

Evaluación de Metales Traza en Agua y Sedimento Marino en la Ensenada Mackellar, Antártica (2018-2019)

Metal Trace Assessment in Marine Water and Sediment of Ensenada Mackellar, Antarctica (2018-2019)

Jonathan Delio Alfaro Jaucha^{1,a}, Carlos Alberto Martínez Gamboa^{1,b}, Jorge Tam Málaga^{1,c}, Rita Orozco Moreyra^{1,d}

Recibido: 09/07/2022 - Aprobado: 20/10/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

Existe preocupación por el impacto antropogénico sobre el ecosistema Antártico, por tal motivo el Instituto del Mar del Perú realizó las expediciones científicas Vigésimo Quinta y Sexta del Perú hacia la Antártica. Las investigaciones se llevaron a cabo en el verano austral 2018-2019 a bordo del buque BAP Carrasco en la ensenada Mackellar ubicada en la Isla Rey Jorge, en la cual se tomaron muestras de agua y sedimento marino en 11 estaciones de muestreo para la evaluación de metales traza (Cu, Zn, As y Pb) mediante espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Se observó que los mayores niveles de concentración de Cu, As y Pb en matriz agua correspondieron al año 2019, en comparación con el año 2018. Asimismo, estos metales, no superaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), por lo que se considera que aún no hay riesgos de contaminación acuática. Sin embargo, hay una tendencia de incremento de concentración de estos metales cada año. Adicionalmente, las concentraciones de Cu y As en sedimento estuvieron por encima del ECA, por lo que estos metales podrían causar efectos adversos en el ecosistema marino.

Palabras claves: Metales Traza; Cobre (Cu); Zinc (Zn); Arsénico (As); Plomo (Pb).

ABSTRACT

There is concern about the anthropogenic impact on the Antarctic ecosystem, for this reason the Peruvian Marine Research Institute carried out the Twenty-Fifth and Sixth scientific expeditions of Peru to Antarctica. The investigations were carried out in the austral summer 2018-2019 aboard the BAP Carrasco from the Mackellar Cove located on King George Island, in which samples of water and marine sediment were taken at 11 sampling stations for the evaluation of trace metals (Cu, Zn, As and Pb) by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). It was observed that the highest concentration levels of Cu, As and Pb in the water matrix corresponded to the year 2019, compared to the year 2018. Also, these metals did not exceed the Environmental Quality Standards (EQS), for which it is considered that there is no risk of water contamination yet. However, there is a trend of increasing concentration of these metals each year. Additionally, the concentrations of Cu and As in the sediment were above the EQS, so these metals could cause adverse effects on the marine ecosystem.

Keywords: Trace Metals; Copper (Cu); Zinc (Zn); Arsenic (As); Leads (Pb).

1 Instituto del Mar del Perú, Esq. Gamarra y General Valle s/n Chucuito, Callao, Perú Apartado 22.

a Autor para correspondencia: jalfaro@imarpe.gob.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8481-2740>

b E-mail: cmartinez@imarpe.gob.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3964-9777>

c E-mail: jtam@imarpe.gob.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8224-4313>

d E-mail: ritaoro@imarpe.gob.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8948-7374>

I. INTRODUCCIÓN

Desde 1988 hasta el 2020, el IMARPE tiene una participación constante en las campañas científicas antárticas a bordo del BIC Humboldt y BAP Carrasco, siendo este último partícipe de las tres últimas campañas en la cual uno de sus objetivos consistió en el estudio del medio ambiente en la Ensenada Mackellar, dado que las bases científicas han venido realizando actividades mucho antes del protocolo de protección ambiental al tratado antártico podrían haber generado cierto grado de contaminación por el uso de combustibles, materiales de construcción, etc., las cuales pueden acumularse en el ecosistema incrementando la contaminación de organismos acuáticos en diversos niveles de la red trófica. (Enamorado-Montes et al., 2022).

Asimismo, se ha reportado evidencia histórica de contaminación química por la actividad humana en las distintas estaciones científicas Antárticas, tanto en sedimentos marinos (Lenihan et al., 1990) como en hielo (Suttie & Wolff, 1992), y muchas veces estos desechos provenientes de esta naturaleza constituyen el origen principal de contaminación por metales en las masas de agua (Laino-Guanes et al., 2015).

Es importante conocer la existencia de metales contenidos en diferentes matrices (agua y sedimento marino) ya que dependiendo del tipo de metal estos producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta cancerígenos (Bose & Chakraborty, 1957).

La adición y aporte de metales a nivel traza involucra la transmisión de estos contaminantes en toda la cadena trófica llegando a los peces y posteriormente a animales piscívoros generando un proceso de cambio en todo el entorno del ecosistema (Pabón et al., 2020a).

Por ello, se plantearon dos hipótesis: (i) La acumulación de metales en agua y sedimento marino en 2019 es mayor que en 2018; (ii) La concentración de metales presentes en agua y sedimento marino no superan la norma de calidad ambiental (ECA).

II. MÉTODOS

2.1. Área de Estudio y Diseño de Muestreo

La Isla Rey Jorge se encuentra dentro del conjunto de Islas de Shetland del Sur localizada en el sector norte de la Península Antártica, aproximadamente a 900 km al sur del Cabo de Hornos y América del Sur. La Isla Rey Jorge presenta tres grandes bahías denominadas Bahía Rey Jorge, Bahía Fildes y Bahía Almirantazgo (Figura 1). La Ensenada Mackellar está situada en la parte norte de la bahía Almirantazgo, que es la bahía más grande de la isla Rey Jorge-islas Shetland del sur, cubriendo un área de 120 km² y con un nivel de profundidad de 600 m aproximadamente (Jazdzewski K et al., 1986).

