

**Revisión del estado del arte de la calidad de los sedimentos marinos en la bahía
de Cartagena a través del prisma normativo internacional**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental

**Juan David Viana Rua
Estudiante**

**Asesora
Luz Bibiana Moscoso Marín
Ingeniera forestal**

**Unilasallista Corporación Universitaria
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Caldas, Antioquia
2024**

Tabla de Contenido

Resumen	7
Introducción	8
Objetivos	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos	10
Justificación	11
MARCO REFERENCIAL	12
Marco Contextual	12
Marco Legal	16
Marco Conceptual	19
Marco Teórico	24
Metodología	39
Fase Uno	39
Fase Dos	45
Fase Tres	48
Resultados Obtenidos	52
Mercurio (Hg)	55
Análisis Estadístico	55
Análisis Normativo	57
Cadmio (Cd)	59
Análisis Estadístico	60
Análisis Normativo	61
Arsénico (As)	63
Análisis Estadístico	63
Análisis Normativo	64
Níquel (Ni)	65
Análisis Estadístico	66
Análisis Normativo	67
Plomo (Pb)	70
Análisis Estadístico	71
Análisis Normativo	72
Cromo (Cr)	74
Análisis Estadístico	74
Análisis Normativo	75
Cobre (Cu)	77
Análisis Estadístico	78
Análisis Normativo	79
Zinc (Zn)	82
Análisis Estadístico	82
Análisis Normativo	84
Síntesis De Resultados	86
Discusión De Resultados	88

Conclusiones Y Recomendaciones	89
Referencias	91

Lista de tablas

Tabla 1	Normatividad internacional con referencia a la calidad de sedimentos marinos.	16
Tabla 2	Relación de los parámetros fisicoquímicos que se deben medir para caracterizar sedimentos marinos.	24
Tabla 3	Resumen de los componentes DPSIR aplicados a la Bahía de Cartagena.	31
Tabla 4	Información principal de los proyectos seleccionados para la investigación	39
Tabla 5	Características principales de las estaciones analizadas.....	40
Tabla 6	Normatividad internacional seleccionada para el análisis de los resultados.	49
Tabla 7	Resultados de la caracterización de sedimentos en los proyectos seleccionados.	52

Lista de figuras

Figura 1	Ubicación geográfica Bahía de Cartagena.....	13
Figura 2	Mapa del área de estudio, ubicación puntos de muestreo y usos del suelo.	26
Figura 3	Aproximación a la condición regional de la calidad del agua y de los sedimentos para el medio marino-costero.	28
Figura 4	Concentraciones de metales pesados en los sedimentos de la Bahía de Cartagena -Promedios mensuales 2014-2015.....	30
Figura 5	Distribución de Carbonatos (%) en la Bahía de Cartagena.....	33
Figura 6	Distribución de Carbono orgánico (%) en la Bahía de Cartagena.....	34
Figura 7	Composición granulométrica de arcillas y limos en la Bahía de Cartagena.	35
Figura 8	Metales totales en sedimentos marinos/estuarinos medidos entre 2014 y 2020 en el departamento de Bolívar	37
Figura 9	Ubicación estaciones de muestreo sedimentos marinos.....	44
Figura 10	Concentraciones de Mercurio en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena	56
Figura 11	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Mercurio (Hg)	58
Figura 12	Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Mercurio (Hg)	59
Figura 13	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cadmio (Cd).....	62
Figura 14	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Arsénico (As).....	65
Figura 15	Concentraciones de Níquel en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena	67

Figura 16	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Níquel (Ni)	68
Figura 17	Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Níquel (Ni)	70
Figura 18	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Plomo (Pb)	73
Figura 19	Concentraciones de Cromo en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena	75
Figura 20	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cromo (Cr)	76
Figura 21	Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Cromo (Cr)	77
Figura 22	Concentraciones de Cobre en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena	79
Figura 23	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cobre (Cr)	80
Figura 24	Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Cobre (Cr)	81
Figura 25	Concentraciones de Zinc en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena	83
Figura 26	Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Zinc (Zn).....	85
Figura 27	Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Zinc (Zn).....	86

Resumen

La Bahía de Cartagena, ubicada en el Caribe colombiano, es considerada como un depósito de ambiente sedimentario moderno, a lo largo de su historia ha sufrido procesos de contaminación por actividades antrópicas y la influencia directa del Canal del Dique. El objetivo principal de la presente investigación es conocer a través del estado del arte la calidad de sedimentos marinos en función de la concentración de metales en la Bahía de Cartagena, así como su grado de contaminación y posibles afectaciones a la vida marina a la luz de la normatividad internacional. Se realizó una revisión de cuatro proyectos desarrollados en la zona de estudio, obteniendo así la caracterización de metales en las estaciones de monitoreo ubicadas en la bahía de Cartagena. Las concentraciones fueron analizadas mediante la identificación de patrones en el sector Sur y Norte de la bahía. Luego fueron comparados con los valores de referencia establecidos por las directrices españolas (enfoque 1) y la norma canadiense (enfoque 2). Se ha encontrado que el sector Norte presenta concentraciones mayores de Cromo y Zinc, mientras que el sector Sur presenta concentraciones más altas de Níquel y Cobre. Con respecto a la norma internacional, los metales Mercurio, Níquel y Cobre presentaron mayor porcentaje de estaciones que sobrepasan los límites de referencia.

