
<i>Precisión</i>	0.4 ppb o 0.5 % de la lectura, lo que sea mayor.
<i>Resolución</i>	0,001

\*Esta información proviene del manual de fabricante.

**Metodo de Calibración**

La calibración se realizó por lecturas del equipo con gases patron según el procedimiento indicado en el Manual del Fabricante (Version 3.2)

**Lugar de Calibración**

Shelter del la UNSAAC - CUSCO

**Condiciones Ambientales**

	Temperatura °C
Promedio	17.3

**Trazabilidad**

Patron Usado	Numero de Lote	N° de certificado	F. Vencimiento
Gas Patron AIR LIQUIDE	PLU0280440	54872750-001	10/06/2022

**Parametros del Instrumento**

Parametros	Inicial	Final	Rango
Presión Ambiente	0.68142	0.68149	atm
Presión Celda	0.27474	0.21231	atm
Flujo de Muestra	0.44	0.46	slpm
Instrument Gain	8.91	10.58	-
Temp. Cell	50	50.04	°C
Conv. Efficiency(NO2)	98.49	98.49	-
Background (NO)	0.1	0.1001	V

Este documento no puede ser reproducido, ni alterado sin la aprobación escrita de Representaciones Techlab sac

Av. Paseo de la República 2406 -Lince-Lima14-Perú    Telefax:(511)221-1333/ Telf: 222-3628  
 Correo: info@rptechlab.com    Web: www.rptechlab.com

## *Certificado de Calibración*

N°1807- 02

Página 3 de 3

### LECTURAS DE AJUSTE DEL INSTRUMENTO

*Lectura de NO2*

	Patron	Lectura Inicial	Lectura Final	Unidades
Zero	0,05	4.04	0.92	ppb
Span (80 %)	399.8	370.25	400.41	ppb
Zero	0.05	-4.4	1.34	ppb

### RESULTADO DE MEDICIÓN

*Lectura de NO2*

Lectura del Instrumento	Concestracion del patron	Correcccion	Incertidumbre
ppb	ppb	ppb	ppb
400.41	399.8	0.61	4.72
308.01	299.7	8.31	3.02
206.98	199.6	7.38	2.54
98.91	99.81	-0.9	4.47
4.7	0.05	4.65	2.7

### OBSERVACIONES

- La calibracion se realizó luego de un periodo de estabilizacion del equipo SERINUS 40
- Considerar que 1 ppb equivale a  $1.10^{-9}$  mol/mol
- La incertidumbre de la Impureza del aire cero no se encuentra dentro del alcance de la calibración.

*Este documento no puede ser reproducido, ni alterado sin la aprobacion escrita de Representaciones Techlab sac*

Av. Paseo de la República 2406 -Lince-Lima14-Perú    Telefax:(511)221-1333/ Telf: 222-3628  
 Correo: info@rptechlab.com    Web: www.rptechlab.com

## ANEXO 8. INFORME DE CALIBRACIÓN DE LAS REPRESENTACIONES TECHLAB DE EQUIPO SERINUS 40 PARA EL MONITOREO DE NOX QUE CUMPLEN CON LAS NORMATIVAS DEL DIGESA Y EPA.



### INFORME TECNICO DETALLADO DE ACTIVIDADES - SERINUS 40 (NOX)

Lima, 11 de Julio de 2018

Señores:

**Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco**  
Av. De la Cultura #733  
Atención: Dr. Julio Warthon

Referencia: Contrata del servicio de analizadores de gases y muestreador de material particulado del Laboratorio del proyecto de Investigación vía CANON: "Disminución de la contaminación ambiental en la ciudad del Cusco mediante la sustitución de combustible fósil por energía eléctrica en el transporte urbano masivo de pasajeros"

Asunto: **Servicio de calibración del analizador de Óxidos de Nitrógeno (NOX) Modelo: Serinus 40, marca ECOTECH**

Estimados señores:

Sirva la presente para saludarles muy cordialmente y así mismo hacerles llegar el informe técnico referente al servicio de calibración correctivo del analizador de gas modelo Serinus 40, con N/S: 14-1488 marca ECOTECH, realizado en vuestras instalaciones los días 13, 14 de Junio y 10 de Julio del 2018.

