Contaminación del aire y suelo del humedal marino costero por material particulado de fuentes industriales en el Callao, Perú

Air and soil pollution of coastal marine wetland by particulate matter from industrial sources in Callao, Perú

Irma Janet Zegarra Tello ^{1,a}, Carlos Francisco Cabrera Carranza ^{1,b}, Oscar Rafael Tinoco Gómez ^{2,c}, Rosa Karol Moore Torres ^{2,d}

Recibido: 11/11/2023 - Aprobado: 12/12/2023 – Publicado: 30/03/2025

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue analizar los impactos generados por el material particulado en la contaminación del aire y del suelo en el humedal marino-costero del Callao, Perú, durante el periodo 2020-2021, así como prever su situación futura. En cuanto a su metodología, se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, observacional y no experimental, siguiendo protocolos de investigación acordes con la normativa del Ministerio del Ambiente de Perú, las Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, y las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud.

A través de pruebas estadísticas como el rango con signos de Wilcoxon, la H de Kruskal-Wallis, y el método Delphi con el promedio Beta y la desviación estándar, se demostró que el material particulado PM2.5 impacta significativamente en la calidad del aire del humedal. También se encontró que la calidad del suelo se ve afectada por el material particulado, específicamente en las concentraciones de mercurio, arsénico y plomo. Los expertos coinciden en que dicho comportamiento negativo para el humedal se mantendrá.

Palabras claves: humedal costero, marino, material particulado, contaminación del aire, contaminación del suelo.

ABSTRACT

The objective of the research was to analyze the impacts generated by particulate matter on air and soil pollution in the marine-coastal wetland of Callao-Peru, period 2020-2021, as well as to predict its future situation. Regarding its methodology, it was developed under a quantitative, observational and non-experimental approach with research protocols in accordance with the provisions of the regulations of the Ministry of the Environment of Peru, the Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health and the World Health Organization air quality guidelines.

Through statistical tests such as Wilcoxon Signed Rank, Kruskal Wallis H and Delphi method with Beta average and standard deviation, it was demonstrated that PM2.5 particulate matter significantly impacts the air quality of the wetland. The quality of the soil is also affected by particulate matter in its compositions: mercury, arsenic and lead. Experts agree that this negative behavior towards the wetland will continue.

Keywords: coastal wetland, marine, seascape particulate matter, air pollution, soil pollution.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Industrial. Lima, Perú.

a Autor para correspondencia: irmajenet.zegarra@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2227-7708>

b Email: ccabrerc@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5821-5886>

c Email: otinocog@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7927-931X>

d Email: kmoores@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7608-9377>

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación se ha convertido en un problema a escala mundial y plantea un riesgo significativo para la salud humana y los ecosistemas naturales (Bozdogan et al., 2019). Sectores como el urbano, el transporte marítimo, el desarrollo industrial y la minería, entre otros, contribuyen al crecimiento económico de los países, pero también producen una serie de impactos ambientales perjudiciales en los ecosistemas donde se realizan sus actividades operativas. Estudios demuestran que los más afectados han sido los humedales costeros (He et al., 2020; Newton et al., 2020). Si bien es cierto que los humedales costeros brindan múltiples beneficios, como la recarga de aguas subterráneas, la purificación del agua y la preservación del hábitat de otras especies, estas contribuciones son subestimadas ya que sus servicios no se comercializan en mercados convencionales (De Groot et al., 2018).

El material particulado (PM) es un indicador clave de la contaminación del aire, que proviene de actividades naturales y humanas y puede permanecer suspendido en el aire durante mucho tiempo, así como viajar largas distancias, causando una amplia gama de enfermedades con efectos demostrados en la salud humana (Yang et al., 2021; Gilooly et al., 2019; Zhang et al., 2017; Kim & Kabir, 2015). Una característica importante es el tamaño de las partículas y su potencial para causar problemas de salud. Destacan las "partículas gruesas inhalables" PM10 (diámetro de 2.5 a 10 µm) y el PM2.5 "partículas finas" (diámetros menores a 2.5 µm). Debido al potente papel del PM y sus contaminantes asociados, es importante conocer detalladamente sus impactos en la salud humana. La contaminación del aire con material particulado, y específicamente con partículas finas (PM2.5), varía de manera espacial y temporal en concentración y composición.