Introducción

En las últimas décadas, se ha incrementado la atención hacia el constante deterioro que han tenido los ecosistemas costeros debido a sus influencias antrópicas, las cuales van ligadas fuertemente al crecimiento económico de una comunidad en donde se hace indispensable el uso de los diferentes servicios ecosistémicos que ofrece la costa Caribe y todos sus componentes. Para la presente investigación, se va a tener como foco principal el análisis de la calidad de los sedimentos del lecho marino, los cuales sirven como reservorio de todos los contaminantes que han tenido interacción con el cuerpo acuático a lo largo del tiempo.

La presencia de sedimentos contaminados en ambientes acuáticos ya sea en aguas continentales o en aguas marinas, es un fenómeno ampliamente reconocido a nivel global, aún más a partir de la segunda mitad del siglo XX. La existencia de estos sedimentos se debe tanto a los vertidos incontrolados desde industrias como a vertimientos del sector doméstico o plaguicidas provenientes del sector agrícola (González, Méndez, López, et al., 2006). Por tal motivo, el conocimiento de las propiedades y composición de los sedimentos de fondo permite evaluar la condición de los ambientes marinos y reconocer eventuales perturbaciones derivadas de la acumulación de sustancias antrópicas y naturales que puedan constituir riesgos para la salud del ecosistema (Valdés & Castillo, 2014).

La Bahía de Cartagena está ubicada en el noroeste de Suramérica, en el Mar Caribe, está conformada por la bahía interna; ubicada al norte y la bahía principal o externa, conectada al Mar Caribe por los estrechos de Bocachica y Bocagrande. La bahía

ha sido considerada un depósito de ambiente sedimentario moderno, influenciado por procesos continentales de tipo fluvial (Canal del Dique) y oceánicos (energía del oleaje, mareas y deriva litoral del Mar Caribe) (Franco, Restrepo, Sanabria, et al., 2013).

El crecimiento no planificado de los asentamientos humanos en las zonas costeras tiene una relación directa con el aumento de la presión y el deterioro ambiental en estas áreas del país, esto va de la mano con la explotación excesiva de los recursos naturales y la generación de desechos resultantes de las actividades humanas. Lo anterior se refleja en un incremento de la contaminación marino-costera, lo que conlleva a la pérdida y disminución de los recursos ecosistémicos que son indispensables para las comunidades costeras. Las fuentes de contaminación de la bahía de Cartagena provienen principalmente de vertimientos de aguas residuales de carácter municipal, industrial y agrícola, así mismo como vertimientos de residuos oleosos de la actividad marítima, portuaria, y petrolera (Rendón, Agudelo, Hernández, et al., 2010).

Objetivos

Objetivo General

Establecer a través del estado del arte la calidad de los sedimentos marinos en función de las concentraciones de metales en la bahía de Cartagena, con el fin de conocer su grado de contaminación y su potencialidad de afectación a la vida marina acorde con las regulaciones normativas.

Objetivos Específicos

Identificar patrones en la concentración de metales en sedimentos en la Bahía de Cartagena de acuerdo con la información secundaria revisada y presentar su medida de tendencia central y dispersión.

Analizar las concentraciones de metales en los sedimentos marinos en función de su grado de contaminación a la luz de las regulaciones normativas.

Analizar las concentraciones de metales en los sedimentos marinos en función de su afectación a la vida marina a la luz de las regulaciones normativas.

Identificar aspectos que permitan profundización en el análisis de los sedimentos marinos en la Bahía de Cartagena.

Justificación

El análisis de los sedimentos del lecho marino es un componente fundamental para todos los estudios relacionados con actividades marítimas en general, debido a que estos reflejan la calidad del agua con respecto a los últimos años. El impacto social radica en que la revisión de datos detallados sobre la calidad de los sedimentos puede ayudar a la construcción de políticas y prácticas que lleven a cabo una gestión sostenible de los recursos marinos, asegurando su conservación a largo plazo y el uso responsable de estos recursos. Un entendimiento más profundo de la calidad de los sedimentos podría influir en las decisiones relacionadas con actividades económicas como la pesca, el turismo y las actividades industriales que se den en la zona de estudio.