#### Actividades realizadas:

1. **Revisión de conexiones internas del equipo:** Se procedió revisar las conexiones internas del equipo, encontrándose algunos consumibles gastados (para más información ver tabla N°1).
2. **Limpieza general del equipo:** Luego se realizó la limpieza general del equipo de la parte externa y la parte interna, esto incluye tarjetas electrónicas, cooler y sensores.
3. **Prueba de fugas:** Se realizó una prueba de fugas, para lo cual se realizaron los siguientes pasos.
  - a. Se encendió el Serinus 40 y se dejó que estabilice por una 1 hora.
  - b. Apaga la bomba de vacío y permitir que el instrumento retorne a su presión ambiente.
  - c. Luego se desconectó toda la tubería externa de la parte trasera del equipo Serinus 50.
  - d. Se conectó una válvula de verificación de fugas en el puerto de "Exhaust".
  - e. Se conecta la bomba de vacío en la herramienta y se deja la llave abierta para generar el vacío en el equipo.
  - f. Abrir – Main Menu – Service Menu
  - g. Seleccionar – Ozone Gen. Control – Off
  - h. Se dejó que el instrumento purgue por dos minutos el O3 de su sistema neumático.
  - i. Abrir – Main Menu – Service Menu – Diagnostic Menu – Valve Menu
  - j. Deshabilitar – Valve Sequencing – Disabled
  - k. Se cierra todas las válvulas a excepción de Sample/cal y la válvula NO select.
  - l. Bloqueo al puerto BGnd.
  - m. Dejar un tiempo para que evacue todo el sistema neumático.
  - n. Cerrar la válvula y tomar dato el vacío. Esperar por 3 minutos y observar el vacuometro de la herramienta. Esto no debe caer más de 5 Kpa. Se observó que la presión no disminuyo más de 5 Kpa.
  - o. Abrir – Main Menu – Service Menu – Diagnostic Menu – Valve Menu
  - p. Se cierra la valvula Sample/cal ( para realizar liberar el vacio de forma segura)
  - q. Permitir que el sistema se estilice por un minuto y luego remover el bloqueo del puerto de BGnd. Revisión de las mangueras internas en busca de torceduras.
  - r. Se removió la válvula de verificación.
  - s. Por último se habilito - Valve Sequencing – Enable
  - t. Abrir – Main Menu – Service Menu
  - u. Seleccionar – Ozone Gen. Control – Auto

Av. Paseo de la República 2406 – Lima 14  
Teléfono: (511) 222-3628  
[www.rptechlab.com](http://www.rptechlab.com)  
[info@rptechlab.com](mailto:info@rptechlab.com)



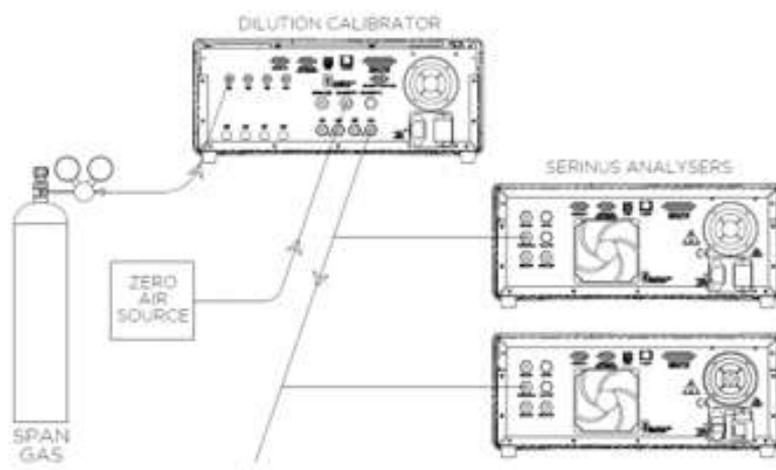
El equipo Serinus 40 paso la prueba de fuga satisfactoriamente.

4. **Calibración de presión:** Se realizó la calibración de presión la cual consistió en los siguiente pasos:
- Esta calibración envuelve dos puntos de calibración (Vacío y Ambiente)
  - Calibración de vacío:**
  - Se desconectó toda la tubería externa de la parte trasera del equipo Serinus 50.
  - Se ingresó a **Main Menu** → **Calibration Menu** → **Pressure Calibration Menu-** (Leer la nota) – **Ok**
  - Se editó **-Vaccum Set Pt** – (Leer las Instrucciones)- **Ok**
  - Conectar la bomba de vacío en el puerto Exhaust del instrumento.
  - Se espero por 1 minuto para que purgue todo el O3 del sistema neumático.
  - Conectar el barómetro en el puerto de BGnd, esperar por 2 a 5 minutos y se dejó que la lectura del barómetro se estabilice.
  - Ingresar el valor de lectura del barómetro en el instrumento, pero al ser casi iguales se dejó como estaba.
  - Después se lee las instrucciones mostradas en la pantalla – **Ok**
  - Apagar la bomba de aire y esperar por 1 minuto o hasta que el barómetro tenga lectura del ambiente. Desconectar el Barómetro y la bomba de vacío del puerto BGnd y el puerto Exhaust.
  - Se esperó de 2 a 5 minutos, se ingresó la lectura del ambiente del Barómetro en el Instrumento, pero al ser iguales se dejó como estaba.
  - Regreso - **Pressure Calibration Menu** – (Leer la nota) - **Ok**
5. **Calibración multipunto, usando gas patrón:** para esta actividad se realizó lo siguiente:
- Para este tarea se usaron los siguientes equipos y consumibles: Dilutor de Gases, Modelo: GasCal 1100, Marca ECOTECH (S/N: 14-0341) y el balón de gases, Marca: Air Liquide.
  - Se conectó la salida del Dilutor al puerto de muestra del equipo Serinus 50.
  - Luego se realizó la calibración Span (400 ppb) ingresando a **Quik Menu** – **Span calibrate** – y se ingresó en valor de 400 ppb (Tabla 1)

	Patron	Lectura Inicial	Lectura Final	Unidades
Zero	0,05	4.04	0.92	ppb
Span (80 %)	399.8	370.25	400.41	ppb
Zero	0,05	2.06	1.34	ppb