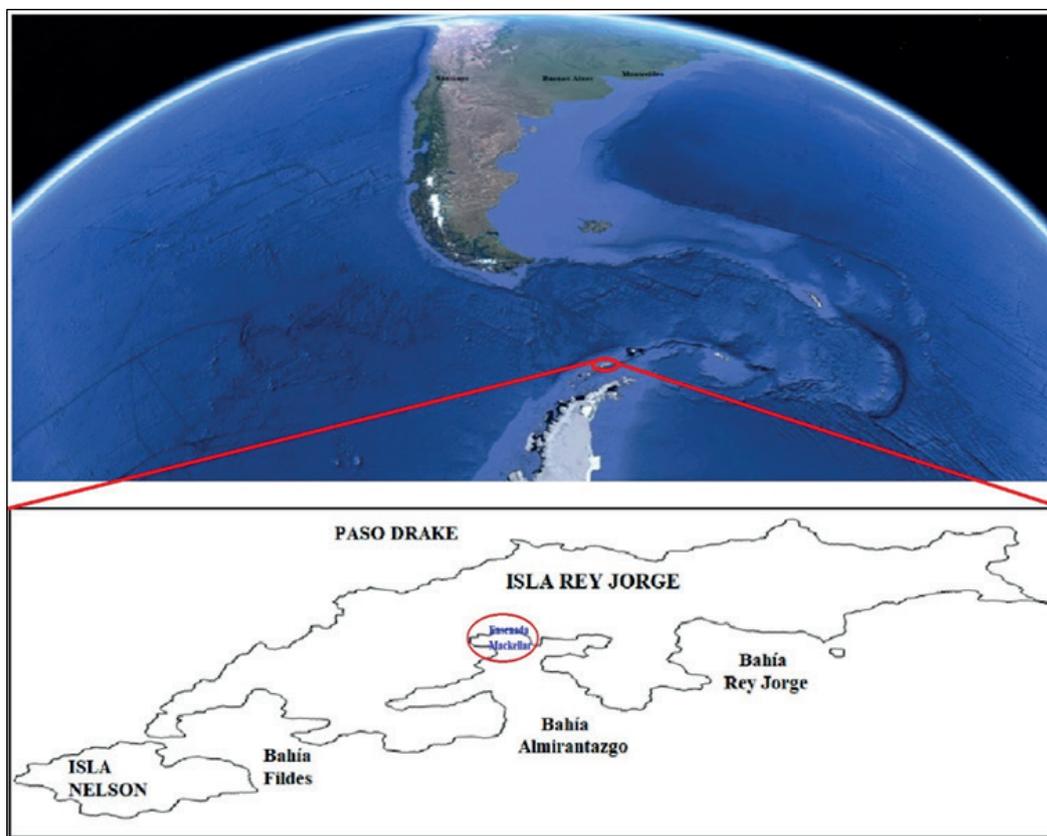


Figura 1. Ubicación de la zona de muestreo en la Bahía Almirantazgo – Ensenada Mackellar

Las propiedades fisicoquímicas y la dinámica de los cuerpos de agua contribuyen a una distribución homogénea de contaminantes metálicos en diferentes matrices ambientales (agua y sedimento) por lo que se definió como criterio de toma de muestras dentro de la ensenada Mackellar 11 estaciones (Figura 2).

Las muestras de aguas marinas superficiales fueron recolectadas en botellas de plástico previamente limpias y

rotuladas a un volumen aproximado de 500 mL. Asimismo, las muestras de sedimento fueron recolectadas del fondo marino mediante una draga Van Veen una cantidad aproximada de 250 g y se almacenaron en bolsas de plástico transparente con cierre hermético, estas muestras fueron preservadas en congeladoras a una temperatura de -18°C para su posterior traslado y análisis en el Laboratorio de Contaminación Química del Instituto del Mar del Perú (IMARPE, 2022) (ver Tabla 1).

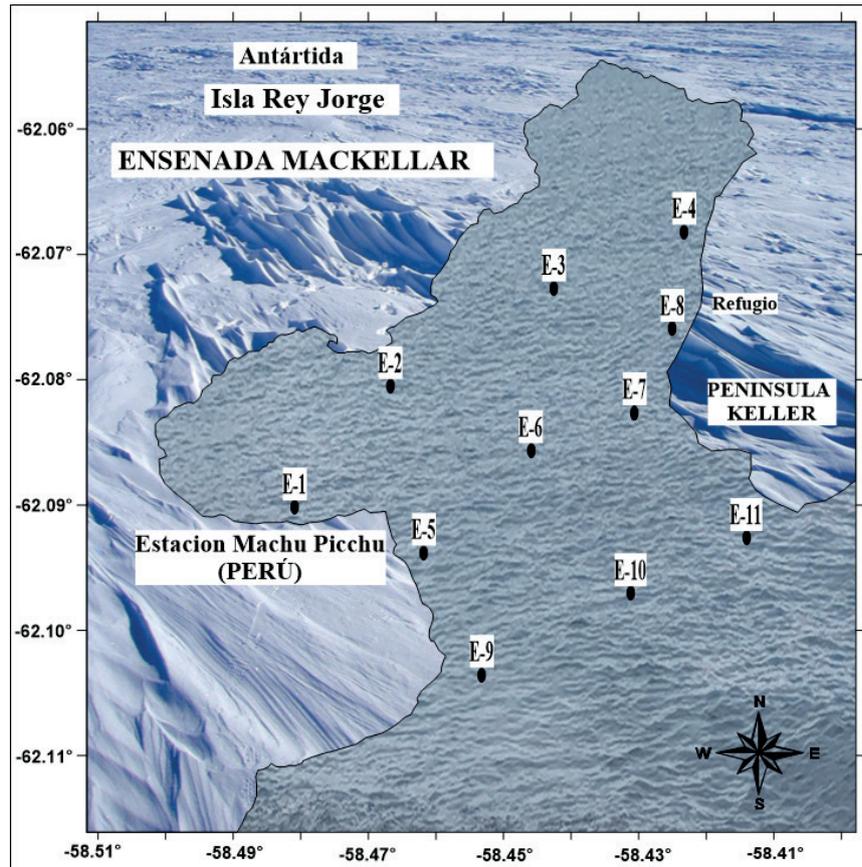


Figura 2. Carta de Posiciones de las estaciones de muestreo en la Ensenada Mackellar, Antártica.

Tabla 1. Posición de las estaciones de muestreo, ANTAR XXV-XXVI

Estación	Latitud	Longitud
E-1	62°05'21.0"	58°29'36.8"
E-2	62°04'43.7"	58°29'15.4"
E-3	62°04'17.6"	58°27'06.3"
E-4	62°03'54.4"	58°25'48.6"
E-5	62°05'35.9"	58°28'19.2"
E-6	62°05'03.6"	58°27'26.3"
E-7	62°04'57.6"	58°26'27.4"
E-8	62°04'30.2"	58°26'02.0"
E-9	62°06'08.9"	58°27'45.3"
E-10	62°05'42.6"	58°26'29.7"
E-11	62°05'20.1"	58.25'21.6"

2.2. Tratamiento de las Muestras

2.2.1. Digestión de muestras - Aguas Marinas

Se tomó 50 mL de cada muestra y se adicionó 1 ml de ácido nítrico (HNO_3) de grado ultrapuro para posteriormente llevarlo en un sistema de digestión por microondas. Finalmente, las muestras de agua fueron trasvasadas a tubos de polipropileno y aforado con agua ultrapura (en caso existió evaporación) a volumen de 50 mL para su posterior análisis por ICP-MS.

2.2.2. Digestión de muestras - Sedimento Marino

La digestión ácida de muestras de sedimento secado y tamizado (200 μm) se realizó con la adición de 4 mL de HNO_3 y 1 mL de HCl de grado ultrapuro para posteriormente llevarlo a un sistema de digestión por microondas. Finalmente, estas muestras fueron centrifugadas para evitar algún sólido en suspensión para su posterior análisis por ICP-MS (Espectrómetro de Masas por plasma acoplado inductivamente).