Esto podrá promover un impacto positivo en el desarrollo económico local, generando oportunidades y mejorando la calidad de vida de las comunidades costeras que, en este caso, beneficiaría positivamente a la comunidad que se encuentra en la bahía de Cartagena y tiene una dependencia económica de las actividades que se desarrollan en la misma.

Por tal motivo, es fundamental promover la sostenibilidad de las actividades antrópicas que tengan una relación directa con los ecosistemas marino-costeros. Es fundamental la revisión del estado actual de la Bahía de Cartagena y su relevancia para la economía local y nacional, en esto radica la importancia de generar políticas públicas que regulen este tipo de actividades y se establezcan valores de referencia para los contaminantes en el lecho marino, esto con el fin de poder hacer un seguimiento integral de las condiciones de la Bahía de Cartagena.

Marco Referencial

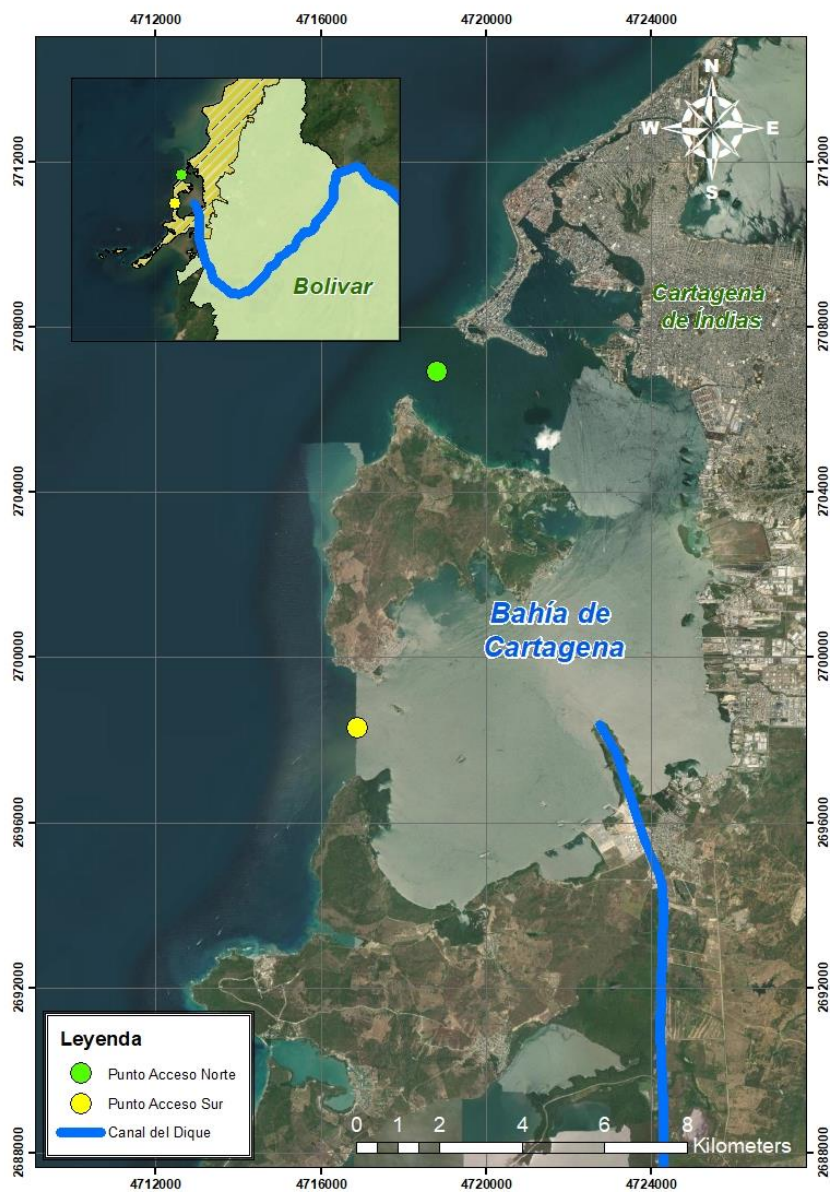
Marco Contextual

La bahía de Cartagena se encuentra ubicada en la costa norte de Suramérica, en el suroeste, mar Caribe colombiano, departamento de Bolívar, entre las coordenadas 10° 26' a 10° 16' N y 75° 30' a 75° 36' O. La bahía posee una superficie de 82 Km² y una profundidad promedio de 16 m, consta de dos partes: la bahía externa e interna. La primera está conectada con el mar Caribe a través de dos puntos de acceso (Bocachica y Bocagrande), mientras que la segunda se ubica en la parte norte y no tiene intercomunicación directa con el mar (Catalán, Mancebo, Hernández, et al., 2020).

A continuación, en la Figura 1 se muestra la ubicación geográfica de la Bahía de Cartagena y el Canal del Dique.

