

# Use of bioindicators to determine the presence of contaminants in water bodies

Juan Vergara-Villadiego<sup>1</sup>, Candelaria Tejada-Tovar<sup>1</sup>, Jalelys Leones-Cerpa<sup>1</sup>, Juan Felipe Restrepo-Mesa<sup>2</sup>, Karina Ojeda-Delgado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Diseño de procesos y Aprovechamiento de Biomásas – IDAB, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena.  
<sup>2</sup> Grupo Biontessori, Colegio Montessori de Cartagena, Colombia.



**How to cite this article:** J. Vergara, C. Tejada, J. Leones, J. Restrepo, K. Ojeda. "Uso de bioindicadores para determinar la presencia de contaminantes en cuerpos de agua", *Ing-Nova*, vol. 3, no. 2, pp. 74-92, Jul. 2024.  
<https://doi.org/10.32997/rin-2024-4942>

**Received:** 19 de febrero de 2024  
**Reviewed:** 17 de abril de 2024  
**Accepted:** 02 de mayo de 2024

**Corresponding author:**  
Candelaria Tejada-Tovar  
[ctejadat@unicartagena.edu.co](mailto:ctejadat@unicartagena.edu.co)

**Editor:** Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

**Copyright:** © 2024 J. Vergara, C. Tejada, J. Leones, J. Restrepo, K. Ojeda. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



## ABSTRACT

Bioindicators are native organisms used to show the state and changes that may arise in the environment due to pollution. Due to this, they are often applied in disciplines such as ecotoxicology. There are different types of bioindicators around the world, which can be animal, plant or microbial, allowing pollution to be demonstrated in different ecosystems, whether terrestrial, aquatic or mixed. Among these, the implementation of feathers and egg shells from birds and mangroves have presented good results as bioindicators of contaminants in bodies of water. Currently, aquatic ecosystems present a clear problem due to the pollution caused by the discharge of wastewater loaded with multiple pollutants generated by industrial and anthropogenic activities. Some of these contaminants are heavy metals, emerging contaminants and petroleum derivatives, which generate a great threat to different ecosystems and human health. Consequently, different tracking techniques have been implemented to demonstrate the presence of contaminants present in bodies of water; however, it is important to make contributions regarding the implementation of early warning methodologies such as bioindicators. Therefore, the objective of the present review of the topic is to highlight the importance of the implementation of animals and plants as bioindicators of contamination of aquatic ecosystems for the evaluation of environmental health, thereby making a contribution to the area of environmental ecotoxicology.

**Keywords:** Contamination; Emerging Contaminants; Petroleum Derivatives; Ecosystems; Heavy Metals.

## Uso de bioindicadores para determinar la presencia de contaminantes en cuerpos de agua

### RESUMEN

Los bioindicadores son organismos nativos empleados para mostrar el estado y los cambios que puedan surgir en el medio ambiente por la contaminación, debido a esto, suelen aplicarse en disciplinas como la ecotoxicología. Existen diferentes tipos de bioindicadores en todo el mundo, los cuales pueden ser de tipo animal, vegetal o microbiano, permitiendo evidenciar la contaminación en diferentes ecosistemas, tanto terrestres, acuáticos o mixtos. Entre estos la implementación de plumas y cascadas de huevos de las aves y los manglares, han presentado buenos resultados como bioindicadores de contaminantes en cuerpos de agua. En la actualidad, los

ecosistemas acuáticos presentan una clara problemática a raíz de la contaminación provocada por el vertimiento de aguas residuales cargadas con múltiples contaminantes generado por actividades industriales y antropogénicas. Algunos de estos contaminantes son los metales pesados, los contaminantes emergentes y los derivados del petróleo, los cuales generan una gran amenaza para los diferentes ecosistemas y la salud humana. En consecuencia, se han implementado diferentes técnicas de rastreo para evidenciar la presencia de contaminantes presentes en cuerpos de agua, sin embargo, es importante realizar aportes en cuanto a la implementación de metodologías de alerta temprana como pueden ser los bioindicadores. Por lo anterior, el objetivo de la presente revisión del tema es resaltar la importancia de la implementación de los animales y las plantas como bioindicadores de contaminación de los ecosistemas acuáticos para la evaluación de la salud del medio ambiente, realizando con esto un aporte en el área de la ecotoxicología ambiental.

**Palabras clave:** Contaminación; Contaminantes Emergentes; Derivados del Petróleo; Ecosistemas; Metales Pesados.

## 1. Introducción

En los países que se encuentran desarrollados y en vía de desarrollo, la calidad que presenta el agua es muy imparcial, reflejando de esta manera los factores sociales, económicos y fisiológicos que estas poseen. Además, siendo el agua uno de los recursos más valiosos e indispensables para la vida humana, este se ha venido contaminando debido al continuo aumento de la población mundial y el crecimiento del sector industrial generando varios problemas de contaminación ambiental, colocando en riesgo este recurso no renovable. En la actualidad, el agua es empleada por parte de diferentes industrias como refinerías de petróleo, fabricación de plásticos y procesamiento de metales, con el fin de realizar diferentes actividades y/o procesos generando grandes cantidades de aguas residuales cargadas de varias especies de contaminantes [1]–[5].

Debido a la contaminación presente en los cuerpos de agua en diferentes lugares del mundo, se ha generado un peligro latente para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo sostenible [6]. Contaminantes como los pesticidas pueden causar diferentes enfermedades que afectan los ojos, la piel e incluso el sistema nervioso como lo es la enfermedad de Parkinson [7]; los microplásticos también generan efectos negativos en la salud como lo son el estrés oxidativo, daños en el ADN del ser vivo y muerte celular debido a la inhibición de varias vías metabólicas [8]; por otro lado los metales pesados pueden trasladarse y biomagnificarse por medio de las cadenas alimentarias y amenazar gravemente la salud humana, generando diferentes enfermedades al ingresar al cuerpo como el cáncer, la diabetes, la anemia y la osteomalacia [9].

Múltiples contaminantes como los metales pesados [10], derivados del petróleo [11], contaminantes emergentes [12], han sido encontrados en cuerpos de agua en diferentes partes del mundo. En Sudáfrica se pudo detectar la presencia de diferentes metales pesados como el zinc, el cobre y el hierro mientras que en China se encontró la presencia de Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobre, Níquel, Plomo y Zinc [13], [14]; También en países como México y China se determinó la presencia de contaminación por microplásticos en diferentes zonas [15], [16]; en China se determinó la presencia de diferentes clases de fármacos y pesticidas [17], [18]; estudios realizados en Colombia también determinaron la presencia de diferentes contaminantes como microplásticos [19], metales pesados [20], hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y pesticidas organoclorados [21] en varios cuerpos de agua, especialmente en la zona costera.

Para encontrar estos contaminantes en el agua se emplean programas de rastreo basados en técnicas analíticas, físicas y químicas que suministran mediciones directas de múltiples parámetros de calidad ambiental en un punto y periodo en concreto, pero estos resultados pueden verse comprometidos por diferentes consecuencias y limitaciones, provocando que la información se distorsione. Para evitar esta dificultad se emplea el uso de bioindicadores, organismos nativos de la zona de estudio utilizados para la recolección de datos del estado ambiental o para determinación de varios tipos de contaminantes [22], [23]. Los bioindicadores son empleados en diferentes categorías, desde zonas urbanas hasta en zonas naturales remotas, también de nivel celular hasta ecosistémico, en general para todos los sectores del medio ambiente [24].