Los suelos de los humedales no se encuentran exentos de contaminación. Estudios demuestran que la configuración espacial del uso y cobertura del suelo también influyen en los niveles del PM (Park et al., 2021), a pesar de ser un recurso indispensable para el desarrollo de la vida. Durante siglos, las actividades industriales, mineras, la agricultura y el manejo de residuos han contaminado los suelos con altas concentraciones de metales tóxicos, con efectos negativos en los ecosistemas (Fajardo et al., 2017), los recursos naturales y la salud humana (Chung et al., 2011; Robles et al., 2019). A diferencia de los compuestos orgánicos, los metales no se pueden degradar, por lo tanto, requieren un tratamiento para su eliminación. La mayoría de los tratamientos son costosos y degradan la fertilidad del suelo, lo que luego impacta de manera adversa en el ecosistema (Xu et al., 2020).

En el presente trabajo se estudió la influencia del material particulado en la calidad del aire y del suelo del humedal marino-costero del Callao-Perú. Para ello, se plantearon tres hipótesis de investigación. La primera hipótesis sostiene que el material particulado (PM2.5) impacta negativamente en la calidad del aire. La segunda hipótesis indica que el material particulado en su composición de mercurio impacta significativamente en la calidad del suelo del humedal. La tercera hipótesis expresa que el material particulado en su composición de arsénico

y plomo impacta negativamente en la calidad de los suelos industriales, del humedal y en los suelos residenciales. Cabe resaltar que buscar un ambiente sustentable es la meta de todo individuo u organización responsable y comprometida con salvaguardar los recursos del planeta. Por ello, la investigación permitió conocer el estado actual del humedal marino-costero, así como su grado de afectación tanto en el presente como su situación futura, en caso de no tomarse acciones de remediación.

II. MÉTODO

El diseño de la investigación fue de enfoque cuantitativo y diseño no experimental. El estudio se llevó a cabo en el humedal marino-costero ubicado en la avenida Contralmirante Mora, una zona industrial donde se desarrollan actividades como el transporte de minerales, hidrocarburos, productos químicos y pesqueros, así como actividades residenciales dentro de la provincia del Callao, Perú.

Se utilizaron equipos, instrumentos y materiales para la toma de muestras. En el caso del muestreo de la calidad del aire, se realizaron mediciones con equipos tales como el muestreador de PM10 y el muestreador de PM2.5 de alto y bajo volumen, respectivamente, una estación meteorológica, un rotámetro y un GPS. En cuanto al muestreo de suelos, este fue superficial (entre 0 y 30 cm de profundidad) conforme a la Guía para el muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014) entre los meses de noviembre del año 2020 y enero del año 2021. Para la recolección de las muestras, se aplicó la técnica del cuarteo diagonal para lograr que fueran homogéneas y representativas, depositándolas en un contenedor especial para su posterior tratamiento en el laboratorio.

Para la calidad del aire, tanto la determinación de los parámetros como su metodología de análisis se desarrollaron según el anexo "Estándares de calidad ambiental para aire" del Decreto Supremo n.º 003-2017-MINAM, así como las Guías de calidad de aire de la OMS (2021). En cuanto a la calidad de los suelos, la elección de los parámetros inorgánicos y su posterior análisis en laboratorio se realizaron bajo la disposición del anexo "Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo" del Decreto Supremo n.º 011-2017-MINAM. Los resultados se compararon con los estándares de suelo comercial, industrial y residencial de la normativa peruana, además de la normativa de la Tabla 1 de las Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health para suelos industriales y residenciales (CCME, 2012; EC, 1999).