- Se El rango del equipo es de 500 ppb, por lo que se optó por tomar los siguientes puntos de calibración: 400 ppb, 300 ppb, 200 ppb, 100 ppb y 0 ppb (Aire Cero).
  - Entre cada punto de concentración se esperó un tiempo de 20 a 30 minutos para la estabilización de la lectura.
  - La calibración multipunto pasó satisfactoriamente como lo demuestra el certificado **SERINUS 40 – UNSAAC**.
6. **Medición de flujo de la muestra y background:** Medición de flujo y background, para esta labor se usó el equipo flujometro BIOS, Marca Mesalab (S/N: 134358). Durante este actividad se registro el siguiente flujo 0.42 slpm.
7. **Pruebas de funcionamiento:** Por último se realizó pruebas del funcionamiento del equipo Serinus 40, registrando la concentración en el ambiente.
8. **Equipos patrón a utilizar:** Para la calibración de los analizadores se utilizó el gas patrón, marca AIR LIQUIDE, N° de Certificado 54872750-001 (F. Vencimiento: 10/06/2022).

*Ejemplo de las conexiones de los equipos SERINUS con el gas patrón.*



**Recomendaciones:**

1. Realizar una limpieza de los equipos cada semana para evitar la acumulación de polvo dentro y fuera del equipo.
2. Seguir las recomendaciones acerca de la limpieza y mantenimiento del fabricante de acuerdo a los intervalos de tiempo. (Ver *Página 98 de la Manual – Punto 6.3 "Maintenance Schedule"*)
3. Reemplazar los consumibles

Tabla N°1

Numero de Parte	Descripción	Cantidad
E020203 -01	Serinus 40 Maintenance Kit.	01

**Conclusiones:**

1. El Analizador de Gas, marca ECOTECH, modelo SERINUS 40 con N/S: 14-1486 se encuentran operativos.

Sin otro particular, quedamos de ustedes,

Atentamente,

Luis Candela  
 Dpto. de Soporte Técnico  
 REPRESENTACIONES TECHLAB

**ANEXO 9. DECRETO SUPREMO N° 003-2017-MINAM. APRUEBAN ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AIRE Y ESTABLECEN DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS**

**6****NORMAS LEGALES**Miércoles 7 de junio de 2017 /  **El Peruano****AMBIENTE****Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias****DECRETO SUPREMO  
N° 003-2017-MINAM**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el numeral 22 del artículo 2 de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;

Que, de acuerdo a lo establecido en el artículo 3 de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, en adelante

la Ley, el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, entre otros, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en la citada Ley;

Que, el numeral 31.1 del artículo 31 de la Ley, define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente; asimismo, el numeral 31.2 del artículo 31 de la Ley, establece que el ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas y es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental;

Que, de acuerdo con lo señalado en el numeral 33.1 del artículo 33 de la Ley, la Autoridad Ambiental Nacional dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y Límites Máximos Permisibles (LMP) y, en coordinación con los sectores correspondientes, elabora o encarga las propuestas de ECA y LMP, los que serán remitidos a la Presidencia del Consejo de Ministros para su aprobación mediante Decreto Supremo;

Que, en virtud a lo dispuesto por el numeral 33.4 del artículo 33 de la Ley, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, de conformidad con lo establecido en el literal d) del artículo 7 del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización, y Funciones del Ministerio del Ambiente, este ministerio tiene como función específica elaborar los ECA y LMP, los cuales deberán contar con la opinión del sector correspondiente y ser aprobados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM se aprueba el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, el cual tiene por objetivo establecer los ECA para Aire y los lineamientos de estrategia para alcanzarlos progresivamente;

Que, a través del Decreto Supremo N° 069-2003-PCM, se adiciona el valor anual de concentración de Plomo a los ECA para Aire establecidos en el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, aprobado por Decreto Supremo N° 074-2001-PCM;

Que, mediante Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM, se aprueban nuevos parámetros y valores en los ECA para Aire y se modifica, entre otros, el valor del Dióxido de Azufre;

Que, mediante Decreto Supremo N° 006-2013-MINAM, se aprueban las disposiciones complementarias para la aplicación del ECA de Aire para el Dióxido de Azufre;

Que, a través de la Resolución Ministerial N° 205-2013-MINAM se establecen las cuencas atmosféricas a las cuales les será aplicable los numerales 2.2 y 2.3 del artículo 2 del Decreto Supremo N° 006-2013-MINAM;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 331-2016-MINAM se crea el Grupo de Trabajo encargado de establecer medidas para optimizar la calidad ambiental, estableciendo como una de sus funciones específicas, el analizar y proponer medidas para mejorar la calidad ambiental en el país;

Que, en mérito del análisis técnico realizado por el citado Grupo de Trabajo se ha identificado la necesidad de actualizar y unificar la normatividad vigente que regula los ECA para Aire;

Que, por otro lado, mediante Resolución Suprema N° 768-98-PCM, modificada por Resolución Suprema N° 588-99-PCM y Resolución Suprema N° 007-2004-VIVIENDA, se creó el Comité de Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao, con la finalidad de proponer mecanismos de coordinación interinstitucional y los cambios normativos orientados a la mejora de la calidad del aire de Lima y Callao;