2.3. Control de Calidad

Para asegurar la confiabilidad de los resultados del proceso de análisis de metales se usaron los materiales de referencia: HISS-1 (*Marine Sediment Reference Material for Trace Metals and other Constituents*) para sedimentos marinos, y SRM 1640a para agua. El porcentaje de recuperación que se obtuvo estuvieron en el rango del 85-115 % (Tablas 2 y 3). Los resultados para las matrices agua y sedimento son expresados en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ y $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente.

2.4. Tratamiento de Datos

El método estadístico para el tratamiento de los resultados fue la prueba de T-Student que sirvió para evaluar la diferencia de medias en las concentraciones de metales entre los años 2018 y 2019 con un nivel de confianza del 95 %.

Todos los cálculos se realizaron mediante el software profesional SPSS statistics 25. La cantidad de metales

traza determinados en agua se contrastó con los Estándares Ambientales (ECA), norma emitida por Decreto Supremo: N°004-2017-MINAM (SINIA, 2017).

El contenido de metales en sedimentos marinos se comparó con la norma de referencia CEQGs (*Canadian Environmental Quality Guidelines*) las establecen dos tipos de valores: los *Interim Sediment Quality Guidelines* (ISQG) que pertenecen a límites dentro de los cuales no se existe probabilidad de efectos biológicos adversos y los *Probability Effect Level* (PEL) que incumbe a los efectos biológicos adversos que se encuentran con frecuencia. La comparación se ha llevado a cabo tomando en cuenta ambos valores ISQG y PEL.

III. RESULTADOS

En la siguiente sección se presenta los resultados correspondientes a la determinación de Cu, Zn, As y Pb en aguas superficiales y sedimento marino de 11 estaciones de muestreo distribuidas dentro de la Ensenada Mackellar para los años 2018-2019.

3.1. Concentración de Cobre (Cu) en agua y sedimento Marino.

La concentración media de Cu contenidos en agua marina para los años 2018 y 2019 fueron de $0.0012 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ y $0.0032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Asimismo, el estudio estadístico muestra que existió una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de Cu contenido en aguas superficiales marinas entre los años 2018 y 2019 con un nivel del 95% de confianza.

Se observó que en el año 2018 la mayor concentración de este metal contenido en el agua se ubicó en el Noreste de la ensenada Mackellar, y el año 2019 la mayor concentración se ubicó en los extremos Este y Oeste adyacente a la base peruana Machu Picchu (Figuras 3a y 3b).

Tabla 2. Valores certificados del material de referencia HISS-1

Element	Mass Fraction, (mg/kg)	Element	Mass Fraction, (mg/kg)
Arsenic (b,h,n)	0.801 ± 0.099	Aluminum (f,i,x)	0.73 ± 0.05
Copper (g,i,q)	2.29 ± 0.37	Magnesium (f,i,x)	0.075 ± 0.016
Lead (g,i,q)	3.13 ± 0.40	Sodium (f,i,n,x)	0.373 ± 0.026
Zinc (g,i,n,q)	4.94 ± 0.79	Uranium (q)	26

Tabla 3. Valor certificado de cada elemento en el material de referencia SRM 1640a

Element	Mass Concentration, ($\mu\text{g/L}$)	k	df
Arsenic	8.075 ± 0.07	1.977	142
Copper	85.75 ± 0.51	2.12	16
Iron	36.8 ± 1.8	2.447	6
Lead	12.101 ± 0.05	1.965	517
Zinc	55.64 ± 0.35	1.995	68

Asimismo, las concentraciones medias de Cu contenidos en el sedimento marino registrados en los años 2018 y 2019 fueron de 83.2 $\mu\text{g.g}^{-1}$ y 83.0 $\mu\text{g.g}^{-1}$. Además, el análisis estadístico indica que no existió una diferencia estadística ($p > 0.05$) entre las concentraciones de Cu contenido en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 con un nivel del 95% de confianza (Figura 4).

Por otro lado, se observó que la mayor concentración de este metal contenido en el sedimento marino se ubicó en las zonas extremas Noreste y Este de la ensenada Mackellar para el año 2018, y con respecto al año 2019 en el extremo Noroeste, tal como se muestra en las Figuras 5a y 5b.

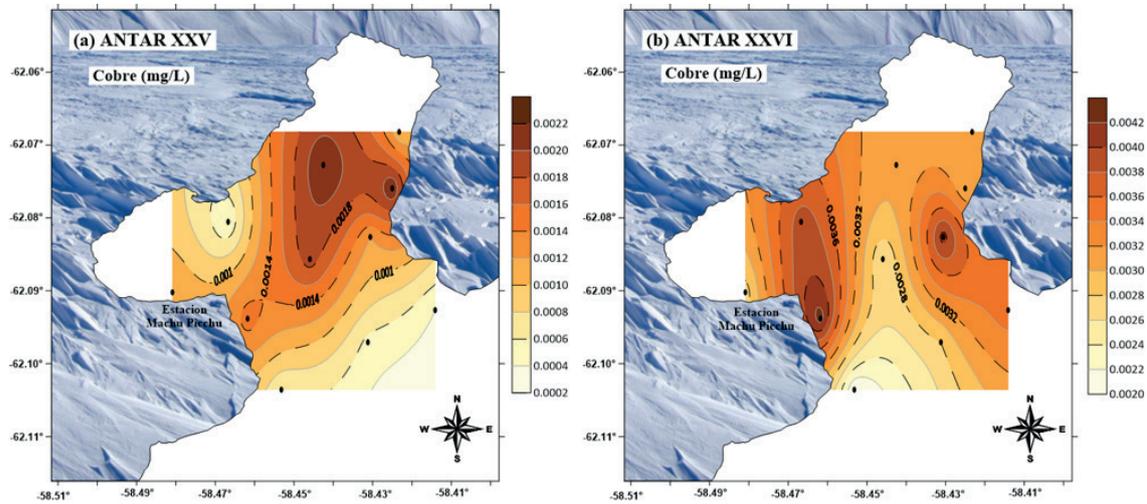


Figura 3. Concentración y dispersión de Cobre en agua: (a) 2018 y (b) 2019.

