
IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN MEDIANTE EL MODELO DE FACTORIZACIÓN DE MATRIZ POSITIVA (PMF) EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHÍA DEL CALLAO, PERÚ

Lizeth Dennis Najarro Méndez y Rafael Zafra Saavedra

RESUMEN

La bahía del Callao, principal puerto del Perú, concentra una intensa actividad portuaria e industrial que compromete la calidad de sus sedimentos marinos. El estudio tuvo como objetivo identificar las fuentes de contaminación en los sedimentos marinos del Callao, Perú, mediante la aplicación del Modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF) a datos geoquímicos correspondientes exclusivamente a 33 estaciones submareales. El análisis fue complementado con correlaciones de Spearman para evaluar la relación entre los 16 metales pesados: Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estroncio (Sr), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Titanio (Ti), Vanadio (V), Zinc (Zn), Mercurio (Hg) y Manganeseo (Mn). Los resultados permitieron identificar tres fuentes principales de contaminación. La primera corresponde a la fuente geológica, que represen-

ta el 48% del total, y se asocia con elementos como Al, Ti, Mn y Ba, derivados de procesos naturales de erosión y sedimentación. La segunda fuente se vincula con aguas residuales e industriales, con un aporte del 33%, caracterizada por Co, Ni, As, Cr, Cu y Hg, relacionados con descargas urbanas e industriales. Finalmente, la tercera fuente está relacionada con actividades portuarias y la industria petrolera, representando el 19% del aporte total, y evidenciada por Cd, V, Hg y Sb, elementos asociados al tráfico marítimo, los derrames de hidrocarburos y las operaciones portuarias. Los resultados muestran que, aunque los procesos naturales predominan, las actividades humanas contribuyen de manera significativa a la contaminación sedimentaria, lo que proporciona información clave para la gestión ambiental y la mitigación de contaminantes en el litoral del Callao.

Introducción

Las fuentes de contaminación en los ecosistemas marinos representan uno de los principales desafíos ambientales de las zonas costeras a nivel global

(El-sharkawy *et al.*, 2025). En particular, los sedimentos marinos actúan como un registro histórico de los aportes contaminantes provenientes de diversas actividades humanas, ya que reflejan la influencia combinada

de fuentes industriales, portuarias, urbanas y naturales (Rosas *et al.*, 2023). Identificar el origen de estos contaminantes es fundamental para comprender los procesos de acumulación y dispersión, así como para establecer

estrategias efectivas de gestión y mitigación ambiental.

Las fuentes de contaminación en sedimentos pueden clasificarse en naturales (como la erosión de rocas o la lixiviación de minerales) y

PALABRAS CLAVE / Análisis de Fuentes / Contaminación Marina / Sedimentos Marinos /

Recibido: 14/01/2026. Modificado: 25/02/2026. Aceptado: 28/02/2026.

Lizeth Dennis Najarro Méndez. (Autora de correspondencia) Licenciada en Química y maestrante en Docencia Universitaria, Universidad Nacional Federico Villarreal,

Perú. Investigadora, Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. Dirección: Jr. Río Chepén, El Agustino. e-mail: lnajarro@unfv.edu.pe. ORCID: 0009-0009-1226-2079.

Rafael Zafra Saavedra. Licenciado en Química, Magister en Gestión Ambiental y doctorante en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional Federico

Villarreal, Perú. Investigador, Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. e-mail: 2016033383@unfv.edu.pe. ORCID: 0000-0001-7169-8715.

IDENTIFICATION OF CONTAMINATION SOURCES USING THE POSITIVE MATRIX FACTORIZATION (PMF) MODEL IN MARINE SEDIMENTS OF CALLAO BAY, PERU

Lizeth Dennis Najarro Méndez and Rafael Zafra Saavedra

SUMMARY

Callao Bay, the main port of Peru, concentrates intense port and industrial activities that compromise the quality of its marine sediments. The study aimed to identify the sources of contamination in marine sediments from Callao, Peru, through the application of the Positive Matrix Factorization (PMF) model to geochemical data corresponding exclusively to 33 subtidal stations. The analysis was complemented with Spearman correlations to assess the relationships among 16 heavy metals: Aluminum (Al), Antimony (Sb), Arsenic (As), Barium (Ba), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Copper (Cu), Chromium (Cr), Strontium (Sr), Nickel (Ni), Lead (Pb), Titanium (Ti), Vanadium (V), Zinc (Zn), Mercury (Hg), and Manganese (Mn). The results allowed the identification of three main sources of contamination. The first corresponds to a geological source, representing 48% of

the total contribution, and is associated with elements such as Al, Ti, Mn, and Ba, derived from natural processes of erosion and sedimentation. The second source is linked to domestic and industrial wastewater, contributing 33%, and is characterized by Co, Ni, As, Cr, Cu, and Hg, associated with urban and industrial discharges. Finally, the third source is related to port activities and the petroleum industry, representing 19% of the total contribution, and is evidenced by Cd, V, Hg, and Sb, elements associated with maritime traffic, hydrocarbon spills, and port operations. The results indicate that, although natural processes predominate, human activities significantly contribute to sediment contamination, providing key information for environmental management and the mitigation of contaminants along the Callao coastline.

IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE CONTAMINAÇÃO POR MEIO DO MODELO DE FATORAÇÃO DE MATRIZ POSITIVA (PMF) EM SEDIMENTOS MARINHOS DA BAÍA DO CALLAO, PERU

Lizeth Dennis Najarro Méndez e Rafael Zafra Saavedra

RESUMO

Os bioaerossóis são partículas aerodinâmicas suspensas na Baía do Callao, principal porto do Peru, concentra intensas atividades portuárias e industriais que comprometem a qualidade de seus sedimentos marinhos. O estudo teve como objetivo identificar as fontes de contaminação nos sedimentos marinhos do Callao, Peru, por meio da aplicação do Modelo de Fatoração de Matriz Positiva (PMF) a dados geoquímicos correspondentes exclusivamente a 33 estações submareais. A análise foi complementada com correlações de Spearman para avaliar as relações entre 16 metais pesados: Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estrôncio (Sr), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Titânio (Ti), Vanádio (V), Zinco (Zn), Mercúrio (Hg) e Manganês (Mn). Os resultados permitiram identificar três principais fontes de contaminação. A primeira corresponde

à fonte geológica, representando 48% da contribuição total, e está associada a elementos como Al, Ti, Mn e Ba, derivados de processos naturais de erosão e sedimentação. A segunda fonte está vinculada a águas residuais e industriais, com contribuição de 33%, sendo caracterizada por Co, Ni, As, Cr, Cu e Hg, associados a descargas urbanas e industriais. Finalmente, a terceira fonte está relacionada às atividades portuárias e à indústria petrolífera, representando 19% da contribuição total, sendo evidenciada por Cd, V, Hg e Sb, elementos associados ao tráfego marítimo, a derramamentos de hidrocarbonetos e às operações portuárias. Os resultados indicam que, embora os processos naturais predominem, as atividades humanas contribuem de maneira significativa para a contaminação sedimentar, fornecendo informações essenciais para a gestão ambiental e a mitigação de contaminantes no litoral do Callao.

antropogénicas, siendo estas últimas las predominantes en zonas costeras urbanizadas (Goswami y Kalamdhad, 2023; Jiang *et al.*, 2024). Las fuentes antropogénicas incluyen descargas industriales ricas en metales pesados, efluentes domésticos y municipales, actividades portuarias, vertimientos de hidrocarburos, residuos sólidos mal gestionados y aportes atmosféricos derivados de la quema de combustibles fósiles y de

procesos metalúrgicos (Goswami y Kalamdhad, 2023; Tunde y Oluwagbenga, 2020). En regiones con intensa actividad económica, estos aportes se combinan y transforman dentro del ambiente marino, generando una mezcla compleja de contaminantes cuya identificación específica resulta difícil mediante métodos convencionales (da Costa Filho *et al.*, 2022).

Los metales pesados constituyen los principales

contaminantes asociados a estas fuentes. Elementos como Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Hg y Ni pueden acumularse en los sedimentos debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación (Jiang *et al.*, 2024; Tchounwou *et al.*, 2012). Su origen puede estar vinculado a actividades industriales metalúrgicas, tráfico marítimo, uso de pinturas anticorrosivas, descargas de aguas residuales o emisiones

atmosféricas (Lim *et al.*, 2022). No obstante, distinguir entre estos aportes y determinar la contribución relativa de cada fuente representa un desafío científico y técnico.

Para abordar este problema, se han desarrollado diversos métodos de análisis receptor, que permiten inferir las fuentes de contaminación a partir de los patrones de concentración de contaminantes en los sedimentos. Entre ellos, el PMF,

propuesto por Paatero y Tapper (1994), se ha consolidado como una herramienta estadística robusta para la identificación de fuentes contaminantes sin requerir información previa de las emisiones (Reff *et al.*, 2007). Este modelo ha sido implementado en el software PMF versión 5.0 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), lo que facilita su aplicación en estudios ambientales (EPA, 2015). El modelo descompone las concentraciones observadas en perfiles fuente y sus contribuciones relativas, ofreciendo una visión más clara sobre el origen de la contaminación. La aplicación del modelo PMF en ambientes acuáticos ha demostrado ser efectiva para distinguir aportes provenientes de fuentes industriales, urbanas y naturales en diferentes contextos geográficos (Goswami y Kalamdhad, 2023; Rahman *et al.*, 2022; Tunde y Oluwabenga, 2020; Wang *et*

al., 2024). Sin embargo, su uso en ecosistemas costeros latinoamericanos aún es limitado, pese a la creciente presión antropogénica que experimentan. En el caso de zonas costeras del Perú, como el litoral del Callao, Perú, la interacción entre actividades industriales, portuarias y urbanas genera una presión ambiental significativa, por lo que la identificación de las fuentes de contaminación resulta esencial para la gestión y recuperación de los ecosistemas marinos.