Figura 1

Ubicación geográfica Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Al sur de la bahía se encuentra la desembocadura del Canal del Dique. Esta es una descarga fluvial artificial construida en el siglo XVII que conecta el río Magdalena

con la ciudad de Cartagena, que para la época mejoraba el transporte y comercio a través del Reino de la Nueva Granada (Molares & Mestres, 2012). El Canal del Dique se puede considerar como una de las principales influencias hidrológicas, en donde se da un aporte significativo de sedimentos provenientes del río Magdalena y otros contaminantes presentes en las aguas.

En la costa, el Canal del Dique transfiere a la bahía de Cartagena las aguas dulces que fluyen a través del río Magdalena desde su nacimiento en las montañas andinas, estas aguas traen consigo los sedimentos arrastrados de los terrenos de la cuenca del Magdalena, la cual cubre un área de 260000 km². El Canal del Dique transporta 10 millones de metros cúbicos de sedimentos al año, de los cuales 24 % llegan a la Bahía de Cartagena (Salcedo, Quintana, López, et al., 2013) y es considerado como la arteria fluvial más importante del país. Consecuentemente, la cantidad de sedimentos descargada en el mar a través del Canal del Dique es significativa, este flujo varía en las temporadas de lluvia y sequía, pero en promedio cerca de 2000 toneladas de sedimentos son descargadas del canal a la bahía de Cartagena diariamente (Tosic, 2017).

Consideremos ahora que la Bahía de Cartagena ha sido un lugar fundamental para el desarrollo de las comunidades que están relacionadas directamente con la misma. Históricamente, el proceso de ocupación de la superficie de la bahía está marcado por tres momentos fundamentales los cuales le dan una identidad al territorio, según Sarasa (1989), estos momentos son: construcción del arsenal militar (segunda mitad del siglo XVIII); construcción del puerto comercial (segunda mitad del siglo XIX) y la construcción de las complejas instalaciones de la industria petroquímica (segunda

mitad del siglo XX). Al identificarse a lo largo de los años como una comunidad portuaria, el desarrollo económico y la expansión urbana han sido un factor importante para la proliferación de impactos ambientales negativos en el ecosistema marino.

Según la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA (2021), en el reporte de análisis regional de la Bahía de Cartagena y el Canal del Dique, se establece que para el año 2021, en el área de estudio se encuentran un total de 69 proyectos activos en estado de seguimiento ambiental. Estos proyectos activos tienen una predominancia del sector infraestructura, principalmente con proyectos de puertos (42,03%); seguido por el sector de hidrocarburos (24,64%); en tercer lugar, el sector de agroquímicos con plantas y plaguicidas de uso agrícola (15,94%); en cuarto lugar los proyectos de generación y transmisión de energía (13,04 %), en quinto lugar el sector de minería de materiales de construcción (2,9%) y finalmente un proyecto especial (1,4%) correspondiente a un zoo criadero. Específicamente en la Bahía de Cartagena, predominan los proyectos de infraestructura (puertos) e hidrocarburos.

En efecto, teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que la Bahía de Cartagena operan unas actividades económicas con un potencial de impactos negativos para el ambiente costero y, así mismo, hacia los sedimentos marinos y la vida acuática. También resulta pertinente mencionar que la Bahía de Cartagena también recibe vertimientos de aguas residuales domésticas y no domésticas, así como desastres ambientales que ha tenido a lo largo de su historia, este es el punto de partida para comprender la importancia de la evaluación del gran reservorio de contaminantes como lo es el lecho marino en la zona de estudio.

Marco Legal

Ahora bien, teniendo en cuenta la normatividad en Colombia y su relación con respecto al componente marino, se puede decir que hasta la fecha no existe una regulación normativa referente a la calidad de los sedimentos marinos superficiales o de profundidad. No obstante, se va a realizar una revisión a nivel internacional sobre normas que establezcan valores de referencia y límites permisibles aplicables al control de la contaminación marina que está influenciada directamente con la calidad de los sedimentos marinos.

A continuación, en la Tabla 1 se relacionan las normas internacionales más relevantes que establecen valores de referencia para la calidad de sedimentos marítimos.

Tabla 1

Normatividad internacional con referencia a la calidad de sedimentos marinos.

Nombre	Año	Entidad	Descripción
Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre	2021	Comisión Interministerial de Estrategias Marinas, 2021. España	“Las presentes Directrices tienen por objeto el establecimiento de las condiciones aplicables para regular las operaciones de dragado y la reubicación de los materiales dragados en las aguas del dominio público marítimo-terrestre”. Esta normatividad establece unos niveles de acción (A, B y C) para la disposición del material a dragar en el fondo marino, especialmente enfocada en actividades portuarias y costeras. También se establece un umbral de sedimento no peligroso por cada contaminante de interés, especialmente metales pesados e hidrocarburos y sus derivados.