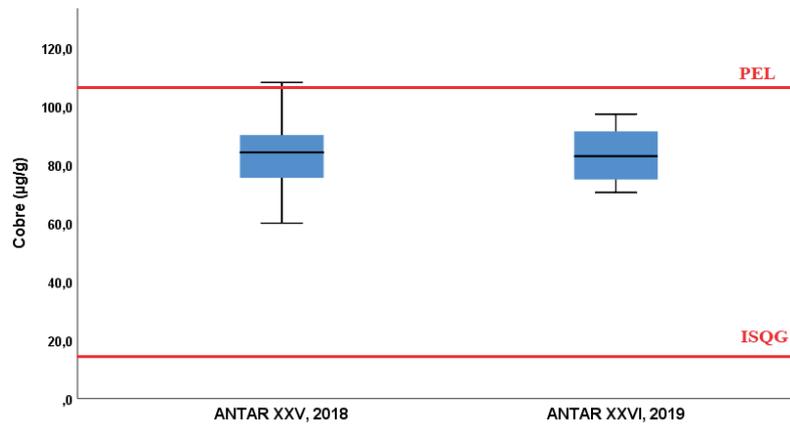


Figura 4. Concentración de Cu ($\mu\text{g/g}$) en 2018 y 2019. Las líneas rojas indican los ECA.

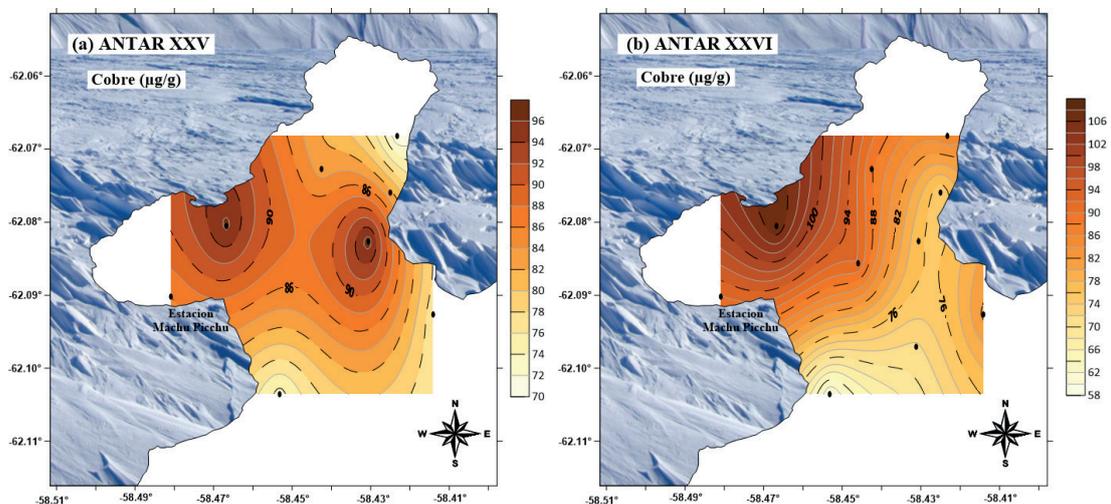


Figura 5. Distribución horizontal de Cobre en sedimento: (a) 2018 y (b) 2019.

3.2. Concentración de Zinc (Zn) en agua y sedimento Marino.

Las concentraciones medias de Zn en aguas marinas superficiales registrados en los años 2018 y 2019 fueron de 0,005 mg.L⁻¹ y 0,002 mg.L⁻¹. El estudio estadístico explica que no existió diferencia significativa ($p > 0.05$) en las concentraciones de este metal para dichos años.

Asimismo, en el año 2018 se observó que hay una tendencia de mayor concentración de este metal contenido en el agua hacia la zona Oeste de la Ensenada Mackellar, y en el año 2019 las mayores concentraciones de este metal fueron ubicadas en los extremos Este y Oeste (Adyacente a la estación Machu Picchu) de la ensenada Mackellar, tal como se muestra en las Figuras 6a y 6b.

Por otro lado, las concentraciones de Zn en sedimento marino registrados en el año 2018 y 2019 fueron de 50.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y 63.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. El estudio estadístico explica que existió una diferencia significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de Zinc contenidos en el sedimento marino para dichos años

con un nivel del 95% de confianza. Se observó que para el año 2018 hay un incremento de concentración de este metal hacia la entrada y la zona Norte de la ensenada Mackellar, y con respecto al año 2019 hacia la zona Sur (Figuras 7a y 7b).

3.3. Concentración de Arsénico (As) en agua y sedimento Marino.

El contenido promedio de As en agua en los años 2018 y 2019 fueron de 0.0029 mg.L⁻¹ y 0.0045 mg.L⁻¹. El estudio estadístico muestra que existió una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de As contenido en agua en los años 2018 y 2019 con un nivel del 95% de confianza (Figura 8).

La mayor concentración de As en agua para el año 2018 fue ubicada en la zona Noreste de la Ensenada Mackellar, lo cual explica la tendencia de un incremento en las zonas de Oeste hacia la zona Noreste, y con respecto al año 2019 las mayores concentraciones fueron ubicadas en los extremos noreste y suroeste (Figuras 9a y 9b).

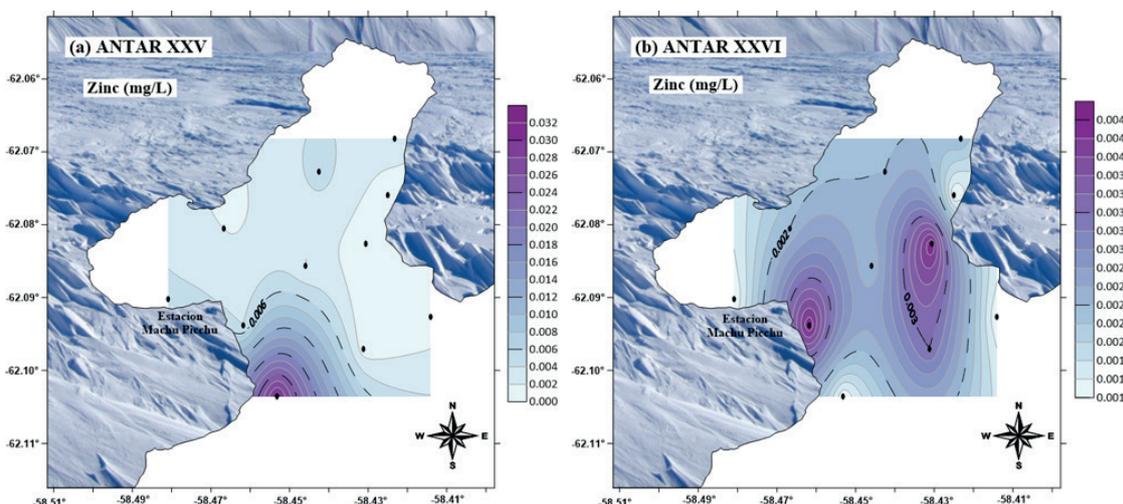


Figura 6. Distribución horizontal de Zinc en agua: (a) 2018 y (b) 2019.