Que, resulta necesario que el referido Comité se enmarque dentro de lo dispuesto en el numeral 3 del artículo 36 de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo, que establece que las Comisiones Multisectoriales de

naturaleza permanente son creadas con fines específicos para cumplir funciones de seguimiento, fiscalización, o emisión de informes técnicos. Se crean formalmente mediante decreto supremo refrendado por el Presidente del Consejo de Ministros y los titulares de los Sectores involucrados. Cuentan con Reglamento Interno aprobado por Resolución Ministerial del Sector al cual están adscritas;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 094-2017-MINAM, el Ministerio del Ambiente dispuso la prepublicación del proyecto de Decreto Supremo que aprueba los ECA para aire y establece disposiciones complementarias, en cumplimiento del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la Información Pública Ambiental y Participación y Consulta Ciudadana en Asuntos Ambientales, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM, y el artículo 14 del Reglamento que establece disposiciones relativas a la publicidad, publicación de Proyectos Normativos y difusión de Normas Legales de Carácter General, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2009-JUS; en virtud de la cual se recibieron aportes y comentarios al mismo;

De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8 del artículo 118 de la Constitución Política del Perú, así como el numeral 3 del artículo 11 de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

DECRETA:

#### **Artículo 1.- Aprobación de los Estándares de Calidad Ambiental para Aire**

Apruébase los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, que como Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo.

#### **Artículo 2.- Los Estándares de Calidad Ambiental para Aire como referente obligatorio**

2.1 Los ECA para Aire son un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, a cargo de los titulares de actividades productivas, extractivas y de servicios.

2.2 Los ECA para Aire, como referente obligatorio, son aplicables para aquellos parámetros que caracterizan las emisiones de las actividades productivas, extractivas y de servicios.

#### **Artículo 3.- Financiamiento**

El financiamiento para la aplicación de lo dispuesto en la presente norma, se realizará con cargo al presupuesto institucional de los pliegos involucrados, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.

#### **Artículo 4.- Refrendo**

El presente Decreto Supremo es refrendado por la Ministra del Ambiente, la Ministra de Salud, el Ministro de Transportes y Comunicaciones, el Ministro de Energía y Minas, el Ministro de la Producción y el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES**

##### **Primera.- Aplicación de los ECA para Aire en los instrumentos de gestión ambiental aprobados**

La aplicación de los ECA para Aire en los instrumentos de gestión ambiental aprobados, que sean de carácter preventivo, se realiza en la actualización o modificación de los mismos, en el marco de la normativa vigente del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA). En el caso de instrumentos correctivos, la aplicación de los ECA para Aire se realiza conforme a la normativa ambiental sectorial.

##### **Segunda.- Monitoreo de la calidad del aire**

Mediante Decreto Supremo, a propuesta del Ministerio del Ambiente, en coordinación con las autoridades competentes, se aprobará el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, en un plazo máximo de ciento ochenta (180) días calendario, contados desde la entrada en vigencia del presente dispositivo.

En tanto se apruebe el citado Protocolo Nacional, el monitoreo de la calidad del aire se realizará conforme a la normativa vigente.

Resolución Ministerial expedida por el Ministerio del Ambiente.”

**“Artículo 4.- Finalidad**

La Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao emitirá los informes técnicos que contengan las propuestas de mecanismos de coordinación interinstitucional y las modificaciones normativas orientadas a mejorar la calidad del aire de Lima y Callao.”

**“Artículo 5.- Financiamiento**

El cumplimiento de las funciones de la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao se financia con cargo al presupuesto institucional del Ministerio del Ambiente, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público. Asimismo, los gastos que pueda involucrar la participación de los representantes de la citada Comisión Multisectorial se financian con cargo al presupuesto de las entidades a las cuales pertenecen”.

**Segunda.- Modificación del Reglamento Interno de la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao**

Mediante Resolución Ministerial emitida por el Ministerio del Ambiente, en el plazo máximo de treinta (30) días hábiles contados desde la entrada en vigencia del presente Decreto Supremo, la Comisión Multisectorial para la Gestión de la Iniciativa del Aire Limpio para Lima y Callao modificará su Reglamento Interno, aprobado por Resolución Ministerial N° 229-2013-VIVIENDA.

**DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA DEROGATORIA**

**Única.- Derogación de normas referidas al ECA para Aire**

Derógase el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, el Decreto Supremo N° 069-2003-PCM, el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM y el Decreto Supremo N° 006-2013-MINAM.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los seis días del mes de junio del año dos mil diecisiete.

PEDRO PABLO KUCZYNSKI GODARD  
Presidente de la República

ELSA GALARZA CONTRERAS  
Ministra del Ambiente

GONZALO TAMAYO FLORES  
Ministro de Energía y Minas

PEDRO OLAECHEA ÁLVAREZ CALDERÓN  
Ministro de la Producción

PATRICIA J. GARCÍA FUNEGRA  
Ministra de Salud

BRUNO GIUFFRA MONTEVERDE  
Ministro de Transportes y Comunicaciones

EDMER TRUJILLO MORI  
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

**Anexo  
Estándares de Calidad Ambiental para Aire**

Parámetros	Periodo	Valor [µg/m <sup>3</sup> ]	Criterios de evaluación	Método de análisis <sup>(1)</sup>
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM <sub>2,5</sub> )	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM <sub>10</sub> )	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) <sup>(2)</sup>	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman.  (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O <sub>3</sub> )	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM <sub>10</sub>	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM <sub>10</sub> (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

NE: No Exceder.