Nombre	Año	Entidad	Descripción
Sediment Quality Guidelines for the protection of aquatic life freshwater and marine	1999	Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada. 1999	Los límites canadienses están basados en información científica toxicológica disponible para el parámetro de interés. Los valores guías se encuentran destinados a proteger todas las formas de vida acuáticas y todos los aspectos del ciclo de vida, incluyendo los estadios más sensibles para las especies más sensibles en una exposición a largo plazo (Serman & Asociados S.A. (s.f.)). Se evalúan dos (2) condiciones: el Nivel de efecto umbral (TEL por sus siglas en inglés) adoptados como el estándar intermedio de la calidad del sedimento (ISQG por sus siglas en inglés) y el segundo es el Nivel de Efecto probable (PEL por sus siglas en inglés), el cual representa que con frecuencia pueden presentarse efectos biológicos adversos;
Screening Quick Reference Tables	1999	NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), Estados Unidos.	Esta organización estableció unas tablas de referencia conocidas con el nombre de SQuiRTs (del inglés Screening Quick Reference Table), la cual establece concentraciones para contaminantes orgánicos e inorgánicos en diferentes ambientes, especialmente los costeros. Se presentan niveles de referencia y concentraciones máximas de los contaminantes para sedimentos marinos y de agua dulce, que determinan las afectaciones al ecosistema costero.
Test de toxicidad química (CTT)	2004	Netherlands Government Gazette, Holanda.	Esta normativa surge como una necesidad de establecer valores de referencia (Meta, límite, referencia, intervención, señal) para los diferentes contaminantes presentes en los sedimentos marinos, sirve principalmente para evaluar y decidir sobre la disposición de material dragado, se analizan variable químicas y biológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se puede evidenciar que las directrices españolas y la normatividad holandesa se enfocan principalmente en la clasificación y acciones a implementar para el material dragado, esto en el contexto de las actividades portuarias y el dragado de mantenimiento para el transporte marítimo. Lo anterior se fundamenta en que estas actividades generan una resuspensión de sedimentos y podrían tener posibles afectaciones al ambiente.

De igual modo, las normas canadiense y estadounidense establecen valores límites que podría tener afectaciones en la vida marina, como organismos bentónicos o peces que se encuentran expuestos a los contaminantes depositados en el lecho marino.

Ahora bien, teniendo en cuenta el marco institucional, la Bahía de Cartagena en términos político-administrativos se encuentra bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), y en términos del sector marítimo la autoridad es la Dirección General Marítima (DIMAR).

Marco Conceptual

Sedimentos Marinos

Los sedimentos marinos constituyen más de dos tercios de la superficie de la tierra, se consideran como el mayor reservorio de materia orgánica en el planeta (Baker, Appler & Gong, 2021). Estos sedimentos se pueden reconocer como el reservorio más grande de los contaminantes producidos en las aguas superficiales transportados al mar por los sistemas hídricos, también de aquellas introducidas directamente al mar por procesos naturales y antrópicos, entre estas sustancias se encuentran los compuestos orgánicos persistentes, nutrientes, combustibles, patógenos, metales pesados, entre otros. Estos últimos han sido los más estudiados pues se asocian a diversas actividades industriales, aun cuando todos ellos se encuentran presentes en forma natural en los ambientes marinos (Valdés, 2014).

Material de Dragado

Los materiales de dragado, y en concreto los procedentes de los fondos portuarios, tienen su origen en la creación y mantenimiento de infraestructuras para el transporte marítimo. Los desarrollos tecnológicos y la necesidad de disminuir costes han influido en la construcción de barcos más grandes y eficientes, que han llevado aparejada la prolongación y profundización de los canales de navegación, dársenas, muelles y zonas de maniobras con objeto de disponer de accesos e instalaciones adecuados en las áreas portuarias. Las operaciones de dragado incluyen tres etapas bien diferenciadas: extracción, transporte y vertido (CEDEX, 2013).

Existen diversas investigaciones que mencionan que las actividades de dragado necesarias para poder mantener un calado adecuado de los canales de navegación en los puertos generan importantes impactos ambientales en los ecosistemas costeros, al provocar, modificaciones de los patrones locales de circulación, transporte de material suspendido y cambios en las condiciones ambientales del agua y de los sedimentos del fondo marino (García, 2016).

Actividades Portuarias

Las actividades portuarias se refieren a las operaciones y servicios relacionados con el uso de los puertos, que incluyen la carga, descarga y almacenamiento de mercancías, así como la gestión de buques y pasajeros. Estas actividades también pueden abarcar la prestación de servicios relacionados y la planificación de mejoras en las instalaciones portuarias para facilitar el tráfico de mercancías y pasajeros, así como el desarrollo económico de las regiones portuarias.