III. RESULTADOS

3.1. De los datos meteorológicos

Se llevaron a cabo dos monitoreos ambientales con el fin de obtener datos meteorológicos, como la temperatura ambiental versus la humedad relativa y la velocidad del viento en las estaciones monitoreadas. Los resultados evidenciaron que la humedad relativa tuvo un comportamiento inverso a la temperatura ambiental: a mayor humedad relativa, se retienen los particulados. Además, los vientos tuvieron una predominancia sureste

y, en cuanto a la velocidad, se consideraron como vientos suaves (Tabla 1). Esto es importante, ya que el viento actúa como agente de transporte y de sedimentación cuando pierde velocidad.

3.2. De la calidad de aire

Los resultados muestran la composición del material particulado, si bien el estándar de calidad ambiental para aire [ECA] no indica valores de comparación (Tablas 2 y 3) se consideró importante conocer la composición del material particulado.

3.2.1. Del impacto negativo del material particulado en la calidad del aire.

Resultados y análisis:

El p –valor (0,012) < 0,05, (Ver tabla 4), por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se concluye que el material particulado (PM2.5) impacta negativamente en la calidad del aire del humedal marino–costero evaluado.

Toda fuente industrial de emisión de material particulado termina en una inmisión o deposición en el suelo.

Tabla 1

Resumen de los datos meteorológicos correspondientes al ambiente según muestreo, Callao, Perú, 2020-2021

Parámetros	Primer muestreo	Segundo muestreo	Diferencia
Temperatura °C, promedio	17.64	21.28	3.64
% Humedad relativa, promedio	82.86	88.34	5.48
Velocidad del viento m/s, promedio	1.35	1.55	0.20

Nota: Elaborado a partir de los resultados del monitoreo ambiental. El primer muestreo se llevó a cabo en el mes de noviembre del 2020, mientras que el segundo, se realizó en el mes de enero del 2021. La baja diferencia demuestra la situación propicia para la toma de muestras.

Tabla 2

Primer monitoreo de calidad de aire en el año 2020, Callao, Perú

Humedal coordenadas						
Norte	8 668 207		Fecha: Del 02 al 07 de noviembre 2020			
Este	0 267 411					
Primer muestreo						
Parámetros	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	D.S.N° 003-2017-MINAM
(en µg /m3)	02-11-20	03-11-20	04-11-20	05-11-20	06-11-20	
	C/Tratamiento	C/Tratamiento	C/Tratamiento	Otras activ	Otras activ	
Material particulado PM 10	54,90	25,78	72,18	64,76	37,57	100
Material particulado PM 2.5	32,54	16,66	54,86	43,81	10,14	50
Arsénico	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	-
Boro	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-
Bario	0,0064	<0,0001	0,0112	<0,0001	<0,0001	-
Cadmio	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-
Cerio	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	-
Cobalto	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-
Cromo	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-
Plomo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,5 (24 h)
Antimonio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-
Selenio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,010	-
Silicio	0,0367	0,0284	0,0116	0,0106	0,0070	-
Estaño	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-
Estroncio	<0,00004	<0,00004	<0,00004	<0,00004	<0,00004	-
Titanio	0,0034	<0,0001	<0,0001	0,0016	<0,0001	-
Talio	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	-
Vanadio	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-
Zinc	0,0475	0,0166	<0,003	<0,003	<0,003	-