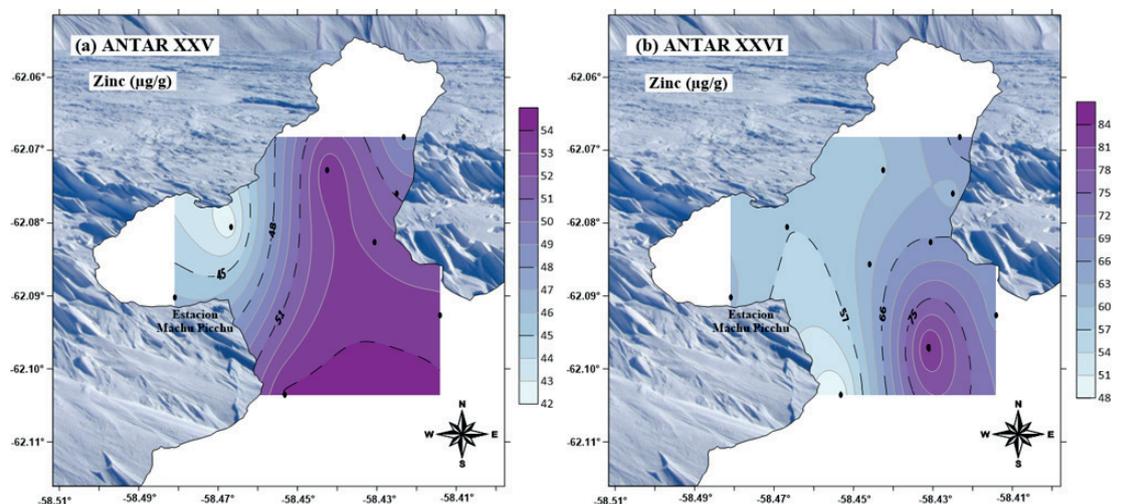


Figura 7. Distribución horizontal de Zinc en sedimento: (a) 2018 y (b) 2019.

Además, el contenido promedio de As en el sedimento marino registrados en el año 2018 y 2019 fueron de 11.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y 12.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. El análisis estadístico indica que no existió una diferencia estadística ($p > 0.05$) de As contenido en sedimento marino para los años 2018 y 2019 con un nivel del 95% de confianza (Figura 10).

Se observó que para el año 2018 hay una tendencia de incremento de As en sedimento hacia la zona Oeste y Noreste de la ensenada Mackellar, y con respecto al año 2019 la mayor concentración de este metal se ubicó en la zona Oeste, cerca de la base Peruana Machu Picchu, tal como se observa en las Figuras 11a y 11b.

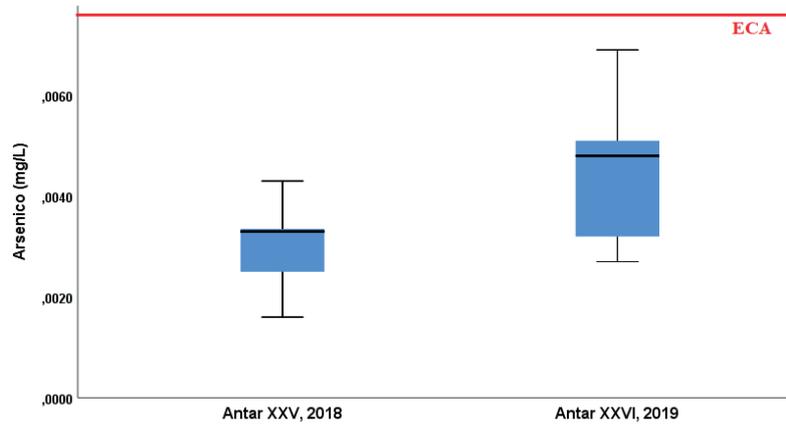


Figura 8. Concentración de As (mg/L) en 2018 y 2019. La línea roja indica el ECA.

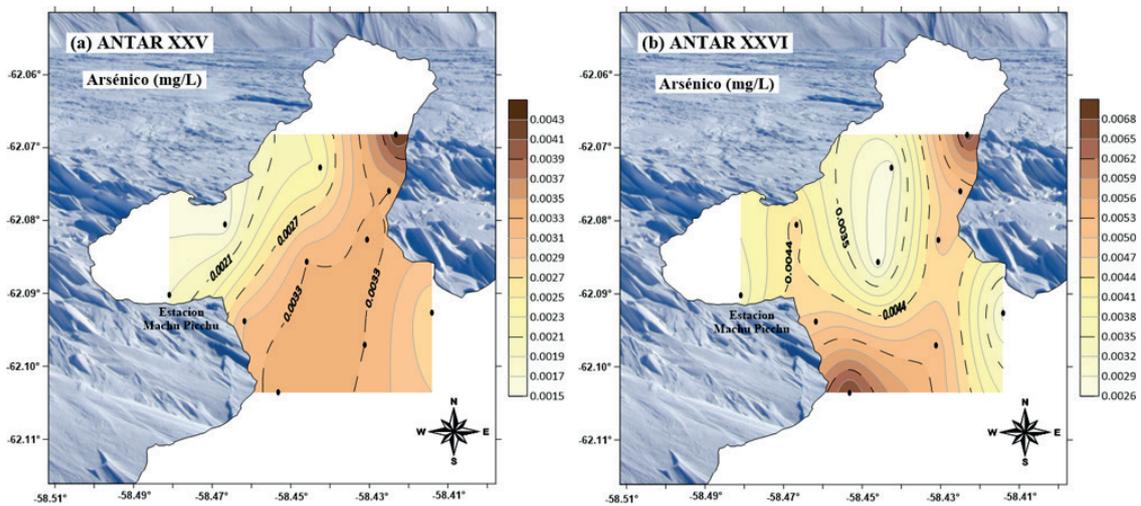


Figura 9. Concentración y dispersión de Arsénico en agua: (a) 2018 y (b) 2019.

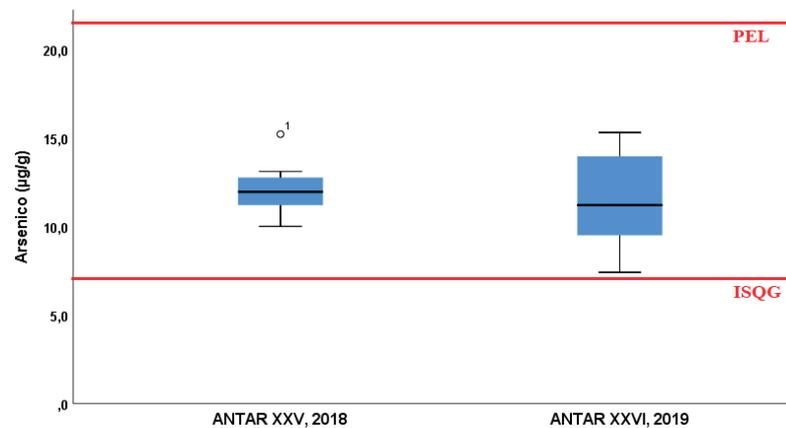


Figura 10. Concentración de As ($\mu\text{g/g}$) en 2018 y 2019. Las líneas rojas indican los ECA.