Metales Pesados

El término de metales pesados refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), Cobre (Cu), plomo (Pb), entre otros. Los sedimentos marinos actúan como integradores y concentradores de metales pesados dependiendo de la forma química y física de cada metal, estos pueden movilizarse y ser atrapados a través de las membranas biológicas de las diferentes especies marinas (González, 2006). El conocimiento de la distribución de los metales pesados en los

sedimentos marinos es importante debido a que éstos son sumideros de sustancias de origen natural y antrópicas, mismas que se preservan en las partículas de los sedimentos o son recicladas a hacia la columna de agua (Gutiérrez, Casas, Muñoz, et al., 2007).

Ecosistemas marino-costeros

El mar, como la tierra, es heterogéneo y presenta varios tipos de ecosistemas. Los marinos se clasifican relacionándolos con las zonas de vida, por ejemplo, los pelágicos, asociados a las masas de agua, y bentónicos, asociados a los fondos marinos, con los biotopos (de fondos y litorales arenosos, rocosos, etc.) o con las biocenosis características, tales como ecosistemas de arrecifes de coral, de manglares o estuarios (Lara, 2008). Cada uno cumple su función específica en el ambiente marino y es muy importante su protección frente a las actividades económicas que se llevan a cabo en la costa, como por ejemplo el transporte marítimo, vertimientos, actividades portuarias, entre otras.

Contaminación Marina

La contaminación marítima consiste en la introducción de cualquier tipo de sustancia nociva en un ecosistema determina, y que es el resultado del impacto ambiental generado por las actividades económicas desarrolladas, la contaminación más común derivados de las actividades antrópicas son los plaguicidas, herbicidas, fertilizantes químicos, hidrocarburos, plásticos, etc. Estos contaminantes se acumulan, en las profundidades del océano que son ingeridos por organismos marinos y por lo tanto luego se introducen en la cadena alimentaria (Londoño, 2017).

Límite de Cuantificación

En el marco de la caracterización fisicoquímica de sedimentos marinos, los laboratorios utilizan un método analítico para la determinación de las concentraciones de cada contaminante en una muestra determinada, los valores que estén por debajo del límite de cuantificación representan una concentración nula o mínima del contaminante en la muestra de sedimentos marinos.

Bioacumulación

La bioacumulación se refiere a la acumulación de un contaminante en un organismo desde cualquier fuente de exposición incluyendo aire, agua y alimento (Carriquiriborde, 2021), cada organismo puede acumular el contaminante a medida que se lleva a cabo la red trófica en un ecosistema.

Biomagnificación

La biomagnificación se puede entender no desde la funcionalidad de la red trófica, sino de los niveles tróficos en un ecosistema, debido a que entre más alto es el nivel (como los depredadores) mayores concentraciones de un contaminante van a tener, puede definirse como el incremento de la concentración de un contaminante de un nivel trófico a otro (Carriquiriborde, 2021).

Rango Intercuartílico (IQR)

El rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés) es una herramienta útil en estadística descriptiva para evaluar la dispersión de un conjunto de datos y para identificar posibles valores atípicos, proporcionando una medida robusta y menos

sensible a los valores extremos. Específicamente, el IQR mide la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1) de un conjunto de datos.

Mediana

La mediana representa el valor central de los datos cuando están ordenados, dividiendo el conjunto en dos partes iguales.

DIMAR

La Dirección General Marítima (Dimar), es la Autoridad Marítima Colombiana encargada de ejecutar la política del gobierno en esta materia, contando con una estructura que contribuye al fortalecimiento del poder marítimo nacional

INVEMAR

El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" -Invemar- es una entidad que se encarga de realizar investigaciones aplicadas a los recursos naturales renovables y medio ambiente en el componente marino de Colombia.

CARDIQUE

Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique.

NOAA

Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica.

Marco Teórico

Ahora bien, teniendo en cuenta que en Colombia no se encuentra una regulación normativa vigente que regule la calidad de sedimentos marinos, resulta pertinente resaltar que en Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (2015), establecen una lista de parámetros a monitorear con respecto a los sedimentos marinos para la caracterización del componente oceanográfico en un Estudio de Impacto ambiental (EIA), cabe resaltar que solo se solicita el monitoreo de ciertos contaminantes sin establecer valores de referencia o límites permisibles. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los parámetros de interés según las entidades ambientales nacionales.

Tabla 2

Relación de los parámetros fisicoquímicos que se deben medir para caracterizar sedimentos marinos.