Nota: Monitoreo ambiental

Tabla 3

Segundo monitoreo de calidad de aire en el año 2021, Callao, Perú

Humedal coordenadas						
Norte	8 668 341					
Este	0 267 414	Fecha: Del 11 al 16 de enero 2021				
Segundo muestreo						
Parámetros (en µg /m3)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	D.S. N° 003-2017-MINAM
	C/Tratamiento	C/Tratamiento	C/Tratamiento	Otras activ	Otras activ	
Material particulado PM 10	<1,01	20,27	22,25	24,76	13,08	100
Material particulado PM 2.5	<1,0000	12,2600	13,5700	14,0000	<1,0000	50
Arsénico	<0,0030	<0,0030	<0,0030	<0,0030	<0,0030	-
Boro	<0,0010	0,0070	0,0100	0,0180	0,0410	-
Bario	0,0055	0,0020	0,0029	0,0078	0,0034	-
Cadmio	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-
Cerio	<0,0020	<0,0002	<0,0020	<0,0020	<0,0020	-
Cobalto	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-
Cromo	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-
Plomo	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	0,5 (24 h)
Antimonio	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-
Selenio	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	-
Silicio	0,4970	0,9810	0,8850	0,7290	0,8700	-
Estaño	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-
Estroncio	0,00152	<0,00004	0,00098	0,00259	0,00059	-
Titanio	0,0044	0,0007	0,0017	0,0044	0,0024	-
Talio	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	-
Vanadio	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-
Zinc	0,0410	0,0280	0,0300	0,0600	0,0330	-

Nota: Monitoreo ambiental

Tabla 4

Resultados del impacto del material particulado PM2.5. en la calidad de aire del humedal marino-costero del Callao, Perú, periodo 2020-2021

Estadísticos de pruebaa PM 2.5	D.S.n.°003-2017-MINAM - PM2.5 µg/m3
Z	-2,521b
Sig. asintótica(bilateral)	,012

Nota: Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; b. Se basa en rangos positivos. Los resultados se obtuvieron a través del uso del software SPSS v26

3.3. De la calidad del suelo

3.3.1. Del impacto negativo del material particulado en la calidad del suelo.

En cuanto a los parámetros relacionados con los hidrocarburos, no se observaron resultados que excedieran los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos. Sin embargo, en lo que respecta a los parámetros inorgánicos, se sobrepasaron en la zona central del humedal debido a la presencia de mercurio (ver Tabla 5). Los datos de la tabla muestran los promedios de los valores encontrados.

Para los suelos industriales, la normativa canadiense es más exigente que la norma nacional en relación con los

parámetros de arsénico y plomo, mientras que es menos rigurosa en cuanto al mercurio. Al comparar los resultados del humedal, los jardines y el suelo del río Rímac con la normativa canadiense, se evidencia la presencia de arsénico por encima de los límites establecidos por esta normativa. Sin embargo, en el caso del muestreo residencial, la normativa canadiense es más estricta en cuanto al arsénico y menos exigente en lo que respecta al plomo y al mercurio. Los resultados de la Tabla 6 muestran la presencia de arsénico por encima de los límites establecidos por la normativa nacional e internacional, y en el caso del plomo y el mercurio, los parámetros exceden los límites establecidos por la normativa nacional.

Tabla 5*Resultados comparativos de parámetros inorgánicos por tipo de suelo industrial versus la normativa nacional e internacional*

Parámetros (mg/kg)	Suelo Ingreso Zona Industrial	Suelo Humedales	Suelo Jardines Zona industrial	Suelo a 1.5 m del Río Rimac	D.S. N° 011-2017-MINAM S. Comercial, Industrial	Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health- Suelo industrial
Arsénico	>150,00	59,74	>150,00	>150,00	140	12
Cadmio	10,10	3,24	6,25	7,10	22	22
Plomo	484,70	90,86	586,65	208,50	800	600
Mercurio	1,37	18,98	15,18	1,22	24	50

Nota: Monitoreo ambiental

Tabla 6*Muestreo de zona residencial*

Parámetros mg/kg	Muestreo suelo Barrio Frigorífico	D.S. N° 011-2017-MINAM Suelo residencial, parques	Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health-Suelo Residencial
Arsénico	>150	50	12
Plomo	527,80	140	600
Mercurio	20,84	6,6	50

Nota: Monitoreo ambiental

3.3.2. Del impacto del material particulado composición mercurio en la calidad del suelo del humedal

En relación con los suelos, los resultados de los monitoreos ambientales revelaron la presencia del contaminante mercurio en la parte central del humedal, con valores de 25 mg/kg que superan la normativa ambiental nacional.