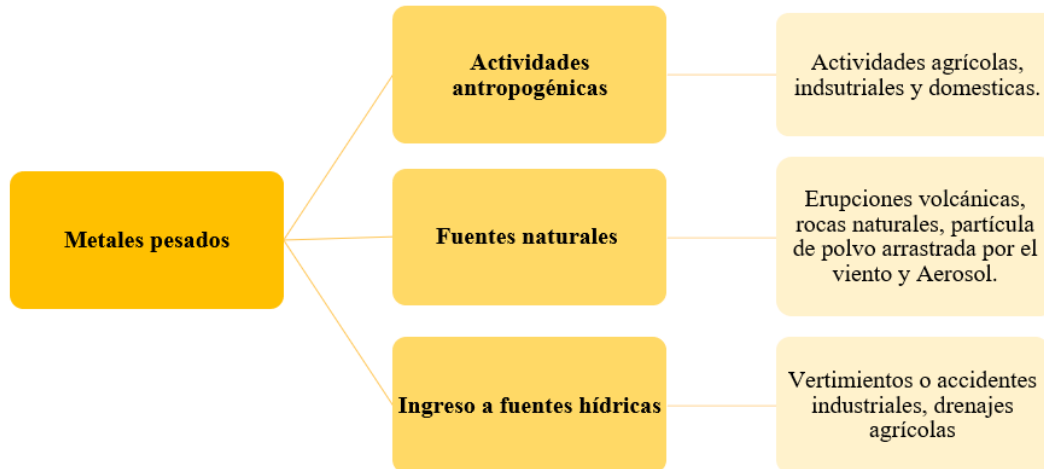
A pesar de que sean utilizado diferentes técnicas de búsqueda de contaminantes en el agua, esta revisión pretende realizar una contribución significativa en la implementación de metodologías de alerta anticipada, siendo los bioindicadores una buena opción. Por lo anterior, el objetivo de la presente revisión es resaltar la importancia de la implementación de los animales y las plantas como bioindicadores de contaminación de los ecosistemas acuáticos para la evaluación de la salud del medio ambiente. Con esto se espera generar un aporte significativo en el área de la ecotoxicología ambiental. Cabe destacar que esta búsqueda se realizó utilizando diferentes dispositivos de búsqueda como base de datos o metabuscadores, colocando palabras claves relacionadas con el tema de bioindicadores y la contaminación en los cuerpos de agua.

## **1. Contaminación Acuática**

La contaminación del agua se ha convertido en un problema mundial, ya que es el recurso más vital para el sostenimiento de toda la vida. En la actualidad se ha vuelto necesario evaluar continuamente el estado de recursos hídricos para combatir este problema, por lo cual, tanto los países desarrollados como los que están en vías de desarrollo están buscando diferentes soluciones que puedan evidenciar, determinar y eliminar la contaminación de los cuerpos de agua. Existen diferentes tipos de contaminantes presentes en el agua, los cuales representan una dificultad mundial debido a que algunos son duraderos, otros son tóxicos y en su mayoría en altas concentraciones presentan un riesgo para la salud [25]–[28]. Algunos de estos contaminantes son:

### **1.1. Metales pesados**

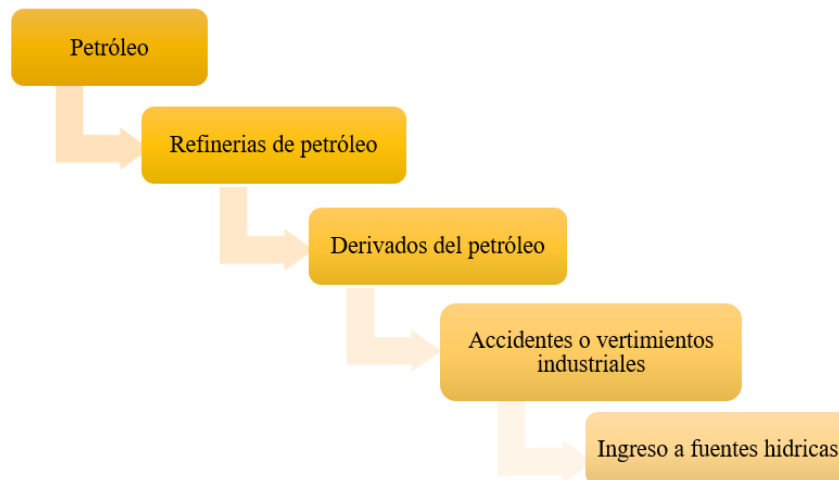
Los metales pesados son contaminantes que se caracterizan por ser generalmente tóxicos, no biodegradables y muy difíciles de eliminar. Estos están afectando negativamente a los entornos acuáticos, convirtiéndose en una gran amenaza, ya que la mayoría de estos contaminantes tienen graves efectos tóxicos sobre diversos cuerpos. Los metales pesados son utilizados en casi todos los campos, como la minería, el curtido, de detergentes, de plásticos, de tintes sintéticos, de cemento, de cerámica, de neumáticos, entre otros. Estas industrias consumen grandes cantidades de agua generando como consecuencia la producción de aguas residuales con alto contenido de metales pesados, las cuales provocan riesgos para la salud de los seres humanos a través de la bio-acumulación en los organismos acuáticos. Algunos metales pesados son cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y Zinc (Zn) [4], [29]–[31]. En la Figura 1 se pueden observar las principales fuentes de generación y contaminación de metales pesados en cuerpos de agua.



**Figura 1.** Fuentes de contaminación por metales pesados. [4], [32], [33].

### 1.2. Derivados del petróleo

La contaminación generada por las industrias de refinación ha generado un gran impacto en los ecosistemas acuáticos, ya que sus aguas residuales suelen estar cargadas con contaminantes peligrosos. Los contaminantes presentes en los residuos petroleros incluyen hidrocarburos aromáticos y alifáticos, aceites, grasas, ácidos nafténicos, además también contaminantes orgánicos e inorgánicos recalcitrantes [34], [35]. En la Figura 2 se puede observar las principales fuentes de generación y contaminación de los derivados del petróleo en fuentes hídricas.



**Figura 2.** Fuentes de contaminación por petróleo y sus derivados. [34], [36].

### 1.3. Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son compuestos de distinto origen y naturaleza química. La presencia de estos contaminantes en el medioambiente ha generado consecuencias para el ambiente y la salud. Los contaminantes emergentes son procedentes de diferentes industrias de producción como la farmacéutica,

plásticos, cosméticos, tensioactivos y pesticidas [37], [38]. En la Figura 3 se puede observar las principales fuentes de generación y contaminación por contaminantes emergentes en fuentes hídricas.