<sup>(1)</sup> o método equivalente aprobado.

<sup>(2)</sup> El estándar de calidad ambiental para Mercurio Gaseoso Total entrará en vigencia al día siguiente de la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, de conformidad con lo establecido en la Séptima Disposición Complementaria Final del presente Decreto Supremo.

**ANEXO 10. DECRETO SUPREMO DS. N°10-2019-MINAM. QUE APRUEBA EL  
PROTOCOLO NACIONAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD  
AMBIENTAL DEL AIRE**



**Decreto Supremo**  
**N° 010 -2019-MINAM**

**DECRETO SUPREMO QUE APRUEBA EL PROTOCOLO NACIONAL DE MONITOREO  
DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE**

**EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA**

**CONSIDERANDO:**

Que, el numeral 22 del artículo 2 de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;

Que, de acuerdo a lo establecido en el artículo 3 de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, entre otros, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en la citada Ley;

Que, el numeral 31.1 del artículo 31 de la Ley mencionada, define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente; asimismo, el numeral 31.2 del artículo 31 de la referida Ley, establece que el ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas y es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental;

Que, mediante Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, cuya Segunda Disposición Complementaria Final dispuso que mediante Decreto Supremo, a propuesta del Ministerio del Ambiente, en coordinación con las autoridades sectoriales competentes, se apruebe el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental de Aire;

Que, en ese sentido, el Ministerio del Ambiente ha elaborado el "Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire", instrumento que permite estandarizar los criterios técnicos para el monitoreo ambiental del aire en el país, a fin de generar información de calidad, comparable, compatible, confiable y representativa;

Que, dicha propuesta fue publicada con el objeto de recibir aportes y comentarios de las y los actores interesados y la ciudadanía en general, dando cumplimiento a lo dispuesto en el artículo 39 del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la Información Pública Ambiental y Participación y Consulta Ciudadana en Asuntos Ambientales, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM, y el artículo 14 del Reglamento que establece disposiciones relativas a la publicidad, publicación de Proyectos Normativos y difusión de Normas Legales de Carácter General, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2009-JUS;



De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8 del artículo 118 de la Constitución Política del Perú, así como el numeral 3 del artículo 11 de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

**DECRETA:**

**Artículo 1.- Aprobación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire**

Apruébese el "Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental del Aire", el mismo que, en calidad de Anexo, forma parte integrante del presente Decreto Supremo.

**Artículo 2.- Estándar de Calidad Ambiental para Aire de Mercurio Gaseoso Total**

El Estándar de Calidad Ambiental para Aire del parámetro Mercurio Gaseoso Total, conforme a la Séptima Disposición Complementaria Final del Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, entra en vigencia al día siguiente de la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.

**Artículo 3.- Publicación**

El Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, aprobado en el artículo 1, es publicado en el Portal del Estado Peruano ([www.peru.gob.pe](http://www.peru.gob.pe)) y en el Portal Institucional del Ministerio del Ambiente ([www.gob.pe/minam](http://www.gob.pe/minam)), el mismo día de la publicación del presente Decreto Supremo en el Diario Oficial "El Peruano".

**Artículo 4.- Financiamiento**

La implementación de lo establecido en la presente norma se financia con cargo al presupuesto institucional de las entidades involucradas, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.

**Artículo 5.- Refrendo**

El presente Decreto Supremo es refrendado por la Ministra del Ambiente, la Ministra de Salud, el Ministro de Transportes y Comunicaciones, el Ministro de Energía y Minas, la Ministra de la Producción y el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

**DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS TRANSITORIAS**

**Primera.- Instrumentos de gestión ambiental aprobados o en trámite ante la Autoridad Competente**

Las personas jurídicas y/o naturales titulares de proyectos de inversión que cuenten con Instrumentos de Gestión Ambiental aprobados por la autoridad competente o hayan iniciado un procedimiento administrativo para su aprobación, deben adecuar sus programas de monitoreo al Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, durante la próxima actualización o modificación de los Instrumentos de Gestión Ambiental, en tanto ello comprenda el componente aire, salvo que el administrado así lo solicite y de conformidad con la normativa ambiental vigente.

Los monitoreos de calidad ambiental del aire que forman parte de la línea base de los instrumentos de gestión ambiental, que se hayan iniciado antes de la entrada en vigencia del presente Decreto Supremo o se inicien hasta en ciento ochenta (180) días calendario posterior a la entrada en vigencia del mismo, pueden realizarse de conformidad a la normativa previa a la aprobación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.