Metodología

El estudio se desarrolló bajo un diseño observacional, no experimental y de corte transversal, con un enfoque descriptivo-aplicado, orientado a la identificación de fuentes de contaminación en sedimentos marinos mediante el Modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF) versión 5.0 de la EPA. La investigación se

basó en el análisis de datos secundarios provenientes del informe técnico Evaluación ambiental de la bahía del Callao, correspondiente al Informe N.º 047-2017-OEFA/DE-SDLB-CEAPIO, elaborado por Gonzales Rossel *et al.* (2017).

De acuerdo con dicho informe, la recolección de muestras de sedimentos marinos se llevó a cabo entre el 31 de mayo y el 10 de junio de 2017 en la bahía del Callao (Perú). El informe técnico original contempla 40 estaciones de muestreo (33 submareales y 7 intermareales). Sin embargo, para el presente estudio se consideraron exclusivamente las 33 estaciones submareales, ubicadas en áreas cercanas a las desembocaduras de los ríos Rímac y Chillón, así como en sectores de influencia industrial, portuaria y en zonas naturales protegidas.

Para el análisis mediante el modelo PMF, inicialmente se

realizó un filtrado de los datos, eliminando aquellos elementos que no eran relevantes para la identificación de fuentes contaminantes, así como las muestras con datos faltantes o con incertidumbre superior al 5%. Las incertidumbres de los metales pesados se calcularon siguiendo la guía del usuario del modelo PMF versión 5.0 de la EPA (EPA, 2015). Para los valores reportados por debajo del límite de detección (LD), se asignó una incertidumbre de $(5/6) \times LD$, mientras que, para los valores por encima del LD, la incertidumbre se calculó como $(1/3) \times LD$ más la incertidumbre analítica del laboratorio. Los valores faltantes se reemplazaron con la mediana de la concentración y se les asignó una incertidumbre equivalente a 4 veces la mediana.

Posteriormente, se conformó la matriz de datos con las 33 estaciones submareales, identificadas con los códigos SM-09 a SM-42 y TMB-1 (Figura 1),

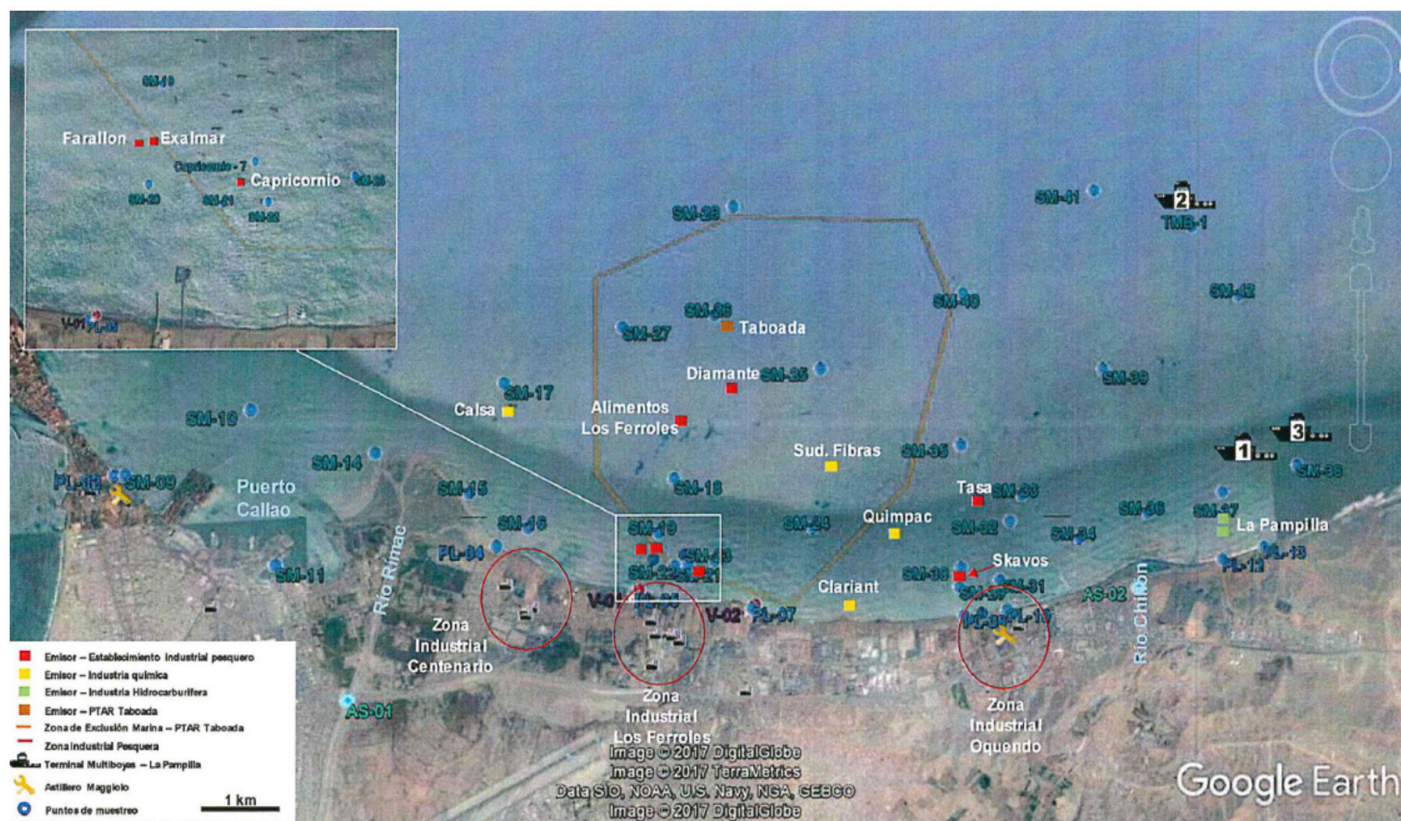


Figura 1. Esquema general de la ubicación de los puntos de muestreo y las principales actividades presentes en la bahía del Callao.