**Figura 3.** Fuentes de contaminación por contaminantes emergentes. [37]–[39]

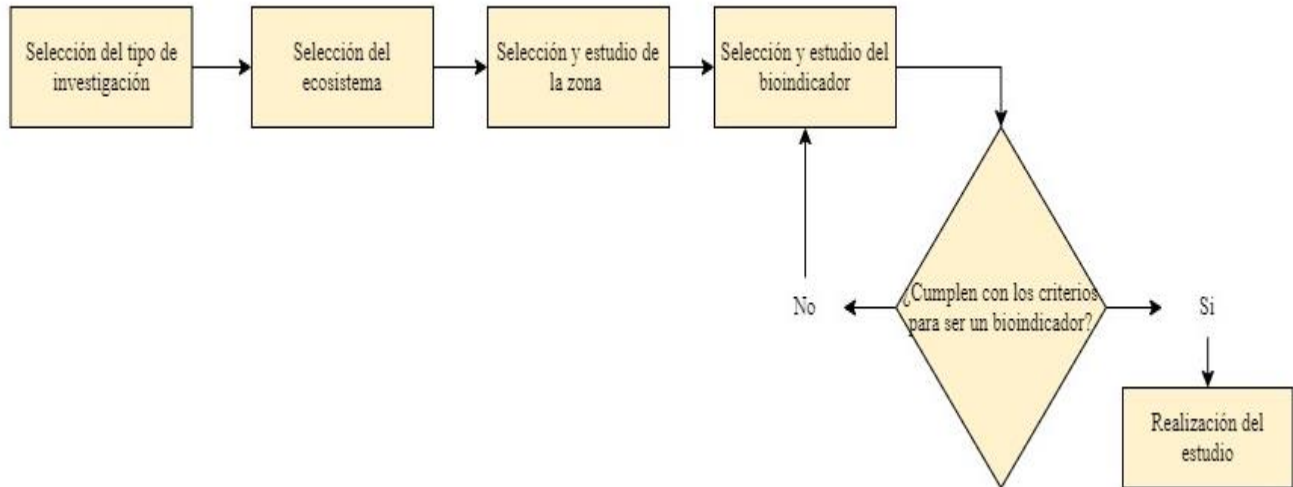
## 2. Bioindicadores

Los bioindicadores son organismos utilizados para determinar diferentes contaminantes o para recolectar múltiple información sobre sus impactos en el medio ambiente. Estos poseen una gran importancia ecotoxicológica ya que reflejan la fracción biodisponible de los contaminantes acumulados en la zona a lo largo del tiempo [23], también permiten obtener información sobre el diferentes factores del ecosistema como la presencia de compuestos específicos, la humedad o el pH [40]. Además, sirven como un sistema de alerta temprana sobre los posibles impactos que ponen en peligro la supervivencia de las especies de la zona [41]. Los organismos marítimos con frecuencia son usados como bioindicadores, debido a su exposición a diferentes cambios ambientales durante su ciclo vital [23]. El empleo de bioindicadores puede consolidarse como un sistema para la toma de decisiones de administración del terreno, también ser usados para evidenciar la reacción de la comunidad biológica a la administración efectuada [42]. Gracias a este campo de investigación es posible determinar el tipo, la escala y el ritmo de los cambios peligrosos que suceden en la zona con una anticipación de la contaminación ambiental prevista, además los bioindicadores son usados para evaluar cualitativamente y cuantitativamente el estado ambiental y su grado de transformación [24]. En Colombia se han empleado diferentes tipos de bioindicadores acuáticos para verificar el estados de los ecosistemas acuáticos, entre estos se encuentran los Fitoplanctónicos, Zooplanctónicos, Macroinvertebrados Bentónicos, Microbiológicos, entre otros [43].

### 2.1. Selección de bioindicadores

Para seleccionar el bioindicador más adecuado para un estudio, se deben tener en cuenta diferentes condiciones a la hora de escoger la mejor posible. La selección de ecosistema es uno de los factores a tener

cuenta debido a que este puede ser terrestre, acuático o mixto, también la selección y estudio del bioindicador ya que puede ser de tipo animal, vegetal o microbiano, además estos deben cumplir ciertos criterios para ser seleccionados como ser organismo nativo de la zona, se deben encontrar en abundancia, tener la capacidad de acumular algún tipo de contaminante y que sean de fácil muestreo [44]–[46]. En la Figura 4 se presenta un diagrama de flujo para la selección de uno o varios bioindicadores.



**Figura 4.** Diagrama de flujo de selección de un bioindicador [44]–[46].

## 2.2. Bioindicadores que se han usado en la medición de diferentes contaminantes

### 2.2.1. Aves

Las aves son buenos bioindicadores de contaminación ambiental, debido a que ellas tienen la capacidad de acumular altos niveles de concentración de metales pesados, generando así un mejor reporte de sus efectos nocivos en el medio ambiente [47]. Las aves son efectivas para ser utilizadas como bioindicadores, debido a que estas acumulan contaminantes en diferentes partes de su cuerpo como en las plumas [48]–[51], el corazón, el hígado [49], los huesos y las cáscaras de los huevos [50]. La acumulación de diferentes contaminantes genera en las aves diferentes efectos como enfermedades físicas y genéticas, problemas de desarrollo y crecimiento, déficit inmunológico, entre otros [52]. En la Tabla 1 se presentan algunos contaminantes encontrados en las aves.

**Tabla 1.** Contaminantes encontrados en las aves

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Arsénico (As)	0.07 – 3.0	
Cromo (Cr)	0.08 – 4.6	
Plomo (Pb)	1.3 – 15.49	[49]
Zinc (Zn)	23.9 - 140.7	
Manganeso (Mn)	2.2 – 45.3	
Mercurio (Hg)	0.65 – 6.65	[53]
Cadmio (Cd)	0.02 – 0.47	
Cobre (Cu)	0.59 – 60.19	[54]
Hierro (Fe)	86.91 - 869.9	

### 2.2.2. Esponjas

Las esponjas marinas han sido presentadas como bioindicadores de varios contaminantes como: los metales pesados, los HAP y los microbianos. Esto se debe a varios factores como su sensibilidad a los cambios que ocurren en su entorno, su gran presencia en los ambientes bentónicos y su capacidad de acumular contaminantes en sus tejidos internos [55], [56]. En la Tabla 2 se presentan algunos contaminantes encontrados en las esponjas.

**Tabla 2.** Contaminantes encontrados en las esponjas

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Aluminio (Al)	2	
Cromo (Cr)	0.2	
Plomo (Pb)	0.02	[57]
Cobre (Cu)	0.1	
Arsénico (As)	0.5	
Cadmio (Cd)	0.02	
Microplásticos	4.8	[58]

### 2.2.3. Moluscos

Los moluscos se han determinado como buenos bioindicadores, debido a que su carga corporal de metales puede reflejar las concentraciones presentes en el agua y los sedimentos [59]. Los moluscos bivalvos y los mejillones han sido utilizados como bioindicadores de la contaminación ambiental, gracias a diferentes factores como: su gran abundancia en los ecosistemas acuáticos, son fáciles de recolectar y analizar, tienen la capacidad de acumular contaminantes inorgánicos y orgánicos en sus tejidos [60], [61]. En la Tabla 3 se presentan algunos contaminantes encontrados en los moluscos.

**Tabla 3.** Contaminantes encontrados en los moluscos.

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Arsénico (As)	3.5 – 35.1	
Manganeso (Mn)	3 – 515	
Cobre (Cu)	6.7 – 425.4	[62]
Zinc (Zn)	34 - 2773.5	
Cromo (Cr)	0.3 – 44.7	
Plomo (Pb)	0.2 – 3	
Cadmio (Cd)	3.2 – 95.8	[63]
Microplásticos	0.0002 – 0.003	[64]

### 2.2.4. Reptiles

Los reptiles han sido utilizados como bioindicadores para inspeccionar la acumulación de contaminantes como los metales pesados. Estos cumplen con los criterios para los programas de biomonitorio, tales como, su amplio tiempo de vida, su alta presencia en diferentes ubicaciones geográficas dentro de una zona territorial bien definida, su posición en los niveles tróficos superiores, su capacidad de acumular contaminantes en sus tejidos y su alta tolerancia a niveles elevados de concentraciones de contaminantes [65]. Sin embargo, a pesar del valor potencial de los reptiles como bioindicadores no suelen utilizarse en los estudios de contaminación ambiental [66]. En la Tabla 4 se presentan algunos contaminantes encontrados en los reptiles.