3.4. Concentración de Plomo (Pb) en agua y sedimento Marino.

Las concentraciones de Pb en aguas marinas superficiales registrados en los años 2018 y 2019 fueron de 0.0007 mg.L⁻¹ y 0.0014 mg.L⁻¹. Del análisis estadístico se desprende que hay una diferencia significativa (P <0,05) entre las concentraciones de Pb contenido en agua para dichos años con un nivel del 95% de confianza (Figura 12)

Se observó para el año 2018 una tendencia de mayor concentración de Pb en agua hacia el Suroeste de la entrada de la Ensenada Mackellar, y para el año 2019 las mayores concentraciones fueron ubicadas en los extremos Noroeste, Noreste y Suroeste (Figuras 13a y 13b).

Adicionalmente, el contenido promedio de Pb en sedimento marino registrados en los años 2018 y 2019 fueron de 8.7 µg.g⁻¹ y 9.1 µg.g⁻¹. Del análisis estadístico

se desprende que no hay una diferencia significativa (p > 0.05) de Pb contenido en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 con un nivel del 95% de confianza.

Se observó que para el año 2018 existe una tendencia de incremento de concentración de Pb desde la zona Este hacia la zona Noroeste de la ensenada Mackellar, y con respecto al año 2019 las mayores concentraciones de este metal se ubicaron en las zonas Noreste y Noroeste, tal como se observa en las Figuras 14a y 14b.

IV. DISCUSION

Las concentraciones de Cu contenido agua marina superficial para los años 2018 y 2019 no lograron superar el ECA (0.05 mg.L⁻¹). Asimismo, las concentraciones de Cu contenido en agua referente al año 2019 fueron superiores a

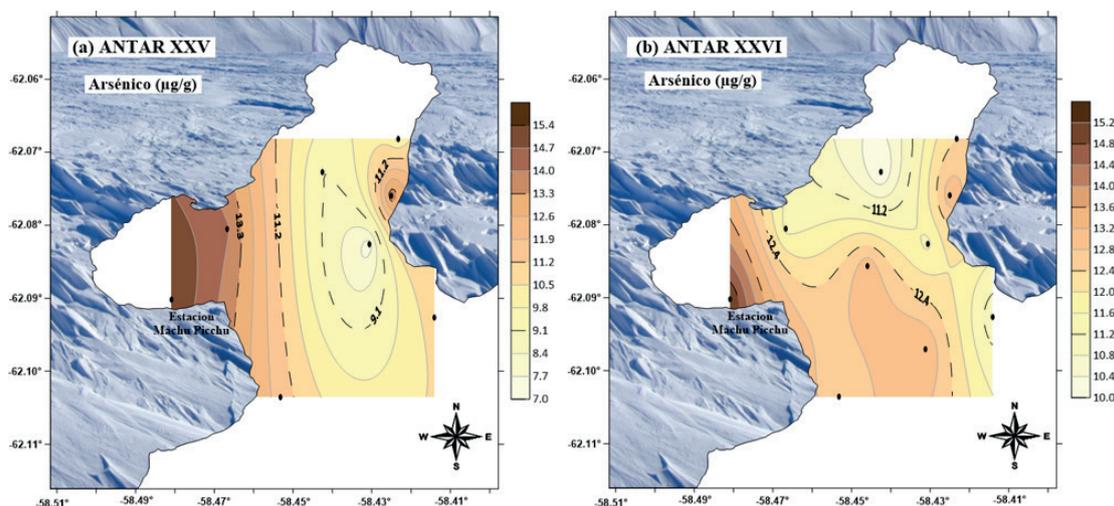


Figura 11. Distribución horizontal de Arsénico en sedimento: (a) 2018 y (b) 2019.

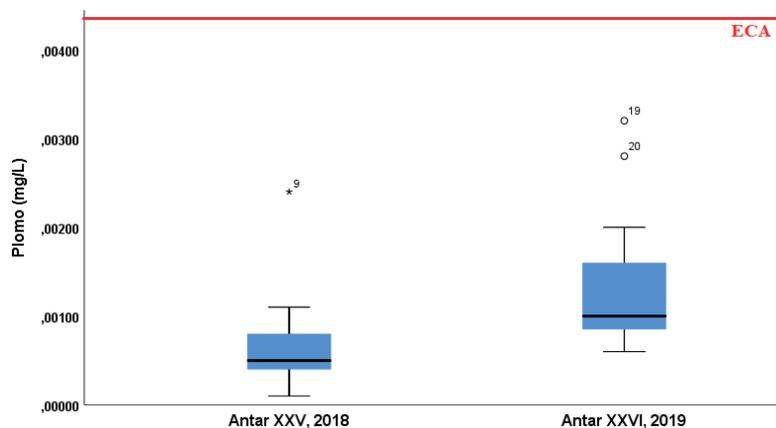


Figura 12. Concentración de Pb (mg/L) en 2018 y 2019. La línea roja indica el ECA.