incluyendo las concentraciones de los metales pesados Al, Sb, As, Ba, Cd, Co, Cu, Cr, Sr, Ni, Pb, Ti, V, Zn, Hg y Mn, junto con sus respectivas incertidumbres.

Los datos procesados se cargaron en el software PMF versión 5.0 de la EPA, donde se definió un número inicial de cinco factores y se ejecutaron 20 corridas de análisis considerando diferentes números de factores. Cada corrida parte de valores iniciales aleatorios para los perfiles de fuentes y sus contribuciones; por lo tanto, la realización de múltiples corridas permite evaluar la estabilidad y reproducibilidad del modelo. Tras este procedimiento, se seleccionó finalmente un modelo con tres factores, que cumplió el criterio de que el valor de Q robust se aproximara al de Q true, lo que indica un ajuste confiable; valores significativamente menores de Q robust respecto a Q true sugieren la presencia de datos problemáticos. El modelo permitió descomponer la matriz original en perfiles de fuentes y sus contribuciones relativas mediante algoritmos de factorización matricial, asegurando una interpretación robusta de las fuentes de metales pesados en las 33 estaciones submareales analizadas.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de correlación no paramétrico de Spearman utilizando el software R Studio, con el fin de evaluar la asociación monotónica entre los factores obtenidos mediante el PMF (Figura 2). Para la interpretación de los resultados, las correlaciones se clasificaron siguiendo criterios de fuerza comúnmente utilizados en estudios ambientales: correlaciones fuertes ($\rho > 0,80$), moderadas ($0,40 < \rho \leq 0,79$) y débiles ($\rho \leq 0,40$), de acuerdo con Daniel (2002) y aplicados en estudios previos sobre metales en sedimentos (Jiang, 2024; Menzel *et al.*, 2018). Esta clasificación permite respaldar la identificación de posibles fuentes comunes o independientes de los metales. Además, se realizó una revisión bibliográfica para

relacionar los perfiles químicos identificados con fuentes contaminantes previamente reportadas en la literatura.

Resultados y Discusión

El Factor 1 presenta una contribución aproximada del 48%. Los elementos con mayores cargas son Pb (98,98%), Mn (83,21%), Al (81,77%), Ti (81,74%), Ba (81,65%), Zn (81,50%), Cr (35,94%) y Sr (37,04), como se muestra en la Figura 3.

Este Factor 1 constituye un primer grupo de metales pesados que muestran una alta correlación con el aluminio (Al-Ti = 0,78; Al-Mn = 0,82; Al-Ba = 0,58), elementos que comúnmente se asocian a procesos geológicos. El Al es un

elemento típicamente terrígeno, proveniente de la erosión de rocas continentales, y se encuentra en los sedimentos marinos como un indicador de aporte detrítico continental (Jiang *et al.*, 2024; Menzel *et al.*, 2018). Además, se ha comprobado que el Al en sedimentos marinos se origina tanto del polvo mineral transportado por la atmósfera como de la sedimentación de material terrígeno (Van der Weijden, 2002). Por su parte, el Mn y el Ti se acumulan en los sedimentos principalmente a través de aportes detríticos, mientras que el Ba se relaciona con fuentes naturales, como la meteorización de rocas y materiales parentales, aunque su concentración también puede verse influenciada por actividades

portuarias con alto tránsito marítimo (Jiang *et al.*, 2024; Markiv *et al.*, 2023).

El segundo grupo está formado por Pb, Zn y Cr, elementos que comúnmente se asocian a actividades industriales. Las correlaciones observadas entre ellos (Pb-Zn = 0,51; Pb-Cr = 0,35; Zn-Cr = 0,33), de magnitud baja a moderada, indican que, aunque pueden coexistir en el mismo entorno, no necesariamente provienen de una única fuente común, sino que podrían estar influenciados por diferentes procesos o aportes industriales específicos. El Pb, Zn y el Cr se vinculan a procesos industriales y a la combustión de combustibles fósiles (Tunde y Oluwagbenga, 2020).