**Tabla 4.** Contaminantes encontrados en los reptiles.

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Naftalina (HAP)	0.0029 – 0.0039	[67]
Benz(a)antraceno (HAP)	0.0025 – 0.0038	
Criseno (HAP)	0.0021 – 0.0028	
Acenaftileno (HAP)	0.0018 – 0.0024	
Cadmio (Cd)	0.020 – 0.431	[68]
Plomo (Pb)	0.7 – 0.18	[69]
Arsénico (As)	0.2 – 154.5	

### 2.2.5. Peces

Los peces son excelentes bioindicadores porque poseen una extensa ocupación de los niveles tróficas. Estos son utilizados para evaluar la contaminación generada por metales pesados en los ecosistemas acuáticos, debido a que tienen la capacidad de acumular contaminantes en sus tejidos [70], [71], reflejando las concentraciones de metales que se encuentran en el agua y los sedimentos [72]. Estos al ser expuestos a diferentes tipos de contaminantes presentan varias alteraciones como cambio de color en el cuerpo, irregularidad en el nadado, segregación de mucosidad, entre otros [73]. En la Tabla 5 se presentan algunos contaminantes encontrados en los peces.

**Tabla 5.** Contaminantes encontrados en los peces.

Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Cromo (Cr)	0.04 – 4.226	[74]
Cobre (Cu)	0.245 – 2.002	
Zinc (Zn)	8.532–109.294	
Hierro (Fe)	0.694 - 13.150	[70]
Níquel (Ni)	0.235 – 2.339	
Plomo (Pb)	0.023 – 0.316	
Mercurio (Hg)	0.02 – 0.428	
Cadmio (Cd)	0.001 – 0.024	
HAP	0.005 – 0.325	[75]

### 3. Uso de plumas como bioindicadores

Las plumas de las aves han sido utilizadas como bioindicadores de contaminación ambiental por metales pesados [76]. Estas acumulan en cierta cantidad diferentes metales, demostrando ser útiles para el control, detección y estimación de la contaminación generada por estos en el medio ambiente [77]. Las plumas tienen cierta ventaja sobre las técnicas que implican el uso de tejidos internos, porque al igual que los derivados de la piel, poseen la capacidad de acumular metales, pero gracias a su fácil recolección, almacenamiento y transporte, las convierten en una herramienta de seguimiento no destructiva que genera un daño mínimo a las aves [49], [78], [79]. En la Tabla 6 se presentan algunos contaminantes encontrados en las plumas de diferentes especies de aves.

**Tabla 6.** Contaminantes encontrados en las plumas de diferentes especies de aves.

Especie	Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Golondrina Italiana (Juvenil)	Aluminio (Al)	0.48 - 199.89	[80]
	Hierro (Fe)	1.75 - 227.35	



	Manganeso (Mn)	1.64 - 33.78	
	Zinc (Zn)	7.93 - 242.58	
Golondrina Italiana (Mudanza)	Aluminio (Al)	1.72 - 242.73	
	Hierro (Fe)	13.59 - 366	
	Manganeso (Mn)	1.69 - 27.32	
	Zinc (Zn)	11.59 - 289.96	
Golondrina Italiana (Adulto)	Aluminio (Al)	11.58 - 514.85	
	Hierro (Fe)	1.67 - 542.85	
	Manganeso (Mn)	3.93 - 89.83	
	Zinc (Zn)	11.79 - 294.27	
Cormorán grande ( <i>Phalacrocorax carbo</i> )	Aluminio (Al)	98.4	
	Cromo (Cr)	1.73	
	Níquel (Ni)	2.85	
	Hierro (Fe)	190	[81]
Eurasian Wigeon ( <i>Mareca penelope</i> )	Aluminio (Al)	42.3	
	Cromo (Cr)	0.16	
	Níquel (Ni)	1.32	
	Hierro (Fe)	201	
Black-browed albatross ( <i>Thalassarche melanophris</i> )	Mercurio (Hg)	1.80–6.65	
	Arsénico (As)	0.20–0.36	
Imperial shag ( <i>Phalacrocorax atriceps</i> )	Mercurio (Hg)	0.83–2.07	[53]
	Arsénico (As)	0.34–0.99	
Gentoo Penguins ( <i>Pygoscelis papua</i> )	Mercurio (Hg)	1.77–4.56	
	Arsénico (As)	0.19–0.31	

#### 4. Uso de cáscaras de huevo como bioindicadores

Las cáscaras de los huevos de las aves han sido utilizadas como bioindicadores para verificar el estado de contaminación del medio ambiente. Debido a su fácil forma de recolección, permite realizar acciones no invasivas en las colonias, es decir, no es necesario tomar muestras directamente de los polluelos, disminuyendo así las preocupaciones éticas que se puedan generar [82]. Los niveles de concentración de los metales pesados que se encuentra presentes en las cáscaras de los huevos están muy relacionados con la cantidad presente en la sangre y en varios órganos [83]. En literatura se sugiere que las cáscaras de huevo de algunas especies pueden utilizarse para inferir la presencia de ciertos elementos no esenciales, reduciendo así los efectos en las poblaciones de aves [84]. En la Tabla 7 se presentan algunos contaminantes encontrados en las cascaras de huevos de diferentes especies de aves

**Tabla 7.** Contaminantes encontrados en las cascaras de huevos de diferentes especies de aves.

Especie	Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
Garza nocturna	Cadmio (Cd)	0.006 - 0.008	[83]
	Cromo (Cr)	0.085 - 0.203	
	Plomo (Pb)	0.03 - 0.152	
Gaviotín ceñudo	Cadmio (Cd)	0.002 - 0.005	
	Cromo (Cr)	0.241	

	Plomo (Pb)	0.06 - 0.260	
Albatros de patas negras	Cadmio (Cd)	0.097	
	Cromo (Cr)	0.084	
	Plomo (Pb)	0.34	
	Aluminio (Al)	0.11 - 36.31	
Cormorán grande ( <i>Phalacrocorax carbo</i> )	Hierro (Fe)	1.73 - 26.41	
	Cromo (Cr)	0.001 - 0.69	
	Níquel (Ni)	0.001 - 1.33	
	Aluminio (Al)	0.03 - 7.11	[82]
Garza real	Hierro (Fe)	1.07 - 23.99	
	Cromo (Cr)	0.03 - 0.24	
	Níquel (Ni)	0.9 - 5.04	

## 5. Uso de mangles como bioindicadores

Los manglares son una comunidad de plantas que habitan en ambientes con niveles altos de salinidad los cuales se ven afectados por las mareas, además son ecosistemas intermareales que se encuentran entre el medio marino y el terrestre en zonas tropicales y subtropicales. Estas plantas pueden absorber y acumular contaminantes como metales pesados en sus tejidos, raíces, y hojas debido a esta capacidad, han sido utilizados para reducir las concentraciones de los metales pesados en el medio acuático [85]. Esta acumulación de contaminantes puede generar diferentes efectos y cambios en los manglares como la pérdida de hojas, alteración en la estructura de la planta e incluso la muerte del mangle [86]. Los manglares han sido utilizados en estudios de biomonitorización como bioindicadores de la contaminación ambiental debido a las plantas que habitan cerca de zonas contaminadas presentan cambios en diferentes aspectos convirtiéndolas en bioindicadores ambientales de la contaminación muy útiles [87]. En la Tabla 8 se presentan algunos contaminantes encontrados en las cascaras de huevos de diferentes especies de aves.