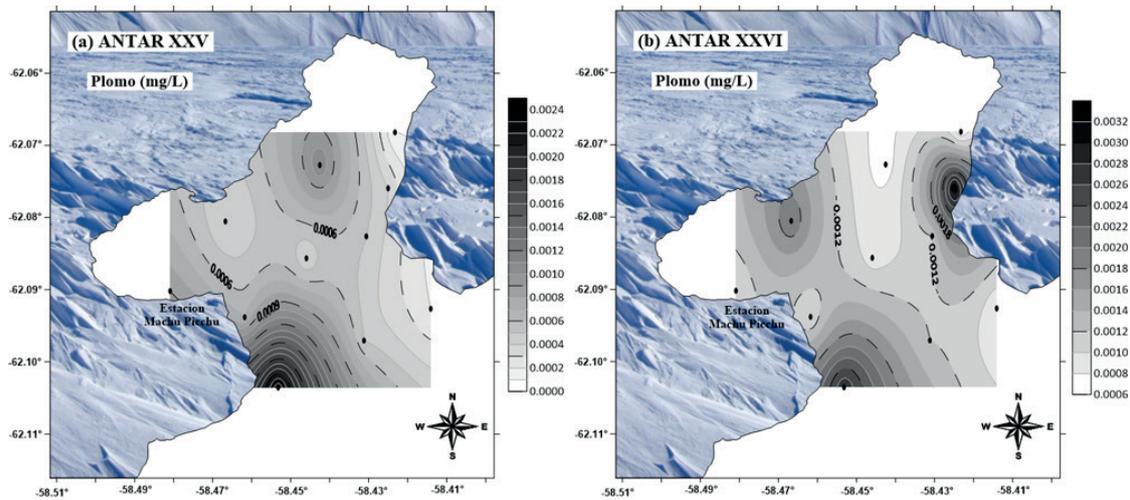


Figura 13. Concentración y dispersión de Plomo en agua: (a) 2018 y (b) 2019

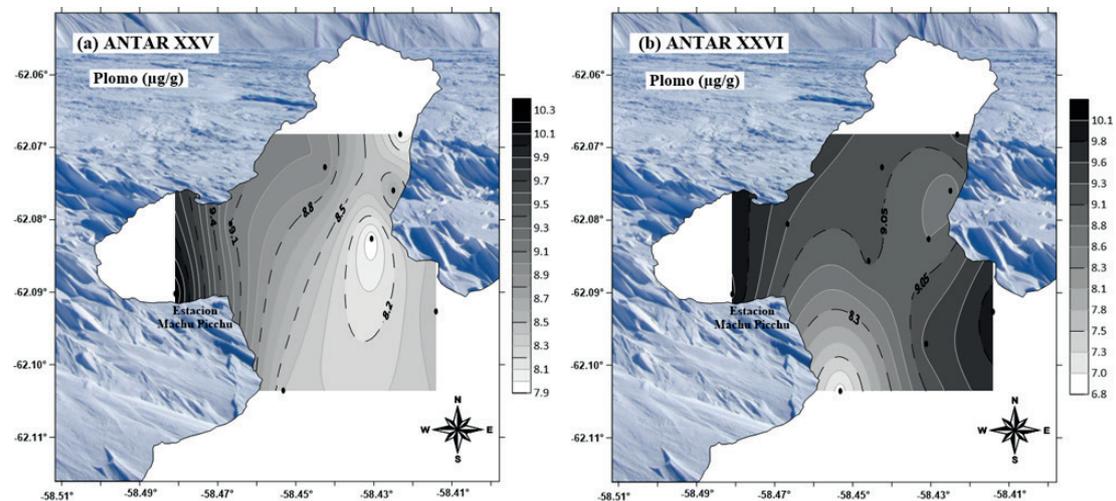


Figura 14. Concentración y dispersión de Plomo en sedimento: (a) 2018 y (b) 2019.

las del 2018, por lo que se desprende que hay un incremento de la concentración de este metal a través del tiempo.

En cuanto a las concentraciones de Cu en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 sí llegaron a superar el ECA ISQG ($18.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Sin embargo, estuvieron por debajo de lo establecido por el ECA PEL ($108 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), por lo que será necesario vigilar que este metal no supere este ECA PEL en el futuro.

Las concentraciones de Zn contenido en aguas marinas superficiales para los años 2018 y 2019 fueron relativamente homogéneas. Asimismo, no estuvieron por encima del valor determinado por la norma ECA ($0.081 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Por otro lado, las concentraciones de Zn contenido en el sedimento marino para los años 2018 y 2019, no lograron superar lo establecido por el estándar ISQG ($124 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) por lo que se deduce que el sedimento marino no

presenta efectos biológicos adversos por este metal. Las concentraciones de Zn contenidos en el sedimento marino en el año 2018 fueron superiores a las del 2019, lo cual indica que hay una disminución de la concentración de este metal a través del tiempo.

Las concentraciones de As presente en aguas marinas superficiales para el año 2019 fueron superiores a las del 2018, por lo que se desprende que hay un incremento significativo de la concentración de este metal a través del tiempo. Sin embargo, estas concentraciones para dichos años no lograron superar el ECA ($0.036 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

En cuanto al contenido de As en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 sí lograron superar lo establecido por el ECA ISQG ($7.24 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Sin embargo, estas concentraciones estuvieron por debajo del ECA PEL ($41.6 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), por lo que se deduce que los sedimentos marinos dentro de la ensenada Mackellar no presentan por ahora un riesgo por contaminación de Arsénico.

El contenido de Pb presentes en el agua marina superficial para los años 2018 y 2019, no lograron superar el ECA (0.0081 mg.L^{-1}). Asimismo, las concentraciones de Pb en agua para el año 2019 fueron superiores a las del 2018 por lo que se desprende que hay un incremento significativo de la concentración de este metal a través del tiempo.

Con respecto a las concentraciones de Pb en matriz sedimento marino para los años 2018 y 2019, no lograron superar el ECA ISQG ($30.2 \mu\text{g.g}^{-1}$) lo cual indica que el sedimento marino de la ensenada Mackellar no presenta efectos biológicos adversos por este metal. Asimismo, las concentraciones de Pb en el año 2018 fueron ligeramente superiores a las del 2019.

Una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio respecto a otros estudios realizados en sedimentos antárticos permite tener un mejor panorama del contenido de estos metales (Zn, Cu y Pb) dentro de la Ensenada Mackellar. En la Tabla 4 se observa los resultados de las concentraciones en sedimento marino registradas por otros autores y las obtenidas en este estudio.

Los niveles de Zinc cuantificados en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 dentro de la Ensenada Mackellar fueron inferiores a los obtenidos en distintos estudios desarrollados en la región Antártica como: Bahía Fildes ($57 \mu\text{g/g}$), Bahía Almirantazgo ($89 \mu\text{g/g}$), Puerto Collins ($69 \mu\text{g/g}$), Bellingshausen ($67 \mu\text{g/g}$) y teniente Marsh ($89,8 \mu\text{g/g}$). Por otra parte, los niveles de Zinc contenidos en el sedimento marino de la ensenada Mackellar en los años 2018 y 2019 fueron superiores a la de otros estudios en dicha región tales como: Potter Cove ($32 \mu\text{g/g}$) y Bahía Almirantazgo ($46 \mu\text{g/g}$).

Del mismo modo los niveles de Cobre cuantificados en el sedimento marino para los años 2018 y 2019 fueron superiores a las determinadas por otros autores en regiones de la Antártica como: Bahía Fildes ($2,93 \mu\text{g/g}$), Puerto Collins ($77 \mu\text{g/g}$), Bellingshausen ($50 \mu\text{g/g}$), teniente Marsh ($61 \mu\text{g/g}$) y Potter Cove ($11 \mu\text{g/g}$). Sin embargo, los niveles de Cobre contenidos en el sedimento marino en los años 2018 y 2019 únicamente fueron inferior a los valores de la Bahía Almirantazgo ($89 \mu\text{g/g}$).

En relación con el Plomo en sedimento, se observó que las concentraciones de este estudio en los años 2018 y 2019 se encuentran por debajo del rango de concentraciones detectadas por otros autores: Bahía Almirantazgo ($10,5 \mu\text{g/g}$), Bellingshausen ($76,1 \mu\text{g/g}$) y teniente Marsh ($85,4 \mu\text{g/g}$). No obstante, los valores de Plomo en sedimento detectados en la Bahía Fildes ($2,93 \mu\text{g/g}$), Puerto Collins ($77 \mu\text{g/g}$) y Potter Cove ($11 \mu\text{g/g}$) estuvieron por debajo de lo determinado en la Ensenada Mackellar para los años 2018 y 2019 (ver Tabla 4).