El Factor 2 presenta una contribución aproximada del

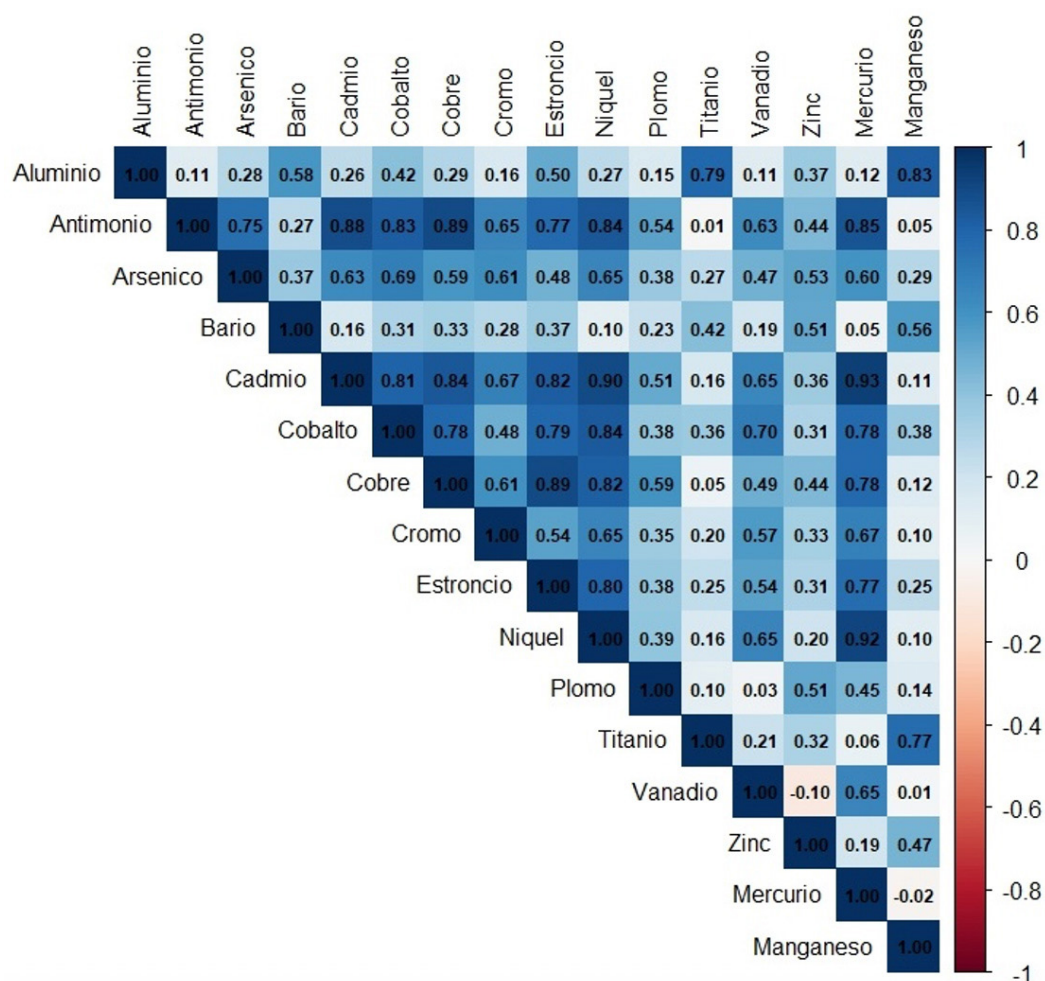


Figura 2. Mapa de correlaciones entre los metales pesados provenientes de las 33 estaciones submareales. Fuente: Elaboración propia.

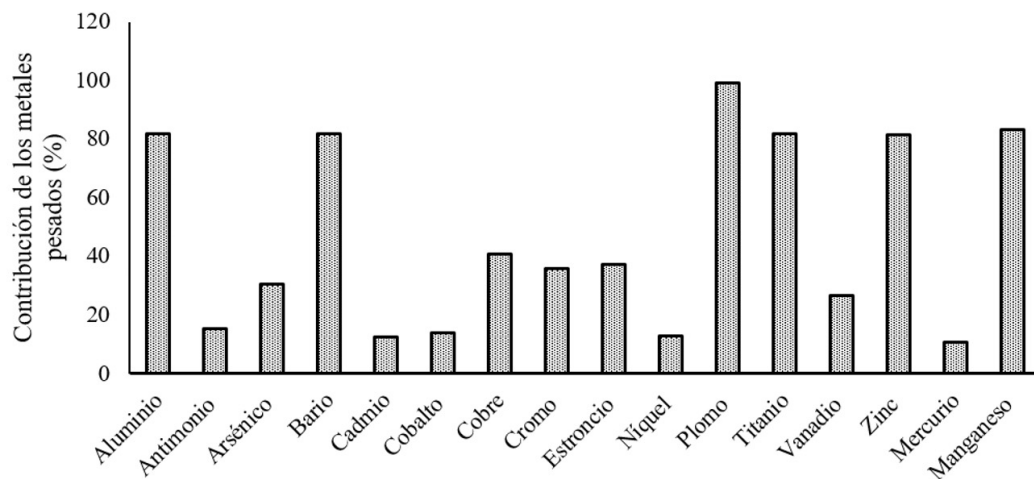


Figura 3. Contribución de los metales pesados al perfil químico del Factor 1 identificada mediante PMF en sedimentos marinos provenientes de las 33 estaciones submareales. Fuente: Software PMF 5.0 - EPA.