**Tabla 8.** Contaminantes encontrados en las cascaras de huevos de diferentes especies de manglares

Especie	Contaminante	Concentración (mg/kg)	Referencia
<i>Pluchea indica</i>	Cobre (Cu)	1.17 – 17.41	
	Plomo (Pb)	0.24 – 31.27	
	Zinc (Zn)	9.14 – 101.27	[88]
<i>Sesuvium portulacastrum</i>	Cobre (Cu)	1.8 – 10.88	
	Plomo (Pb)	0.55 – 31.27	
	Zinc (Zn)	5.53 – 101.27	
<i>Avicennia marina</i>	Cromo (Cr)	0.10 – 0.45	
	Hierro (Fe)	63.4 – 210	
	Cobre (Cu)	4.03 – 8.42	
	Ni (Níquel)	1.07 – 1.93	
	Zinc (Zn)	1.66 – 3.21	[89]
<i>Pemphis acidula</i>	Cromo (Cr)	0.12 – 1.12	
	Hierro (Fe)	4.08 – 6.44	
	Cobre (Cu)	26.9 – 28.1	
	Ni (Níquel)	1.08 – 2.21	
	Zinc (Zn)	2.96 – 4.85	

## Conclusiones

La contaminación de los cuerpos de agua es una gran preocupación, ya que este es un recurso indispensable para la vida. Esta, se ve contaminada por diferentes factores y actividades, como la mala disposición de residuos industriales, vertimiento de aguas residuales, accidentes industriales, entre otros, las cuales están cargadas de varias especies de contaminantes como metales pesados, contaminantes emergentes y derivados del petróleo, cuyo destino final suele ser fuentes hídricas.

Los bioindicadores son organismos nativos, utilizados para verificar la calidad del entorno donde residen, cuya característica principal sirve para manejar y evidenciar los cambios que ocurren en el medio ambiente en disciplinas como la ecotoxicología. Existen diversos tipos de bioindicadores como las aves, las esponjas, los reptiles, los moluscos, los peces y las plantas, que poseen diversas características como la capacidad de acumular en una o varias partes de sus cuerpos diferentes tipos de contaminantes, lo cual ayuda a determinar la presencia de contaminantes en la zona. Bioindicadores como las plumas y cascaras de huevos de las aves y los manglares han demostrado ser excelentes bioindicadores de contaminación.

## Contribución de autores

**Conceptualización**, K. Ojeda-Delgado, C. Tejada-Tovar y J.C. Vergara-Villadiego; **metodología**, K. Ojeda-Delgado y J. F. Restrepo-Mesa; **Investigación**, J.C. Vergara-Villadiego, J. Leones-Cerpa, K. Ojeda-Delgado; **Análisis**, J.C. Vergara-Villadiego, J. Leones-Cerpa, C. Tejada-Tovar; **Validación**, C. Tejada-Tovar y K. Ojeda-Delgado; **Escritura**, J.C. Vergara-Villadiego, J. Leones-Cerpa; **Supervisión**, C. Tejada-Tovar, K. Ojeda-Delgado y J. F. Restrepo-Mesa; **Revisión final y Edición**, C. Tejada-Tovar, K. Ojeda-Delgado y J. F. Restrepo-Mesa; **adquisición de recursos y financiación**, K. Ojeda-Delgado.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena, y al colegio Montessori de Cartagena de Indias, por proporcionar los materiales y equipos necesarios para realizar el estudio y el personal científico y de apoyo.

## Referencias

- [1] T. Maha A. and L.S. Lian, "Attenuation of organics contamination in polymers processing effluent using iron-based sludge: process optimization and oxidation mechanism," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, Feb. 2020, doi: 10.1080/09593330.2020.1803417.
- [2] M. Mokarram, A. Saber, and V. Sheykhi, "Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 123380, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123380.
- [3] I. Shahzadi, Z. H. Khan, W. Akram, W. U. Khan, A. Ahmad, N. A. Yasin and L. Yujie, "Heavy metal and organic pollutants removal from water using bilayered polydopamine composite of sandwiched graphene Nanosheets: One solution for two obstacles," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 280, p. 119711, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2021.119711.
- [4] C. Zamora-Ledezma, D. Negrete-Bolagay, F. Figueroa, E. Zamora-Ledezma, M. Ni, F. Alexis and V. H. Guerrero,

- "Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, p. 101504, May 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101504.
- [5] S. Tabrez, T. A. Zughaibi, and M. Javed, "Water quality index, *Labeo rohita*, and *Eichhornia crassipes*: Suitable bio-indicators of river water pollution," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 75–82, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.sjbs.2021.10.052.
- [6] A. E. Evans, J. Mateo-Sagasta, M. Qadir, E. Boelee, and A. Ippolito, "Agricultural water pollution: key knowledge gaps and research needs," *Curr Opin Environ Sustain*, vol. 36, pp. 20–27, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.COSUST.2018.10.003.
- [7] A. Intisar, A. Ramzan, T. Sawaira, A.T. Kareem, N. Hussain, M. I. Din, M. Bilal and H. M.N. Iqbal, "Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials – A review," *Chemosphere*, vol. 293, p. 133538, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133538.
- [8] J. Kim, M. Maruthupandy, K. S. An, K. H. Lee, J. Soyeon, J. Kim and W. S. Cho, "Acute and subacute repeated oral toxicity study of fragmented microplastics in Sprague-Dawley rats," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 228, p. 112964, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112964.
- [9] H. G. Hoang, C. F. Chiang, C. Lin, C. Y. Wu, C. W. Lee, N. K. Cheruiyot, H. T. Tran and X. T. Bui, "Human health risk simulation and assessment of heavy metal contamination in a river affected by industrial activities," *Environmental Pollution*, vol. 285, p. 117414, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.117414.
- [10] S. V. Vargas-Solano, F. Rodríguez-González, R. Martínez-Velarde, S. S. Morales-García, and M. P. Jonathan, "Removal of heavy metals present in water from the Yautepec River Morelos México, using *Opuntia ficus-indica* mucilage," *Environ. Adv.*, vol. 7, p. 100160, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENVADV.2021.100160.
- [11] C. J. S. Sampaio, J. R. B. de Souza, G. C. de Carvalho, C. M. Quintella, and M. R. de A. Roque, "Analysis of petroleum biodegradation by a bacterial consortium isolated from worms of the polychaeta class (Annelida): Implications for NPK fertilizer supplementation," *J Environ Manage*, vol. 246, pp. 617–624, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.06.018.
- [12] J. Scaria, A. Gopinath, and P. V. Nidheesh, "A versatile strategy to eliminate emerging contaminants from the aqueous environment: Heterogeneous Fenton process," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 124014, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124014.
- [13] E. Atangana and P. J. Oberholster, "Using heavy metal pollution indices to assess water quality of surface and groundwater on catchment levels in South Africa," *J. African Earth Sci.*, vol. 182, no. May, p. 104254, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104254.
- [14] L. Chen, X. Cai, M. Cao, H. Liu, Y. Liang, L. Hu, Y. Yin, Y. Li and J. Shi, "Long-term investigation of heavy metal variations in mollusks along the Chinese Bohai Sea," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 236, p. 113443, May 2022, doi: 10.1016/J.ECOENV.2022.113443.
- [15] J. Álvarez-Lopezello, C. Robles, and R. F. del Castillo, "Microplastic pollution in neotropical rainforest, savanna, pine plantations, and pasture soils in lowland areas of Oaxaca, Mexico: Preliminary results," *Ecol Indic*, vol. 121,

p. 107084, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2020.107084.