**Segunda.- Acreditación de los laboratorios o servicios de evaluación de la conformidad de las entidades públicas.**

Las entidades públicas que realicen acciones de monitoreo de calidad ambiental del aire y que no cuenten con métodos acreditados de conformidad con lo establecido en





### DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA DEROGATORIA

#### Única.- Derogatoria

Derogarse la Resolución Directoral N° 1404/2005/DIGESA/SA que aprueba el "Protocolo de Monitoreo de Calidad del Aire y Gestión de los Datos", y la Resolución Ministerial N° 194-2010-PRODUCE que aprueba el "Protocolo para el Monitoreo de Emisiones Atmosféricas y Calidad del Aire de la industria de la Harina y Aceite de Pescado y Harina de Residuos Hidrobiológicos" en los siguientes extremos:

- La última fila de la Tabla N° 3 (Medio: Calidad de aire).
- Toda la sección 4.3.7.2 "Número de Estaciones".
- El último párrafo de la sección 4.3.8.2 "Metodología de análisis".



### DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA MODIFICATORIA

#### Única.- Modificatoria

Modifíquese la denominación del "Protocolo para el Monitoreo de Emisiones Atmosféricas y Calidad del Aire de la industria de Harina y Aceite de Pescado y Harina de Residuos Hidrobiológicos", aprobado por Resolución Ministerial N° 194-2010-PRODUCE, por la de "Protocolo para el Monitoreo de Emisiones Atmosféricas de la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Harina de Residuos Hidrobiológicos".

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los veintinueve días del mes de noviembre del año dos mil diecinueve.



MARTÍN ALBERTO VIZCARRA CORNEJO  
Presidente de la República

FABIOLA MUÑOZ DODERO  
Ministra del Ambiente

EDMER TRUJILLO MORI  
Ministro de Transportes y Comunicaciones

MARÍA ELIZABETH HINGSTROZA PEREYRA  
Ministra de Salud

RODOLFO YAÑEZ WENDORFF  
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

JUAN CARLOS LIU YONSEN  
Ministro de Energía y Minas

ROCÍO INGRID BARRIOS ALVARADO  
Ministra de la Producción

**ANEXO 11. LIBRO ENERGIA LIMPIA Y CERO EMISIÓN DONDE SE PRESENTAN PRIMEROS RESULTADOS DEL TRABAJO DE ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA CIUDAD DEL CUSCO.**



LINK: <http://vrin.unsaac.edu.pe/publicaciones/4/energia-limpia-y-cero-emision-.html>

**ANEXO 12. CODIGO EN PYTHON PARA GENERAR GRAFICA DEL PROMEDIO  
HORARIO DEL PUNTO DE MONITOREO SAN SEBASTIÁN CENTRO DE SALUD  
22-06-2018**

```
# San Sebastián Centro de Salud 22-06-2018
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Cargar los datos desde el archivo Excel
archivo_excel = r'C:\Users\Amanda\Desktop\PROYECTOS
VISUAL\NO2_TESIS\OFICIAL\22-06-2018.xlsx'
hoja = 'Sheet' # Cambia esto al nombre de tu hoja en el archivo Excel

dataframe = pd.read_excel(archivo_excel, sheet_name=hoja)

# Convertir la columna de 'Hora' a cadenas
dataframe['Hora'] = dataframe['Hora'].apply(lambda x: x.strftime('%H:%M:%S'))

# Filtrar valores de NO2 entre 0 y 600
dataframe = dataframe[(dataframe['NO2'] >= 0) & (dataframe['NO2'] <= 600)]

# Extraer datos de las columnas que necesitas
horas = dataframe['Hora']
concentraciones = dataframe['NO2']

# Calcular el promedio de cada hora (cada 60 datos) y ajustar para evitar promedios al final
concentraciones_promedio = []
for i in range(0, len(concentraciones) // 60 * 60, 60):
    promedio = concentraciones[i:i + 60].mean()
    concentraciones_promedio.append(promedio)

# Crear el gráfico de línea
plt.figure(figsize=(10, 6)) # Tamaño del gráfico

# Mantener las etiquetas originales del eje X
plt.xticks(range(0, len(concentraciones) // 60 * 60, 60), horas[:len(concentraciones) // 60 *
60:60], rotation='vertical')

# Calcular los puntos medios entre las horas para los picos
puntos_medios = [i + 30 for i in range(0, len(concentraciones) // 60 * 60, 60)]

# Crear el gráfico de línea de los picos en los puntos medios
plt.plot(puntos_medios, concentraciones_promedio, marker='o', linestyle='-', color='k',
label=f'Promedio de NO2 por hora\nPicos de concentración\nCantidad de datos válidos:
{cantidad_datos_validos}')

# Agregar líneas rectas en el eje Y con las descripciones en la leyenda
plt.axhline(y=40, color='b', linestyle='-', linewidth=2, label='ECA-OMS(2006) Anual: 40')
```

```
plt.axhline(y=25, color='g', linestyle='-', linewidth=2, label='ECA-OMS(2021) Diario: 25')
plt.axhline(y=200, color='c', linestyle='-', linewidth=2, label='MINAM(2017) Hora: 200')
plt.axhline(y=100, color='purple', linestyle='-', linewidth=2, label='MINAM(2017) Anual:
100')
```

```
# Identificar el punto con la mayor concentración
max_index = np.argmax(concentraciones_promedio)
max_value = concentraciones_promedio[max_index]
```

```
# Crear una línea vertical en el valor de la concentración máxima
plt.axvline(x=puntos_medios[max_index], color='r', linestyle='--', linewidth=2,
label=f'Máximo Promedio: {max_value:.2f} µg/m³')
```

```
# Agregar el gráfico de picos como fondo
plt.fill_between(range(len(concentraciones) // 60 * 60),
concentraciones[:len(concentraciones) // 60 * 60], color='gray', alpha=0.5, label='Picos de
concentración')
```

```
### Calcular promedio general y desviación estándar
promedio_general = np.mean(concentraciones)
desviacion_general = np.std(concentraciones)
# Agregar línea de promedio general en el eje X con descripción en la leyenda
plt.axhline(y=promedio_general, color='deepskyblue', linestyle='--', linewidth=2,
label=f'Promedio diario NO2: {promedio_general:.2f} ± {desviacion_general:.2f}')
###
```

```
# Configurar etiquetas y título
plt.xlabel('Tiempo (Horas)')
plt.ylabel('Concentración Promedio (µg/m³)')
plt.title('PROMEDIO DE CONCENTRACIÓN DE NO2 POR HORA')
```

```
# Establecer los límites del eje x para que empiece desde el inicio
plt.xlim(0, len(concentraciones) // 60 * 60)
```

```
# Mostrar el gráfico
plt.grid(True) # Agregar cuadrícula
plt.legend() # Mostrar leyenda
plt.tight_layout() # Ajustar diseño
```

```
plt.show()
```