33%. Los elementos con mayores porcentajes son Co (86,03%), Ni (76,02%), As (65,99%), Cr (59,26%), Cu (49,55%) y Hg (43,44%), como se muestra en la Figura 4.

En el análisis de fuentes de contaminación en sedimentos, la existencia de altas correlaciones entre elementos constituye un indicador clave de que estos comparten un mismo origen o ruta de entrada al sistema, ya que su transporte, deposición y acumulación responden a procesos

comunes (Liu *et al.*, 2003). Bajo este principio, las fuertes correlaciones observadas entre los pares Co–Ni (0,84), As–Sb (0,75) y Ni–Hg (0,92) sugieren que estos elementos no están controlados predominantemente por la variabilidad natural del sedimento, sino que provienen de una misma fuente antropogénica.

Por lo tanto, este Factor 2 se asocia a aguas residuales e industriales. El cobalto (Co) presente en los sedimentos marinos se origina principalmente a

partir de desechos industriales y aguas residuales (Montes de Oca-Palma *et al.*, 2021). El As proviene de fuentes antropogénicas asociadas a descargas de aguas residuales urbanas e industriales, drenaje ácido de minas y uso de plaguicidas arsenicales en actividades agrícolas (Baeyens *et al.*, 2019). El Ni y el Cu se liberan durante procesos industriales relacionados con el desguace y reparación de barcos, el desmantelamiento de buques y actividades vinculadas a hidrocarburos

(El-sharkawy *et al.*, 2025; Seyedeh Belin *et al.*, 2025; Sharifuzzaman *et al.*, 2016). Por su parte, el Hg de origen antropogénico se ha asociado principalmente con descargas de aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas de zonas urbanas e industriales, que transportan Hg tanto en forma disuelta como adsorbida a partículas, acumulándose posteriormente en los sedimentos (Gworek *et al.*, 2016).

El Factor 3 presenta una contribución aproximada del 19%. Los elementos con mayores porcentajes son Cd (50,73%), Hg (45,94%), V (44,71%), Sb (36,64%), Al (17,63%), Zn (14,64%) y Ni (11,38%), como se muestra en la Figura 5.

El Factor 3 se asocia principalmente a actividades portuarias e industria petrolera debido a las correlaciones observadas entre los elementos (Cd–Sb = 0,88; Cd–Hg = 0,93; V–Hg = 0,65). El Cd se introduce en los sedimentos marinos principalmente a través de actividades industriales, descargas de aguas residuales sin tratar y emisiones derivadas del transporte y mantenimiento portuario (Pernía *et al.*, 2018). El V se relaciona con las operaciones de carga y descarga de petróleo, derrames accidentales u operacionales, así como con el tráfico marítimo en canales de navegación y zonas de fondeo (Khalaf, 2016). El Hg proviene de fuentes industriales locales, emisiones de combustibles fósiles y fundiciones, que posteriormente son transportadas y depositadas en los sedimentos marinos (Fitzgerald y Mason, 1998). El Sb puede presentar un origen mixto; no obstante, en el contexto portuario se vincula principalmente a actividades metalúrgicas, procesos de fundición y residuos de operaciones industriales (Bolan *et al.*, 2022).

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Alvaríño *et al.* (2023), quienes indican que la bahía del Callao recibe descargas de efluentes industriales, agrícolas, además de aportes portuarios e hidrocarbúricos.

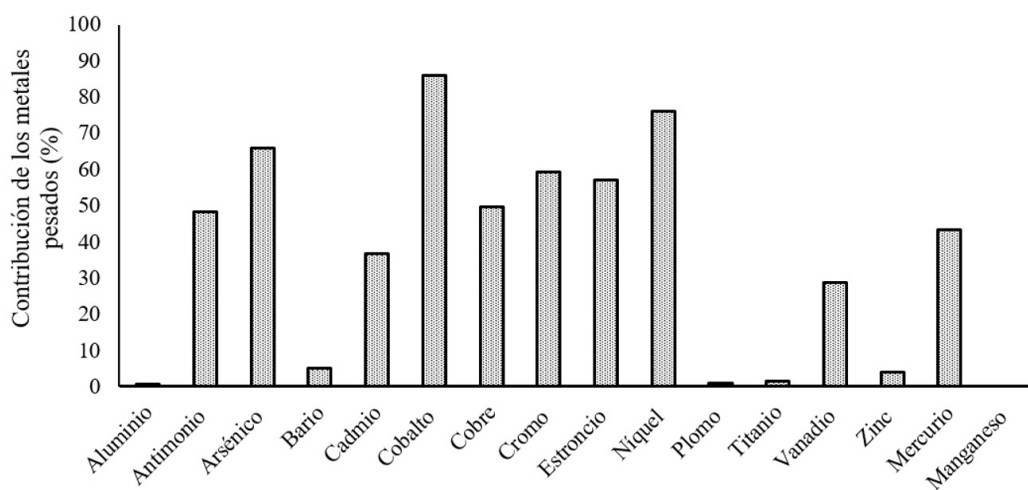


Figura 4. Contribución de los metales pesados al perfil químico Factor 2 identificada mediante PMF en sedimentos marinos provenientes de las 33 estaciones submareales. Fuente: Software PMF 5.0 – EPA.