- [16] X. J. Zhou, J. Wang, H. Y. Li, H. M. Zhang, Hua-Jiang, and D. L. Zhang, "Microplastic pollution of bottled water in China," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, p. 101884, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101884.
- [17] H. Tan, H. Zhang, C. Wu, C. Wang, and Q. Li, "Pesticides in surface waters of tropical river basins draining areas with rice-vegetable rotations in Hainan, China: Occurrence, relation to environmental factors, and risk assessment," *Environmental Pollution*, vol. 283, p. 117100, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.117100.
- [18] L. Yang, T. Wang, Y. Zhou, B. Shi, R. Bi, and J. Meng, "Contamination, source and potential risks of pharmaceuticals and personal products (PPCPs) in Baiyangdian Basin, an intensive human intervention area, China," *Science of The Total Environment*, vol. 760, p. 144080, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.144080.
- [19] N. Rangel-Buitrago, H. Arroyo-Olarte, J. Trilleras, V. A. Arana, E. Mantilla-Barbosa, A. Gracia C., A. Velez-Mendoza, W. J. Neal, A. T. Williams and A. Micallef, "Microplastics pollution on Colombian Central Caribbean beaches," *Mar Pollut Bull*, vol. 170, p. 112685, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112685
- [20] M. F. Lizarazo, C. D. Herrera, C. A. Calis, F. E. Diaz, W. A. Andrade and O. E. Rodriguez, "Contamination of staple crops by heavy metals in Sibaté, Colombia," *Heliyon*, vol. 6, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04212.
- [21] L. F. Espinosa-Díaz, J. A. Sánchez-Cabeza, J. L. Sericano, J. P. Parra, K. P. Ibarra-Gutierrez, J. A. Garay-Tinoco, J. M. Betancourt-Portela, C. Alonso-Hernández, A. C. Ruiz-Fernández, A. Quejido-Cabezas and M- Diaz-Asencio, "Sedimentary record of the impact of management actions on pollution of Cartagena bay, Colombia," *Mar Pollut Bull*, vol. 172, p. 112807, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112807.
- [22] R. Teta, G. Esposito, M. Casazza and C. J. Zappa, "Bioindicators as a tool in environmental impact assessment: Cyanobacteria as a sentinel of pollution," *Int. J. Sus. Dev. Plann*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.7916/09GQ-YR39.
- [23] R. G. I. Sumudumali and J. M. C. K. Jayawardana, "A Review of Biological Monitoring of Aquatic Ecosystems Approaches: with Special Reference to Macroinvertebrates and Pesticide Pollution," *Environ. Manage.*, vol. 67, no. 2, pp. 263–276, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00267-020-01423-0.
- [24] L. Polechońska and A. Klink, "Validation of *Hydrocharis morsus-ranae* as a possible bioindicator of trace element pollution in freshwaters using *Ceratophyllum demersum* as a reference species," *Environ. Pollut.*, vol. 269, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116145.
- [25] V. Kumar, A. Sharma, R. Kumar, R. Bhardwaj, A. Kumar Thukral, and J. Rodrigo-Comino, "Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2020, doi: 10.1080/10807039.2018.1497946.
- [26] C. FN and M. MF, "Factors Affecting Water Pollution: A Review," *J. Ecosyst. Ecography*, vol. 07, no. 01, pp. 5–8, 2017, doi: 10.4172/2157-7625.1000225.

- [27] F. Riva, E. Zuccato, E. Davoli, E. Fattore, and S. Castiglioni, "Risk assessment of a mixture of emerging contaminants in surface water in a highly urbanized area in Italy," *J. Hazard. Mater.*, vol. 361, no. August 2018, pp. 103–110, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.099.
- [28] E. Vetrimurugan, K. Brindha, L. Elango, and O. M. Ndwandwe, "Human exposure risk to heavy metals through groundwater used for drinking in an intensively irrigated river delta," *Appl. Water Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 3267–3280, Oct. 2017, doi: 10.1007/s13201-016-0472-6.
- [29] J. Pandiyan, S. Mahboob, M. Govindarajan, K. A. Al-Ghanim, Z. Ahmed, N. Al-Mulhm, R. Jagadheesan and K. Krishnappa, "An assessment of level of heavy metals pollution in the water, sediment and aquatic organisms: A perspective of tackling environmental threats for food security," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 2, pp. 1218–1225, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.sjbs.2020.11.072.
- [30] Y. Huang, B. Zhou, N. Li, Y. Li, R. Han, J. Qi, X. Lu, S. Li, C. Feng and S. Liang, "Spatial-temporal analysis of selected industrial aquatic heavy metal pollution in China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 238, p. 117944, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117944.
- [31] F. Deniz, "Green purification of heavy metal pollution from aquatic environment by biorefinery waste biomass of *Nigella sativa* L.: A novel and effective treatment agent," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 25, p. 102118, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ETI.2021.102118.
- [32] W. Dong, Y. Zhang, and X. Quan, "Health risk assessment of heavy metals and pesticides: A case study in the main drinking water source in Dalian, China," *Chemosphere*, vol. 242, p. 125113, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125113.
- [33] Q. Zhou, N. Yang, Y. Li, B. Ren, X. Ding, H. Bian and X. Yao, "Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 22, p. e00925, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e00925.
- [34] I. Haq and A. S. Kalamdhad, "Phytotoxicity and cyto-genotoxicity evaluation of organic and inorganic pollutants containing petroleum refinery wastewater using plant bioassay," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 23, p. 101651, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101651.
- [35] L. A. Mokif, H. K. Jasim, and N. A. Abdulhusain, "Petroleum and oily wastewater treatment methods: A mini review," *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 2671–2674, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.08.340.
- [36] K. Sayed, L. Baloo, and N. K. Sharma, "Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (Tph) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 5, pp. 1–27, Feb. 2021, doi: 10.3390/ijerph18052226.
- [37] M. Varsha, P. Senthil Kumar, and B. Senthil Rathi, "A review on recent trends in the removal of emerging contaminants from aquatic environment using low-cost adsorbents," *Chemosphere*, vol. 287, p. 132270, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132270.
- [38] B. S. Rathi, P. S. Kumar, and P. L. Show, "A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research," *J. Hazard. Mater.*, vol. 409, p. 124413, 2021, doi:

10.1016/j.jhazmat.2020.124413.