Resultados y análisis

El valor p del material particulado, en particular su composición de mercurio ($0.002 < 0.05$), indica la aceptación de la hipótesis alternativa, lo que sugiere un impacto significativo del material particulado en la calidad del suelo del humedal marino-costero evaluado (ver Tabla 7).

Este estudio se ha llevado a cabo para determinar si el material particulado generado por las actividades industriales afecta negativamente al humedal marino-costero en cuestión. Sin embargo, al detectar la presencia de mercurio en la parte central del humedal, se consideró necesario evaluar los suelos industriales y se procedió a tomar una muestra de un suelo residencial.

3.3.3. Del impacto del material particulado composición arsénico y plomo en suelos: humedal, industrial y residencial:

Resultados y análisis

En la Tabla 8 se presentan los resultados que evidencian el impacto significativo del arsénico y el plomo en la calidad del suelo. El valor observado de α para el arsénico es 0.016, siendo inferior al α crítico de 0.05. Por consiguiente, se acepta la hipótesis alternativa,

lo que indica que hay diferencias significativas en los niveles de arsénico entre los tres tipos de suelos evaluados (humedal, industrial y residencial). Es importante destacar que los suelos industriales exceden tanto la normativa nacional como la internacional para el arsénico, mientras que los suelos residenciales también superan estos estándares.

Asimismo, el valor observado de α para el plomo es 0.024, también inferior al α crítico de 0.05. En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, lo que sugiere que existen diferencias significativas en los niveles de plomo entre los tres tipos de suelos evaluados. Es especialmente relevante destacar que el suelo residencial supera la normativa nacional en cuanto a los niveles de plomo.

3.4. De la situación futura del humedal

Se consideró importante evaluar la situación futura del humedal en caso de que continúe la contaminación con material particulado y su respectiva composición, la cual influye en la calidad del aire y de los suelos. Para ello, se utilizó el método Delphi, contando con la opinión de tres expertos y determinándose el promedio Beta y la desviación estándar (Zegarra, 2021) (ver Tabla 9).

Resultados y análisis

El coeficiente de concordancia de Kendall, tanto para el PM_{2.5} como para el PM₁₀, es de 0.818. El valor de significancia asintótica según el SPSS es de 0.001, que es menor que 0.05 (ver Tabla 10). Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se concluye que hay una concordancia significativa entre los jueces respecto a que el material particulado impacta significativamente en la situación futura del humedal en evaluación.

Tabla 7

Resultados del impacto del material particulado composición mercurio en la calidad de suelo del humedal marino-costero del Callao, Perú, periodo 2020-2021

Estadísticos de prueba ^{a,b} Mercurio	D.S.N°011-2017-MINAM - Mercurio en mg/kg
Z	-3,066b
Sig. asintótica(bilateral)	,002

Nota: a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; b. Se basa en rangos positivos. Los resultados se obtuvieron a través del software SPSS v26

Tabla 8

Resultados del impacto del material particulado composición arsénico y plomo en la calidad de suelo del humedal, industrial y residencial periodo 2020-2021

Estadísticos de prueba a,b Arsénico y plomo	Medición del arsénico	
Medición del plomo		
H de Kruskal-Wallis	8,250	7,500
Gl	2	2
Sig. Asintótica	,016	,024

Nota: a. Prueba de Kruskal Wallis; b. Variable de agrupación: Tipo de suelo analizado. Los resultados se obtuvieron a través del software SPSS v26

Tabla 9

Resumen estimación de expertos para el periodo [2023 – 2025] sobre perspectiva futura del humedal marino- costero, Callao, Perú