Componente Sedimentos Marinos	Parámetros de interés
Caracterización física	Temperatura (°C).
	Potencial de Hidrógeno - pH (unidades de pH).
Caracterización química	Grasas v aceites (mq/L).
	Metales y Metaloides (Arsénico, Bario, Cadmio, Cinc, Cromo, Cobre, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio) (mq/L).
	Hidrocarburos Totales (mq/L).
	Fenoles (mg/L).
	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (mg/L HAP).
	Carbono Orgánico Total (mg/L COT).
	Sulfuro Acido Volátil (mg/L s ⁻²).
	Fósforo Total (mg/L).
Nitrógeno Total (mq/L).	

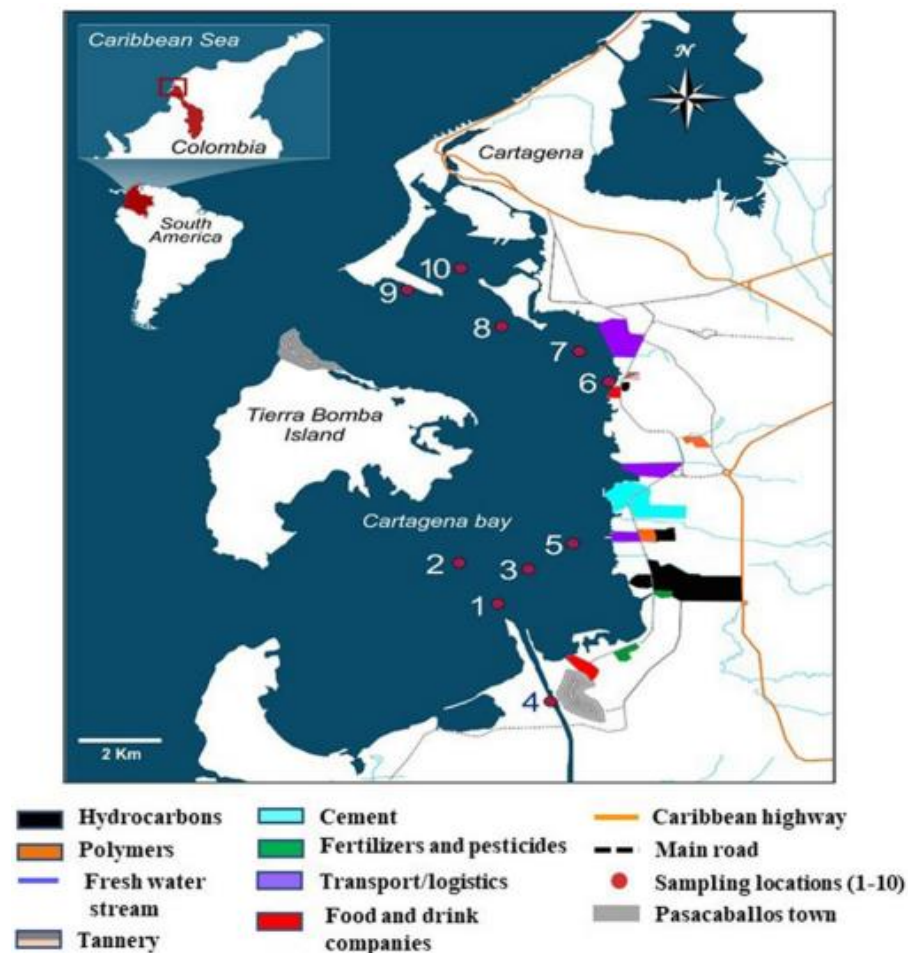
Fuente: ANLA & MADS, 2015.

Esta sección brindará una crítica exhaustiva de las publicaciones pertinentes que han discutido el tema central de esta investigación. Se explorarán investigaciones anteriores de áreas relacionadas, investigaciones de la contaminación marina, ecología de ecosistemas costeros y cualquier otro trabajo que arroje luz sobre los procesos que influyen en la calidad de los sedimentos en la bahía de Cartagena.

Avanzando en nuestro razonamiento, se procederá a revisar la investigación realizada por Duarte, Noguera & Butryn (2020) en donde se llevó a cabo un análisis de la distribución espacial de pesticidas, contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados en la Bahía de Cartagena. Principalmente se ejecutó una toma de muestras en diez (10) puntos distribuidos en la Bahía (Figura 2), en donde se realizó un análisis de los resultados haciendo una comparación con la normatividad internacional establecida por la entidad NOAA (Screening Quick Reference Tables).

Figura 2

Mapa del área de estudio, ubicación puntos de muestreo y usos del suelo.



Fuente: Duarte et al., 2020.