- [39] J. Wang, M. Zhang, J. Liu, X. Hu, and B. He, "Using a targeted ecopharmacovigilance intervention to control antibiotic pollution in a rural aquatic environment," *Sci. Total Environ.*, vol. 696, p. 134007, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134007.
- [40] J. M. García, L. F. Sarmiento, M. S. Rodríguez, and L. S. Porras, "Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta," *UG Cienc.*, vol. 23, pp. 55–10, Oct. 2017, doi: 10.18634/UGCJ.23V.01.659.
- [41] Z. Chen, B. Eaton, and J. Davies, "The Appropriateness of Using Aquatic Snails as Bioindicators of Toxicity for Oil Sands Process-Affected Water," *Pollutants*, vol. 1, no. 1, pp. 10–17, Jan. 2021, doi: 10.3390/pollutants1010002.
- [42] H. Sajjad, "Terrestrial Insects as Bioindicators of Environmental Pollution: A Review," *J. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 21–25, 2020.
- [43] G. A. Pinilla A, "Indicadores biológicos usados en Colombia" in *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Compilación bibliográfica*. 1998, pp. 15-40.
- [44] S. Ghannem, S. Touaylia, and M. Boumaiza, "Beetles (Insecta: Coleoptera) as bioindicators of the assessment of environmental pollution," *Hum. Ecol. Risk Assess.*, vol. 24, no. 2, pp. 456–464, 2018, doi: 10.1080/10807039.2017.1385387.
- [45] T. K. Parmar, D. Rawtani, and Y. K. Agrawal, "Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution," *Front. Life Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 110–118, 2016, doi: 10.1080/21553769.2016.1162753.
- [46] N. Asif, F. Nazir, and M. Malik, "A Review of on Environmental Pollution Bioindicators Biodiversity View project Water Pollution View project," vol. 4, no. 1, pp. 111–118, 2018, doi: 10.22059/poll.2017.237440.296.
- [47] E. Solgi, E. Mirzaei-Rajeouni, and A. Zamani, "Feathers of Three Waterfowl Bird Species from Northern Iran for Heavy Metals Biomonitoring," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 104, no. 6, pp. 727–732, 2020, doi: 10.1007/s00128-020-02852-7.
- [48] S. Squadrone, P. Brizio, L. Favaro, G. Todino, D. Florio, C. D. Runga and M. C. Abete, "Humboldt penguins' feathers as bioindicators of metal exposure," *Sci. Total Environ.*, vol. 650, pp. 1734–1739, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.326.
- [49] T. Yao, G. Zhu, Y. Zhang, P. Yan, C. Li, and W. F. de Boer, "Bird's feather as an effective bioindicator for detection of trace elements in polymetallic contaminated areas in Anhui Province, China," *Sci. Total Environ.*, vol. 771, p. 144816, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144816.
- [50] H. Mukhtar, C. Y. Chan, Y. P. Lin, and C. M. Lin, "Assessing the association and predictability of heavy metals in avian organs, feathers, and bones using crowdsourced samples," *Chemosphere*, vol. 252, p. 126583, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126583.

- [51] M. A. F. Gillingham F. Borghesi, B. K. Montero, F. Migani, A. Béchet, M. Rendón-Martos, J. A. Amat, E. Dinelli and S. Sommer, "Bioaccumulation of trace elements affects chick body condition and gut microbiome in greater flamingos," *Sci. Total Environ.*, vol. 761, p. 143250, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143250.
- [52] B. Almayyahi, "Birds as Intrinsic Bio-Indicators for Probing Heavy Metal Contamination Signatures in Polluted Environmental Matrices" in *Heavy Metals - Recent Advances*. IntechOpen, 2023.
- [53] R. Furtado, M. E. Pereira, J. P. Granadeiro, and P. Catry, "Body feather mercury and arsenic concentrations in five species of seabirds from the Falkland Islands," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 149, p. 110574, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110574.
- [54] Y. D. Zebal, P. G. Costa, M. M. de Souza, and A. Bianchini, "Avian blood and feathers as biological tools to track impacts from trace-metals: Bioaccumulation data from the biggest environmental disaster in Brazilian history," *Sci. Total Environ.*, vol. 807, p. 151077, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151077.
- [55] O. Celis-Hernández, E. Ávila, R. D. Ward, M. A. Rodríguez-Santiago, and J. A. Aguirre-Téllez, "Microplastic distribution in urban vs pristine mangroves: Using marine sponges as bioindicators of environmental pollution," *Environ. Pollut.*, vol. 284, no. May, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117391.
- [56] I. Marzuki, L. Daris, K. Nisaa, and A. Emelda, "The power of biodegradation and bio-adsorption of bacteria symbiont sponges sea on waste contaminated of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 584, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/584/1/012013.
- [57] G. Rosado Rodríguez and E. Otero Morales, "Assessment of heavy metal contamination at Tallaboa Bay (Puerto Rico) by marine sponges' bioaccumulation and fungal community composition," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 161, no. April, 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111803.
- [58] F. Saliu, G. Biale, C. Raguso, J. L. Nasa, I. Degano, D. Seveso, P. Galli, M. Lasagni and F. Modugno, "Detection of plastic particles in marine sponges by a combined infrared micro-spectroscopy and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry approach," *Sci. Total Environ.*, vol. 819, p. 152965, May 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.152965.
- [59] J. O. Outa, C. O. Kowenje, A. Avenant-Oldewage, and F. Jirsa, "Trace Elements in Crustaceans, Mollusks and Fish in the Kenyan Part of Lake Victoria: Bioaccumulation, Bioindication and Health Risk Analysis," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 78, no. 4, pp. 589–603, 2020, doi: 10.1007/s00244-020-00715-0.
- [60] L. Sanz-Prada, E. Garcia-Ordiales, N. Roqueñí, J. Manuel Rico, and J. Loredó, "Heavy metal concentrations and dispersion in wild mussels along the Asturias coastline (North of Spain)," *Ecol. Indic.*, vol. 135, p. 108526, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.108526.
- [61] A. Joshy, S. R. K. Sharma, K. G. Mini, S. Gangadharan, and P. Pranav, "Fisheries Resource Assessment Division , ICAR-Central Marine Fisheries Research Institute," *Aquat. Toxicol.*, p. 106076, 2022, doi: 10.1016/j.aquatox.2022.106076.
- [62] A. H. Hong, K. E. Hargan, B. Williams, B. Nuangsaeng, S. Siriwong, P. Tassawad, C. Chaiharn and M. L. Huertos, "Examining molluscs as bioindicators of shrimp aquaculture effluent contamination in a southeast Asian