**ANEXO 13. TABLA DE DATOS RECOLECTADOS DE NO<sub>2</sub> DURANTE LOS AÑOS  
2016 AL 2018.**

<b>DISTRITO</b>	<b>PUNTO_DE_MONITOREO</b>	<b>FECHA</b>	<b>Promedio_NO<sub>2</sub>_limpieza_0_600</b>	<b>N_datos_sin_limpieza</b>	<b>N_datos_limpieza</b>
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	22/05/2016	<b>54.15</b>	1440	1365
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	23/05/2016	<b>69.13</b>	1440	1301
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	24/05/2016	<b>59.55</b>	1440	1345
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	25/05/2016	<b>71.05</b>	1440	1314
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	26/05/2016	<b>63.11</b>	1440	1359
<b>Wanchaq</b>	HOSPITAL DE LA SOLIDARIDAD	27/05/2016	<b>53.89</b>	1440	1238
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	10/06/2016	<b>44.99</b>	1440	1283
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	11/06/2016	<b>39.85</b>	1440	1323
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	12/06/2016	<b>36.21</b>	1440	1233
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	13/06/2016	<b>50.40</b>	1440	1161
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	7/09/2016	<b>55.59</b>	1440	1254
<b>Cusco</b>	PLAZA DE ARMAS	8/09/2016	<b>60.58</b>	1440	1292
<b>San Sebastián</b>	Plaza de Armas	9/11/2016	<b>46.22</b>	1440	1258
<b>San Sebastián</b>	Plaza de Armas	10/11/2016	<b>52.19</b>	1440	1339
<b>San Sebastián</b>	Av. De la Cultura (8o paradero)	20/11/2016	<b>118.15</b>	1440	1071
<b>San Sebastián</b>	Av. De la Cultura (8o paradero)	21/11/2016	<b>129.02</b>	1440	963
<b>San Sebastián</b>	Av. De la Cultura (8o paradero)	22/11/2016	<b>117.30</b>	1440	1006
<b>San Sebastián</b>	Av. De la Cultura (8o paradero)	23/11/2016	<b>125.59</b>	1440	1046
<b>Cusco</b>	Av. Universitaria, puerta número 06	29/11/2016	<b>62.65</b>	1400	1155
<b>Cusco</b>	Av. Universitaria, puerta número 06	30/11/2016	<b>54.26</b>	1326	1107
<b>Cusco</b>	Av. Universitaria, puerta número 06	1/12/2016	<b>44.10</b>	1298	904
<b>Cusco</b>	Av. Universitaria, puerta número 06	2/12/2016	<b>70.46</b>	1440	1042
<b>Cusco</b>	Av. Universitaria, puerta número 06	3/12/2016	<b>79.11</b>	1440	1260
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	14/02/2018	<b>26.02</b>	1438	1255
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	15/02/2018	<b>22.57</b>	1440	1323
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	16/02/2018	<b>22.87</b>	1440	1338
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	17/02/2018	<b>24.68</b>	1440	1350