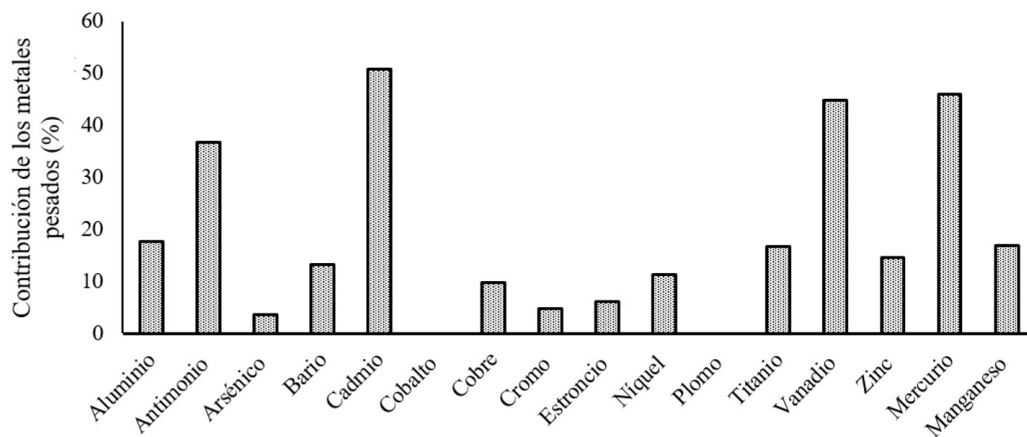


Figura 5. Contribución de los metales pesados al perfil químico del Factor 3 identificada mediante PMF en sedimentos marinos provenientes de las 33 estaciones submareales. Fuente: Software PMF 5.0 - EPA.

Asimismo, Rosas *et al.* (2023) destacan la influencia de descargas de aguas residuales sin tratamiento y de los ríos Rímac y Chillón, que transportan contaminantes desde áreas urbanas, agrícolas e industriales hacia la zona costera.

En conjunto, los resultados reflejan que, aunque predominan los procesos naturales, las fuentes antropogénicas ejercen una influencia significativa en los sedimentos marinos del Callao.

Conclusiones

El análisis mediante el modelo PMF, complementado con correlaciones de Spearman, permitió identificar tres fuentes principales que controlan la composición geoquímica de los sedimentos marinos del Callao: una fuente geológica dominante (48%), asociada a procesos naturales de erosión y sedimentación, caracterizada por los elementos Al, Ti, Mn y Ba; una fuente vinculada a aguas residuales e industriales (33%), caracterizada por elementos como Co, Ni, As, Cu y Hg; y una tercera fuente relacionada con actividades portuarias e industria petrolera (19%), identificada por la presencia de Cd, Hg, V y Sb.

Si bien los aportes naturales predominan, los resultados evidencian una influencia antropogénica significativa y

localizada, especialmente en áreas cercanas a descargas urbanas, industriales y operaciones portuarias. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar estrategias de monitoreo y gestión ambiental diferenciadas, focalizadas según el tipo de fuente contaminante, con el fin de contribuir a la mitigación y recuperación de los ecosistemas marinos afectados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA) por el financiamiento otorgado para la realización de la presente investigación, en el marco del programa “Tesis de Pregrado y Postgrado en Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica 2024”, mediante el contrato N.º PE501090039-2024. Asimismo, agradecen especialmente al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) por autorizar el uso de información técnica generada en el ejercicio de sus funciones y competencias.

REFERENCIAS

Alvaríño L, Saez G, Acioly TM da S, Viana DC, Iannacone J (2023) Biochemical indicators of contamination in the coastal

area of Callao, Peru. *Latin American Journal of Aquatic Research* 51: 351–362.

Baeyens W, Mirlean N, Bundschuh J, de Winter N, Baisch P, da Silva Júnior FMR, Gao Y (2019) Arsenic enrichment in sediments and beaches of Brazilian coastal waters: A review. *Science of The Total Environment* 681: 143–154.

Bolan N, Kumar M, Singh E, Kumar A, Singh L, Kumar S, S. Keerthan, Son A H, El-Naggar A, Vithanage M, Sarkar B, Wijesekara H, Diyabalanage S, Sooriyakumar P, Vinu A, Wang H, Kirkham MB, Shaheen SM, Rinklebe J, Kadambot H (2022) Antimony contamination and its risk management in complex environmental settings: A review. *Environment International* 158: 106908.

da Costa Filho BM, Duarte AC, Rocha-Santos TAP (2022) Environmental monitoring approaches for the detection of organic contaminants in marine environments: A critical review. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 33: e00154.

Daniel WW (2002) *Bioestadística: Base para el análisis de las ciencias de la salud*. 4th ed. Editorial Limusa S.A. de C.V. Ciudad de México. 950 pp.

El-sharkawy M, Alotaibi MO, Li J, Du D, Mahmoud E (2025) Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review. *Sustainability* 17: 1–29.