- mangrove," *Ecol. Indic.*, vol. 115, p. 106365, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106365.
- [63] X. Chen, H. Liu, H. Huang, K. Liber, T. Jiang, and J. Yang, "Cadmium bioaccumulation and distribution in the freshwater bivalve *Anodonta woodiana* exposed to environmentally relevant Cd levels," *Sci. Total Environ.*, vol. 791, p. 148289, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148289.
- [64] Y. Cho, W. J. Shim, M. Jang, G. M. Han, and S. H. Hong, "Nationwide monitoring of microplastics in bivalves from the coastal environment of Korea," *Environ. Pollut.*, vol. 270, p. 116175, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116175.
- [65] A. Frossard, F. L.G. Leite, E. L.F. Silva, M. T.W.D. Carneiro, J. L.R. Júnior, L. C. Gomes and D. C. Endringer, "The snake *Bothrops jararaca* (Squamata: Viperidae) is a suitable bioindicator of environmental exposure to cadmium: An experimental study," *Ecol. Indic.*, vol. 104, pp. 166–171, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.04.079.
- [66] M. J. Hurtado-Morales, M. R. Susa, and A. Amézquita, "Heavy Metal Concentration in Neotropical Aquatic Snakes (*Helicops pastazae*) and Its Potential as a Bioindicator of Water Pollution," *Arch Environ Contam Toxicol*, vol. 82, no. 3, pp. 367–378, Apr. 2022, doi: 10.1007/S00244-022-00911-0/METRICS.
- [67] M. Sinaei and R. Zare, "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and some biomarkers in the green sea turtles (*Chelonia mydas*)," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 146, no. January, pp. 336–342, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.024.
- [68] D. L. Haskins, M. K. Brown, R. B. Bringolf, and T. D. Tuberville, "Brown watersnakes (*Nerodia taxispilota*) as bioindicators of mercury contamination in a riverine system," *Sci. Total Environ.*, vol. 755, p. 142545, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142545.
- [69] M. Esposito, A. D. Roma, D. Sansone, D. Capozzo, D. Iaccarino, F. di. Nocera and P. Gallo, "Non-essential toxic element (Cd, As, Hg and Pb) levels in muscle, liver and kidney of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) stranded along the southwestern coasts of Tyrrhenian sea," *Comp. Biochem. Physiol. Part - C Toxicol. Pharmacol.*, vol. 231, no. December 2019, p. 108725, 2020, doi: 10.1016/j.cbpc.2020.108725.
- [70] X. Jiang, J. Wang, B. Pan, D. Li, Y. Wang, and X. Liu, "Assessment of heavy metal accumulation in freshwater fish of Dongting Lake, China: Effects of feeding habits, habitat preferences and body size," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 112, pp. 355–365, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jjes.2021.05.004.
- [71] S. Muhammad and K. Ahmad, "Heavy metal contamination in water and fish of the Hunza River and its tributaries in Gilgit–Baltistan: Evaluation of potential risks and provenance," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 20, p. 101159, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101159.
- [72] T. Aytakin, D. Kargin, H. Y. Çoğun, Ö. Temiz, H. S. Varkal, and F. Kargin, "Accumulation and health risk assessment of heavy metals in tissues of the shrimp and fish species from the Yumurtalik coast of Iskenderun Gulf, Turkey," *Heliyon*, vol. 5, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02131.
- [73] P. Garai, P. Banerjee, P. Mondal, and N. C. Saha, "Effect of Heavy Metals on Fishes: Toxicity and Bioaccumulation," *J. Clin. Toxicol.*, vol. 11, no. S18, p. 1, 2021.

- [74] X. Miao, Y. Hao, H. Liu, Z. Xie, D. Miao, and X. He, "Effects of heavy metals speciations in sediments on their bioaccumulation in wild fish in rivers in Liuzhou—A typical karst catchment in southwest China," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 214, pp. 112099, May 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112099.
- [75] T. Recabarren-Villalón, A. C. Ronda, A. L. Oliva, A. L. Cazorla, J. E. Marcovecchio, and A. H. Arias, "Seasonal distribution pattern and bioaccumulation of Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in four bioindicator coastal fishes of Argentina," *Environ. Pollut.*, vol. 291, pp. 118125, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118125.
- [76] A. Grúz et al., "Biomonitoring of toxic metals in feathers of predatory birds from eastern regions of Hungary," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 25, pp. 26324–26331, Jul. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05723-9.
- [77] Y. P. Lin, J. Anthony, H. Mukhtar, and C. M. Lin, "A spatial prioritization method for identifying potential eco-risk distributions of heavy metals in soil and birds," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 220, p. 112383, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112383.
- [78] C. N. Amadi, C. Frazzoli, and O. E. Orisakwe, "Sentinel species for biomonitoring and biosurveillance of environmental heavy metals in Nigeria," *J. Environ. Sci. Heal. Part C Toxicol. Carcinog.*, vol. 38, no. 1, pp. 21–60, 2020, doi: 10.1080/26896583.2020.1714370.
- [79] F. Iqbal, Q. Ayub, R. Wilson, B. K. Song, A. Talei, K. Y. Yeong, A. A. Hermawan, M. Fahim and S. Rahman, "Monitoring of heavy metal pollution in urban and rural environments across Pakistan using House crows (*Corvus splendens*) as bioindicator," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, no. 4, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1007/s10661-021-08966-7.
- [80] M. Innangi, D. D. Rosa, T. Danise, I. Fozzi, M. Giannotti, M. Izzo, M. Trifuoggi and A. Fioretto, "Analysis of 11 trace elements in flight feathers of Italian Sparrows in southern Italy: A study of bioaccumulation through age classes, variability in three years of sampling, and relations with body condition," *Sci. Total Environ.*, vol. 651, pp. 2003–2012, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.105.
- [81] M. Aloupi, E. Ferentinou, O. M. Zaharaki, and T. Akriotis, "Does dilute nitric acid improve the removal of exogenous heavy metals from feathers? A comparative study towards the optimization of the cleaning procedure of feather samples prior to metal analysis," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 200, no. February, p. 110759, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110759.
- [82] D. Jakubas, I. Kitowski, D. Wiącek, and S. Bzoma, "Inter-species and inter-colony differences in elemental concentrations in eggshells of sympatrically nesting great cormorants *Phalacrocorax carbo* and grey herons *Ardea cinerea*," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 2747–2760, Nov. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-3765-5.
- [83] A. Ashkoo, S. M. Amininasab, and R. Zamani-Ahmadmoodi, "Bioaccumulation of heavy metals in eggshell and egg content of seabirds: Lesser (*Thalasseus bengalensis*) and Greater Crested Tern (*Thalasseus bergii*)," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 154, pp. 111126, May 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111126.
- [84] J. D. van Aswegen, L. Nel, N. A. Strydom, K. Minnaar, H. Kylin, and H. Bouwman, "Comparing the metallic elemental compositions of Kelp Gull *Larus dominicanus* eggs and eggshells from the Swartkops Estuary, Port

- Elizabeth, South Africa," *Chemosphere*, vol. 221, pp. 533–542, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.013.
- [85] R. Wilda, A. M. Hamdan, and R. Rahmi, "A review: The use of mangrove for biomonitoring on aquatic environment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 980, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/980/1/012083.
- [86] O. Celis-Hernandez, M. Villoslada-Peciña, R. D. Ward, T. F. Bergamo, R. Perez-Ceballos, and M. P. Girón-García, "Impacts of environmental pollution on mangrove phenology: Combining remotely sensed data and generalized additive models," *Sci. Total Environ.*, vol. 810, p. 152309, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152309.
- [87] C. P. Victório, M. S. dos Santos, and N. K. Simas, "Phthalates: environmental pollutants detected in leaf epicuticular wax of *Avicennia schaueriana* and *Rhizophora mangle* from a mangrove ecosystem," *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–10, Jan. 2021, doi: 10.1080/00207233.2021.1875298.
- [88] R. K. Soraya, N. D. Takarina, and T. Soedjiarti, "Metals accumulation (Cu, Zn and Pb) in mangrove-associated plants from Blanakan Brackish Water Pond, Subang District, West Java," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2168, Nov. 2019, doi: 10.1063/1.5132513.
- [89] U. Arisekar, R. Jeya Shakila, R. Shalini, G. Jeyasekaran, B. Sivaraman, and T. Surya, "Heavy metal concentrations in the macroalgae, seagrasses, mangroves, and crabs collected from the Tuticorin coast (Hare Island), Gulf of Mannar, South India," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 163, no. January, pp. 111971, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.111971.