<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	18/02/2018	<b>22.14</b>	1397	1301
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	19/02/2018	<b>24.86</b>	1440	1353
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	20/02/2018	<b>26.27</b>	1440	1385
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	21/02/2018	<b>30.05</b>	1440	1343
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	22/02/2018	<b>30.72</b>	1440	1350
<b>Cusco</b>	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	23/02/2018	<b>26.79</b>	1440	1332
<b>Cusco</b>	San Blas	10/03/2018	<b>26.74</b>	1440	1392
<b>Cusco</b>	San Blas	11/03/2018	<b>13.30</b>	1440	1344
<b>Cusco</b>	San Blas	12/03/2018	<b>15.59</b>	1440	1374
<b>Cusco</b>	San Blas	13/03/2018	<b>21.18</b>	1440	1330
<b>Cusco</b>	San Blas	14/03/2018	<b>21.01</b>	1440	1359
<b>Cusco</b>	San Blas	15/03/2018	<b>18.82</b>	1440	1348
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	18/03/2018	<b>27.40</b>	1440	1309
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	19/03/2018	<b>29.06</b>	1440	1304
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	20/03/2018	<b>28.72</b>	1440	1308
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	21/03/2018	<b>30.93</b>	1440	1329
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	22/03/2018	<b>29.21</b>	1440	1336
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	24/03/2018	<b>33.22</b>	1440	1317
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	25/03/2018	<b>29.39</b>	1440	1369
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	26/03/2018	<b>36.42</b>	1440	1322
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	27/03/2018	<b>31.26</b>	1440	1301
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	28/03/2018	<b>30.47</b>	1440	1315
<b>Cusco</b>	Plazoleta Limacpampa	29/03/2018	<b>29.83</b>	1440	1348
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	5/04/2018	<b>34.05</b>	1440	1335
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	6/04/2018	<b>45.99</b>	1440	1319
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	7/04/2018	<b>36.22</b>	1440	1301
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	8/04/2018	<b>27.39</b>	1440	1312
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	9/04/2018	<b>34.65</b>	1440	1130
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	10/04/2018	<b>28.53</b>	1273	1214
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	11/04/2018	<b>36.80</b>	1440	1354
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	12/04/2018	<b>30.97</b>	1440	1317
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	13/04/2018	<b>37.38</b>	1440	1127
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	14/04/2018	<b>32.79</b>	1440	1318

<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	15/04/2018	<b>23.36</b>	1440	1321
<b>Cusco</b>	Plazoleta Pumaqchupan	16/04/2018	<b>35.56</b>	1440	1322
<b>Cusco</b>	Calle Matará	20/04/2018	<b>59.28</b>	1440	1218
<b>Cusco</b>	Calle Matará	21/04/2018	<b>58.49</b>	1440	1309
<b>Cusco</b>	Calle Matará	22/04/2018	<b>36.30</b>	1440	1344
<b>Cusco</b>	Calle Matará	23/04/2018	<b>59.05</b>	1440	1288
<b>Cusco</b>	Calle Matará	24/04/2018	<b>55.92</b>	1440	1294
<b>Cusco</b>	Calle Matará	25/04/2018	<b>57.00</b>	1440	1293
<b>Cusco</b>	Calle Matará	26/04/2018	<b>57.47</b>	1440	1342
<b>Cusco</b>	Calle Matará	27/04/2018	<b>45.43</b>	1440	1356
<b>Cusco</b>	Calle Matará	28/04/2018	<b>45.16</b>	1440	1350
<b>Cusco</b>	Calle Matará	29/04/2018	<b>37.85</b>	1440	1336
<b>Cusco</b>	Calle Matará	30/04/2018	<b>53.90</b>	1440	1352
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	11/05/2018	<b>22.56</b>	1440	1292
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	12/05/2018	<b>23.44</b>	1440	1365
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	13/05/2018	<b>19.52</b>	1440	1343
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	14/05/2018	<b>22.75</b>	1440	1380
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	24/05/2018	<b>18.16</b>	1440	1232
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	25/05/2018	<b>25.76</b>	1440	1351
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	26/05/2018	<b>26.61</b>	1440	1393
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	27/05/2018	<b>19.60</b>	1440	1383
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	28/05/2018	<b>21.77</b>	1440	1392
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	29/05/2018	<b>23.47</b>	1440	1372
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	30/05/2018	<b>26.32</b>	1440	1369
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	31/05/2018	<b>24.61</b>	1440	1383
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	1/06/2018	<b>25.43</b>	1440	1385
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	2/06/2018	<b>21.30</b>	1435	1380
<b>Santiago</b>	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	3/06/2018	<b>18.07</b>	1440	1377
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	15/06/2018	<b>48.03</b>	1440	1358
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	16/06/2018	<b>43.41</b>	1440	1373
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	17/06/2018	<b>37.29</b>	1440	1378

<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	18/06/2018	<b>49.53</b>	1440	1357
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	19/06/2018	<b>55.04</b>	1440	1370
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	20/06/2018	<b>57.55</b>	1440	1382
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	21/06/2018	<b>52.22</b>	1440	1373
<b>San Sebastián</b>	Centro de Salud	22/06/2018	<b>59.90</b>	1440	1303
<b>San Jeronimo</b>	CLAS San Jeronimo	27/06/2018	<b>46.33</b>	1440	1281
<b>San Jeronimo</b>	CLAS San Jeronimo	28/06/2018	<b>46.50</b>	1440	1326
<b>San Jeronimo</b>	CLAS San Jeronimo	29/06/2018	<b>43.16</b>	1327	1164
<b>San Jeronimo</b>	CLAS San Jeronimo	30/06/2018	<b>56.22</b>	1419	1294

*Nota:* Elaboración propia (Solicitar uso de datos al autor)