Parámetro	Año 2023		Año 2024		Año 2025	
	Promedio Beta	Promedio Desv. Std.	Promedio Beta	Promedio Desv. Std.	Promedio Beta	Promedio Desv. Std.
PM2.5	29.17	1.39	27.5	1.94	27.5	1.72
PM10	49.17	1.95	49.17	1.94	50	2.06

Nota: Elaboración propia. Para la determinación del promedio Beta se utilizó la fórmula $Ve = (EO + 4EN + EP) / 6$ y la desviación estándar a través de la fórmula $Ds = (EP - EO) / 6$; donde EP = Estimación Pesimista, en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), EN = Estimación Normal en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), EO = Estimación Optimista en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 10

Resultados de la concordancia de los expertos para el periodo [2023 – 2025] sobre perspectiva futura del humedal marino- costero, Callao, Perú

Estadísticos de prueba ^a PM10, PM2.5	PM10	PM2.5
N	9	8
W de Kendall	,818	,818
Chi-cuadrado	14,727	14,727
Gl	2	2
Sig. Asintótica	,001	,001

Nota: Coeficiente de concordancia de Kendall, Los resultados se obtuvieron a través del software SPSS v26.

IV. DISCUSIÓN

Con respecto a la calidad del aire, esta es afectada por el material particulado (PM2.5) proveniente de las actividades del entorno del humedal, siendo las más significativas la descarga en los depósitos de concentrados mineros y la preparación de la ley que requieren los minerales para la venta. Los resultados obtenidos en los muestreos de los parámetros PM10 y PM2.5, comparados con la normativa internacional, indican que exceden las Guías de Calidad de Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021)

(Para 24 horas: PM10: 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y PM2.5: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). El material particulado en ecosistemas urbanos y no urbanos es una mezcla compleja con características físicas y químicas, además del tamaño de partícula y la fuente de procedencia del material particulado, las cuales pueden tener efectos relevantes en la salud de la población, tal como lo indica Yang et al. (2021), quien señala el impacto negativo en la salud pública relacionado con diferentes escalas espaciales y temporales. Aunque este tema no ha sido abordado en el presente artículo, es importante mencionarlo porque influye en la biodiversidad presente en el humedal.

El material particulado proveniente de las actividades industriales vecinas al humedal altera la calidad de los suelos, produciendo un impacto negativo en el humedal (Fabelo, 2017), dado que se evidenció que sus suelos están contaminados con mercurio en la parte central de su ubicación. Estudios científicos sugieren que el mercurio ocasiona una reducción de la actividad microbiológica vital para la cadena alimentaria terrestre. El mercurio causa efectos negativos en los seres vivos porque se bioacumula en el organismo y se biomagnifica, es decir, se acumula a lo largo de la cadena alimentaria. Li et al. (2019) investigó los contaminantes mercurio, cadmio y cobre en los suelos, en los sedimentos y en las plantas de los humedales, situación que coincide con la presencia de mercurio en el humedal. Esta contaminación debe conllevar a una inmediata actividad de descontaminación siguiendo los criterios para la gestión de sitios contaminados de acuerdo con lo descrito en el Decreto Supremo n.º 012-2017-MINAM, con la finalidad de restablecer el humedal a la condición inicial antes de la ocurrencia de los impactos ambientales negativos. Entre las acciones se destacan soluciones como la fitorremediación (Liu et al., 2020; Zine et al., 2020) según el tipo de contaminante y la ubicación de la zona de estudio. Dextre (2017) identifica una especie (*Senecio rufescens*) que acumula metales (arsénico, cadmio, cobre y plomo); además, también es posible identificar los metales tóxicos en el agua del humedal (Fajardo, 2017). En este caso específico, el humedal en estudio se encontraba en periodo de sequía.