V. CONCLUSIONES

La cantidad de metales (Cu, As y Pb) contenidos en el agua para el año 2019 fueron superiores a las del 2018 ($p < 0.05$) y con respecto al sedimento marino sólo existió dicha diferencia en el Zn, lo cual apoya la primera hipótesis (Pabón et al., 2020b).

El contenido de Cu, Zn, As y Pb en aguas marinas superficiales determinadas en los años 2018 y 2019 no sobrepasaron los ECA ($p > 0.05$). No obstante, el contenido de Cu y As en sedimento marino determinadas en los años 2018 y 2019 sí superaron los ECA ISQG establecidos por la norma CEQGs ($p < 0.05$), por lo que se afirma parcialmente la segunda hipótesis.

El incremento significativo del contenido de metales en el medio marino (agua y sedimento) a través del tiempo podrían presentar consecuencias negativas para el ecosistema Antártico causando efectos biológicos adversos a futuro si llegasen a sobrepasar los valores determinados por la norma de referencia.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este estudio recibió el apoyo de a la Dirección de Asuntos Antárticos del Ministerio de Relaciones Exteriores del Perú que materializó la Vigésimo quinta y Vigésimo sexta Expedición Científica del Perú a la Antártida (ANTAR XXV y XXVI) e hizo posible el desarrollo del estudio. Se agradece al Instituto del Mar del Perú (IMARPE) – Laboratorio de Contaminación Química y al Área Funcional de Investigación Marino Costera (AFIMC) - IMARPE.

Tabla 4. Comparación de metales en sedimento: Ensenada Mackellar - otras regiones Antárticas ($\mu\text{g/g}$).

Autor	Lugar	Zn	Cu	Pb
Presente estudio	Ensenada Mackellar (2018)	50,3	83,2	8,7
	Ensenada Mackellar (2019)	63,7	83	9,1
(Ocampo Pérez, 2010)	Bahía Fildes	57	2,93	3,09
(Rodrigues dos Santos et al., 2006)	Bahía Almirantazgo	89	92	10,5
(Ahn et al., 1996)	Puerto Collins	69	77	8,7
(Alam & Sadiq, 1993)	Bellingshausen	67	50	76,1
(Alam & Sadiq, 1993)	Teniente Marsh	89,8	61	85,4
(Vodopivec et al., 2001)	Potter Cove	32	11	7
(Giordano et al., 1999)	Bahía Almirantazgo	46	-	3,3

VII. REFERENCIAS

- Ahn, I.-Y. , Lee, S. , Kim, K. , Shim, J. , & Kim, D.-Y. (1996). Baseline heavy metal concentrations in the Antarctic clam, *Laternula elliptica* in Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin* , 32(8–9), 592–598. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00247-K](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00247-K)
- Alam, I. A. , & Sadiq, M. (1993). Metal concentrations in Antarctic sediment samples collected during the Trans-Antarctica 1990 expedition. *Marine Pollution Bulletin* , 26(9), 523–527. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90472-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90472-V)
- Bose, S. K., & Chakraborty, U. C. (1957). Resolutions Adopted at the General Session of the VIII All India Pediatric Conference at Vellore on the 21st December, 1956. *The Indian Journal of Pediatrics* , 24, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Enamorado-Montes, G., Tirado-Montoya, J., & Marrugo-Negrete, J. (2022). Metales pesados (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) en un trayecto del río Cauca impactado por la minería de oro. *Revista EIA*, 19(37), 37005 pp. 1–15. <https://doi.org/10.24050/REIA.V19I37.1481>
- Giordano, R., Lombardi, G., Ciarallia, L., Beccaloni, E., Sepe, A., Ciprotti, M., & Costantini, S. (1999). Major and trace elements in sediments from Terra Nova Bay, Antarctica. *Science of The Total Environment*, 227(1), 29–40. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00402-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00402-1)
- IMARPE. (2022). *Oceanografía Química y Geología Marina*. Unidad de Investigación En Oceanografía Química y Geología Marina. Instituto Del Mar Del Perú. http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=I0108020000000000000000
- Jazdzewski K, Jurasz W, Kittel W, Pressler E, Pressler P, & Sicinski J. (1986). Abundance and biomass estimates of the benthic fauna in Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands. *Polar Biology* , 6, 5–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00446235>
- Laino-Guanes, R. M., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Jiménez-Otárola, F., & Musálem-Castillejos, K. (2015). Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VI(4), 61–74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353543299004>
- Lenihan, H. S., Oliver, J. S., Oakden, J. M., & Stephenson, M. D. (1990). Intense and localized benthic marine pollution around McMurdo Station, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin* , 21(9), 422–430. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X\(90\)90761-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X(90)90761-V)
- Ocampo Pérez, N. V. (2010). *Estudio de metales pesados (Fe, Mn, Zn, Pb, Ni y Cu) en sedimentos marinos costeros, algas intermareales y organismos de Nacella concinna en Bahía Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Chilena* [Tesis para optar al Título de Biólogo Marino, Universidad de Magallanes]. <http://antarticarepositorio.umag.cl/handle/20.500.11894/133>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020a). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020b). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Rodrigues dos Santos, I., Vieira Silva-Filho, E., Schaefer, C., Sella, S. M., Silva, C. A., Gomes, V., de A.C.R. Passos, M. J., & Ngan, P. (2006). Baseline mercury and zinc concentrations in terrestrial and coastal organisms of Admiralty Bay, Antarctica. *Environmental Pollution* , 140(2), 304–311. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.07.007>
- SINIA. (2017, June 7). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- Suttie, E. D., & Wolff, E. W. (1992). Seasonal input of heavy metals to Antarctic snow. *Tellus B*, 44(4), 351–357. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0889.1992.00012.X>
- Vodopivec, C., Marcovecchio, J., & Smichowski, P. (2001). Trace metals monitoring as a tool for characterization of Antarctic ecosystems and environmental management. The Argentine programme at Jubany Station. *Environmental Contamination in Antarctica A Challenge to Analytical Chemistry*, 155–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008043199-4/50007-1>

Contribución de autoría

Conceptualización, Software: (Jonathan Delio Alfaro Jaucha)

Curación de datos, Análisis formal, Validación, Visualización, Redacción - borrador original: (Jonathan Delio Alfaro Jaucha, Carlos Alberto Martínez Gamboa)

Adquisición de fondos, Recursos: (Rita Orozco Moreyra)

Investigación: (Jonathan Delio Alfaro Jaucha, Carlos Alberto Martínez Gamboa, Rita Orozco Moreyra)

Metodología: (Jonathan Delio Alfaro Jaucha, Carlos Alberto Martínez Gamboa, Jorge Tam Málaga)

Administración del proyecto: (Jonathan Delio Alfaro Jaucha, Rita Orozco Moreyra)

Supervisión, Redacción - revisión y edición: (Jorge Tam Málaga)