EPA (2015) *Positive Matrix Factorization Model for*

Environmental Data Analyses. Environmental Protection Agency.

Fitzgerald WF, Mason RP (1998) Critical Review The Case for Atmospheric Mercury Contamination in Remote Areas. *Environmental Science & Technology* 32: 1–7.

Gonzales Rossel JA, Aguirre Mendez LA, Arenazas Gonzales ND, Gutiérrez Rojas CF (2017) *Evaluación ambiental de la bahía del Callao durante el año 2017*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. <https://hdl.handle.net/20.500.12788/192>.

Goswami AP, Kalamdhad AS (2023) Mobility and risk assessment of heavy metals in benthic sediments using contamination factors, positive matrix factorization (PMF) receptor model, and human health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research International* 30: 7056–7074.

Gworek B, Bemowska-Kalabun O, Kijeńska M, Wrzosek-Jakubowska J (2016) Mercury in marine and oceanic waters—A review. *Water, Air, & Soil Pollution* 227: 371.

Jiang J, Fu M, Yang J, Song Y, Fu G, Wang H, Lin C, Wang Y (2024) Spatial distribution characteristics, ecological risk assessment, and source analysis of heavy metal (loid)s in surface sediments of the nearshore area of Qionghai. *Frontiers in Marine Science* 11: 1491242. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1491242>.

Khalaf F (2016) Vanadium as a tracer of oil pollution in the sediments of Kuwait. *Hydrobiologia* 91–92: 147–154.

Lim Y-C, Chen C-F, Tsai M-L, Wu C-H, Lin Y-L, Wang M-H, Albarico FPJB, Chen C-W, Dong C-D (2022) Impacts of Fishing Vessels on the Heavy Metal Contamination in Sediments: A Case Study of Qianzhen Fishing Port in Southern Taiwan. *Water* 14: 1174. <https://doi.org/10.3390/w14071174>.

Liu WX, Li XD, Shen ZG, Wang DC, Wai OWH, Li YS (2003) Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary. *Environmental Pollution* 121: 377–388.

Markiv B, Expósito A, Ruiz-Azcona L, Santibáñez M, Fernández-Olmo I (2023) Environmental exposure to manganese and health risk assessment from personal sampling near an

- industrial source of airborne manganese. *Environmental Research* 224: 115478.
- Menzel J-L, Schlosser C, Planquette H, Gourain A, Cheize M, Boutorh J, Shelley R, Contreira Pereira L, Gledhill M, Hopwood MJ, Lacan F, Lherminier P, Sarthou G, Achterberg EP (2018) Aluminium in the North Atlantic Ocean and the Labrador Sea (GEOTRACES GA01 section): roles of continental inputs and biogenic particle removal. *Biogeosciences* 15: 5271–5286.
- Montes de Oca-Palma R, Solache-Ríos M, Jiménez-Reyes M, García-Sánchez JJ, Almazán-Sánchez PT (2021) Adsorption of cobalt by using inorganic components of sediment samples from water bodies. *International Journal of Sediment Research* 36: 524–531.
- Paatero P, Tapper U (1994) Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics* 5: 111–126.
- Pernía B, Mero M, Cornejo X, Ramírez N, Ramírez L (2018) Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE* 9: 89–105.
- Rahman MS, Ahmed Z, Seefat SM, Alam R, Islam ARMT, Choudhury TR, Begum BA, Idris AM (2022) Assessment of heavy metal contamination in sediment at the newly established tannery industrial Estate in Bangladesh: A case study. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 4: 1–12.
- Reff A, Eberly SI, Bhav P V (2007) Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: Review of existing methods. *Journal of the Air and Waste Management Association* 57: 146–154.
- Rosas J, Alvaríño L, Guabloche A, Romero S, Castañeda L, Iannaccone J (2023) Contaminación por elementos trazas en sedimentos superficiales marinos de la bahía del Callao, Perú. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 52: 27–44.
- Seyedeh Belin S, Salleh A, Abdul Halim S (2025) Heavy metal contamination in water and sediment of the Port Klang coastal area, Selangor, Malaysia. *Environmental Earth Sciences* 69: 2013–2025.
- Sharifuzzaman SM, Rahman H, Ashekuzzaman SM (2016) Heavy Metals Accumulation in Coastal Sediments. En Sharifuzzaman M, Rahman H, Ashekuzzaman SM, Islam MM, Chowdhury SR, Hossain MS. *Environmental Remediation Technologies for Metal- Contaminated Soils*. Springer, Tokio, Japón. pp. 21–42.
- Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ (2012) Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia Supplementum* 101: 133–164.
- Tunde OL, Oluwagbenga AP (2020) Assessment of heavy metals contamination and sediment quality in Ondo coastal marine area, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences* 170: 103903.
- Van der Weijden CH (2002) Pitfalls of normalization of marine geochemical data using a common divisor. *Marine Geology* 184: 167–187.
- Wang K, Aji D, Li P, Hu C (2024) Characterization of heavy metal contamination in wetland sediments of Bosten lake and evaluation of potential ecological risk, China. *Frontiers in Environmental Science* 12: 1398849. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1398849>.

Licencia de uso



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).