Con respecto a la situación futura del humedal, los expertos concuerdan que se mantendrá la contaminación del humedal, lo que conllevará a un deterioro progresivo del mismo (Barbier, 2019). Ante esta situación, se debe considerar una estrategia para su reconstrucción ecológica y solicitar a los agentes de la zona industrial que implementen medidas de respeto y cuidado al humedal (Jieling & Hui, 2023).

V. CONCLUSIONES

El material particulado proveniente de las actividades industriales vecinas al humedal altera la calidad del aire del humedal con material particulado (PM_{2.5}), impactando significativamente ($p < 0.05$) en el ecosistema natural. Este material también afecta la calidad de los suelos del humedal, evidenciándose la presencia de mercurio en la parte central de su ubicación, debido a la composición del material particulado. Aunque la flora retiene las partículas, estas se concentran en el suelo, contaminándolo. Asimismo, se demuestra la alteración de la calidad del suelo en otras zonas: los suelos industriales se contaminan con arsénico, y los suelos residenciales con arsénico, plomo y mercurio.

REFERENCIAS

Barbier, E. B. (2019). Chapter 27 - The Value of Coastal Wetland Ecosystem Services. In G. M. E. Perillo, E. Wolanski, D. R. Cahoon, & C. S. Hopkinson (Eds.), *Coastal Wetlands* (Second Edition) (pp. 947–964). *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00027-7>

- Bozdogan Sert, E., Turkmen, M., & Cetin, M. (2019). Heavy metal accumulation in rosemary leaves and stems exposed to traffic-related pollution near Adana-İskenderun Highway (Hatay, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(9), 553. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7714-7>
- Canadian Council of Ministers of environment (CCME). (2012); EC, (1999). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health para suelos industriales y residenciales*.
- Chung, J.-W., Lee, M.-E., & Lee, H.-D. (2011). Characteristics of environmental pollution related with public complaints in an industrial shipbuilding complex, Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, *177*(1–4), 73–84. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1619-9>
- De Groot, D., Brander, L., Finlayson, C. (2018). Wetland Ecosystem Services. In: Finlayson, C.M., et al. *The Wetland Book*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9659-3_66
- Dextre, A. (2017). *Acumulación de metales pesados en Senecio rufescens DC. en dos lagunas alto andinas de las regiones de Lima y Junín, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela Profesional de Ciencias Biológicas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.
- Fabelo Falcón, José Antonio. (2017). Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados. *Centro Azúcar*, *44*(1), 53-60. Recuperado en 19 de noviembre de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000100006&lng=es&tlng=es
- Fajardo Vidal, N., Solís Acosta, H., & Gil Villacres, F. (2017). Determinación de metales pesados en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, *20*(39), 149-158
- Gillooly, S. E., Michanowicz, D. R., Jackson, M., Cambal, L. K., Shmool, J. L. C., Tunno, B. J., Tripathy, S., Bain, D. J., & Clougherty, J. E. (2019). Evaluating deciduous tree leaves as biomonitors for ambient particulate matter pollution in Pittsburgh, PA, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(12), 711. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7857-6>
- He, J., Zhang, L., Yao, Z., Che, H., Gong, S., Wang, M., Zhao, M., & Jing, B. (2020). Source apportionment of particulate matter based on numerical simulation during a severe pollution period in Tangshan, North China. *Environmental Pollution*, *266*, 115133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115133>
- Luo, J., & Fu, H. (2023). Construct the future wetland ecological security pattern with multi-scenario simulation. *Ecological Indicators*, *153*, 110473. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110473>
- Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, *74*, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

- Li, X., Song, H., Zhai, S., Lu, S., Kong, Y., Xia, H., & Zhao, H. (2019). Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017). *Environmental Pollution*, 246, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.103>
- Liu, Z., Chen, B., Wang, L., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123138. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>
- Decreto Supremo N°003-2017-MINAM. *Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen disposiciones complementarias. (07 de junio de 2017)*. Normas legales N° 1529835-1. Diario Oficial El Peruano.
- Decreto Supremo N°011-2017-MINAM. *Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para Suelo. (02 de diciembre de 2017)*. Normas legales N° 159 3024-1. Diario Oficial El Peruano.
- Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM. *Aprueban criterios para la gestión de sitios contaminados. (02 de diciembre de 2017)*. Normas legales n.º 1593392-6. Diario Oficial El Peruano.
- MINAM, *Guía para muestreo de suelos/ Ministerio del Ambiente. Dirección General de Calidad Ambiental. Lima: MINAM, 2014. (2014)*. Normas legales N° 624.1517-P-45. MAVET IMPRESIONES E.I.R.L.
- Newton, A., Icely, J., Cristina, S., Perillo, G. M. E., Turner, R. E., Ashan, D., Cragg, S., Luo, Y., Tu, C., Li, Y., Zhang, H., Ramesh, R., Forbes, D. L., Solidoro, C., Béjaoui, B., Gao, S., Pastres, R., Kelsey, H., Taillie, D., ... Kuenzer, C. (2020). Anthropogenic, Direct Pressures on Coastal Wetlands. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00144>
- Park, Y., Shin, J., & Lee, J. Y. (2021). Spatial Association of Urban Form and Particulate Matter. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9428. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189428>
- Robles, G; Medina, A; Medina, S. (2019). La contaminación del aire por material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Revista Industrial data* 22(1): 173-176 (2019). <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v22i1.16533>
- OMS. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: Editor: World Health Organization; 2021. Number of pages: 290. Reference numbers: ISBN: 9789240034228
- Xu, X., Chen, M., Yang, G., Jiang, B., & Zhang, J. (2020). Wetland ecosystem services research: A critical review. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01027>
- Yang, J., Liu, P., Song, H., Miao, C., Wang, F., Xing, Y., Wang, W., Liu, X., & Zhao, M. (2021). Effects of Anthropogenic Emissions from Different Sectors on PM2.5 Concentrations in Chinese Cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10869. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010869>
- Zegarra Tello, I. J., Cabrera Carranza, C. F., & Moore Torres, R. (2021). Tendencias y escenarios de la contaminación del aire por origen automotriz en Lima Metropolitana. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(47), 211-219. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20640>
- Zhang, Z., Liu, J., Wu, Y., Yan, G., Zhu, L., & Yu, X. (2017). Multi-scale comparison of the fine particle removal capacity of urban forests and wetlands. *Scientific Reports*, 7(1), 46214. <https://doi.org/10.1038/srep46214>
- Zine, H., Midhat, L., Hakkou, R., el Adnani, M., & Ouhammou, A. (2020). Guidelines for a phytomanagement plan by the phytostabilization of mining wastes. *Scientific African*, 10, e00654. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00654>

Contribución de autoría:

Conceptualización: Irma Janet Zegarra Tello, Carlos Francisco Cabrera Carranza y Rosa Karol Moore Torres; Curación de datos: Irma Janet Zegarra Tello, Carlos Francisco Cabrera Carranza y Rosa Karol Moore Torres; Análisis formal: Irma Janet Zegarra Tello y Rosa Karol Moore Torres; Adquisición de fondos: No aplica; Investigación: Irma Janet Zegarra Tello, Carlos Francisco Cabrera Carranza y Rosa Karol Moore Torres; Metodología: Irma Janet Zegarra Tello, Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Administración del proyecto: Irma Janet Zegarra Tello, Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Recursos: Irma Janet Zegarra Tello, Carlos Francisco Cabrera Carranza y Rosa Karol Moore Torres; Software: Irma Janet Zegarra Tello; Supervisión: Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Validación: Carlos Francisco Cabrera Carranza, Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Visualización: Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Redacción - borrador original: Irma Janet Zegarra Tello, Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres; Redacción - revisión y edición: Carlos Francisco Cabrera Carranza, Oscar Rafael Tinoco Gómez y Rosa Karol Moore Torres.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.