Ahora bien, después de realizar el análisis de resultados, se encontró que los pesticidas, Bifenilos Policlorados y Éteres de Polibromodifenilos presentaron valores con rangos en peso seco entre 0,83–33,67 ng/g, 0,05–0,34 ng/g, y 0,06–19,58 ng/g, respectivamente. Estos valores se encuentran por debajo de los estándares de referencia establecidos en las Screening Quick Reference Tables (PEL y TEL), así

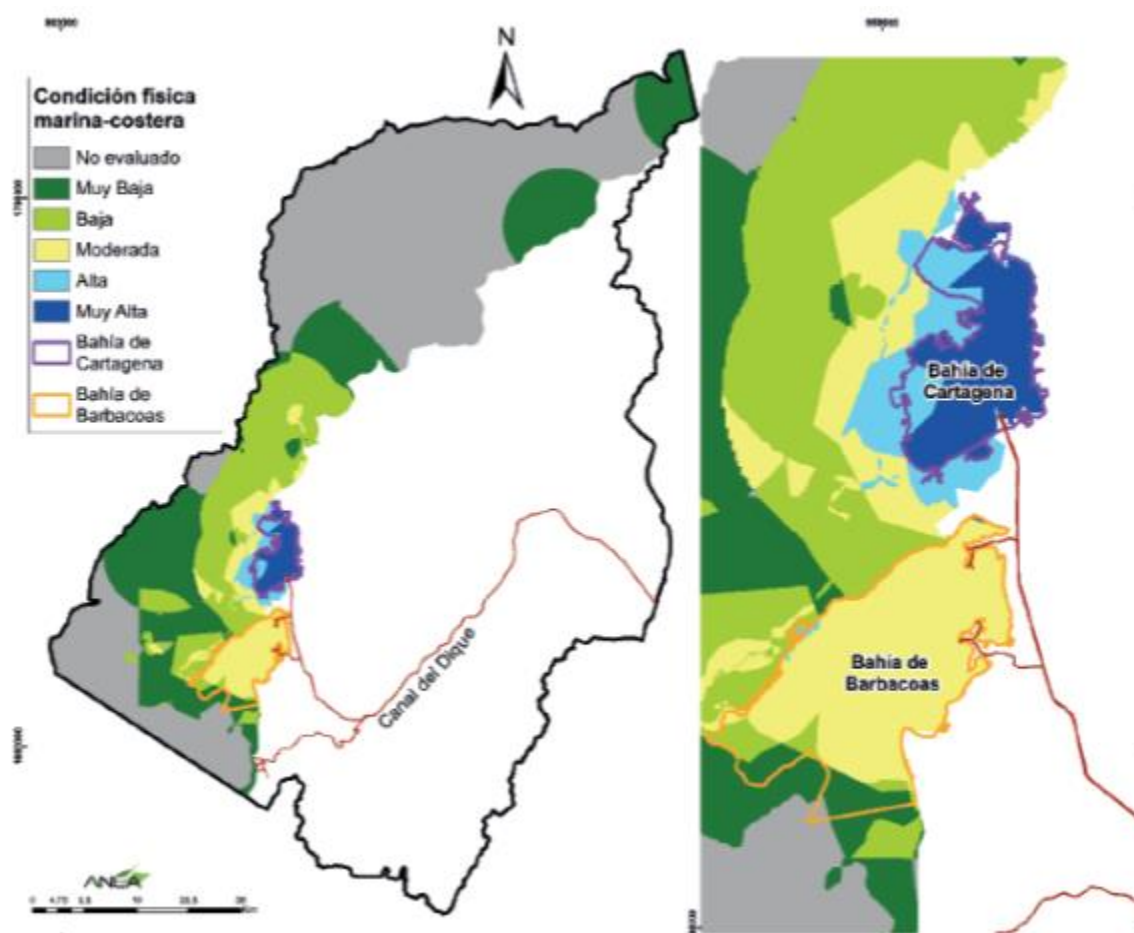
mismo, se hace la salvedad de que, aunque son compuestos prohibidos en Colombia, siguen siendo un contaminante persistente que posiblemente pueda tener efectos sobre la vida acuática y la salud humana.

En cuanto a los metales pesados (Pb 37,1 mg/kg, Cr 137,2 mg/kg, Cd 1,7 mg/kg, Cu 64,4 mg/kg, As 13,1 mg/kg, Sr 318,9 mg/kg), se puede decir que fueron detectados principalmente en la estación S6, la cual se encuentra cerca de industrias de hidrocarburos, los metales presentaron valores por encima del umbral TEL, lo cual representa un potencial riesgo para la vida marina.

Hay que mencionar, además, que la ANLA (2021) presentó el reporte de análisis regional de la Bahía de Cartagena y el Canal del Dique, en el cual se hizo una revisión del estado actual del área de estudio en su componente socioeconómico y ambiental. En el estudio mencionado anteriormente se realizó una observación espacial sobre las presiones antrópicas que permiten identificar las áreas donde existen presiones que inciden en el estado actual del componente calidad del agua y sedimentos para el área marino-costera (Figura 3).

Figura 3

Aproximación a la condición regional de la calidad del agua y de los sedimentos para el medio marino-costero.



Fuente: ANLA, 2021.

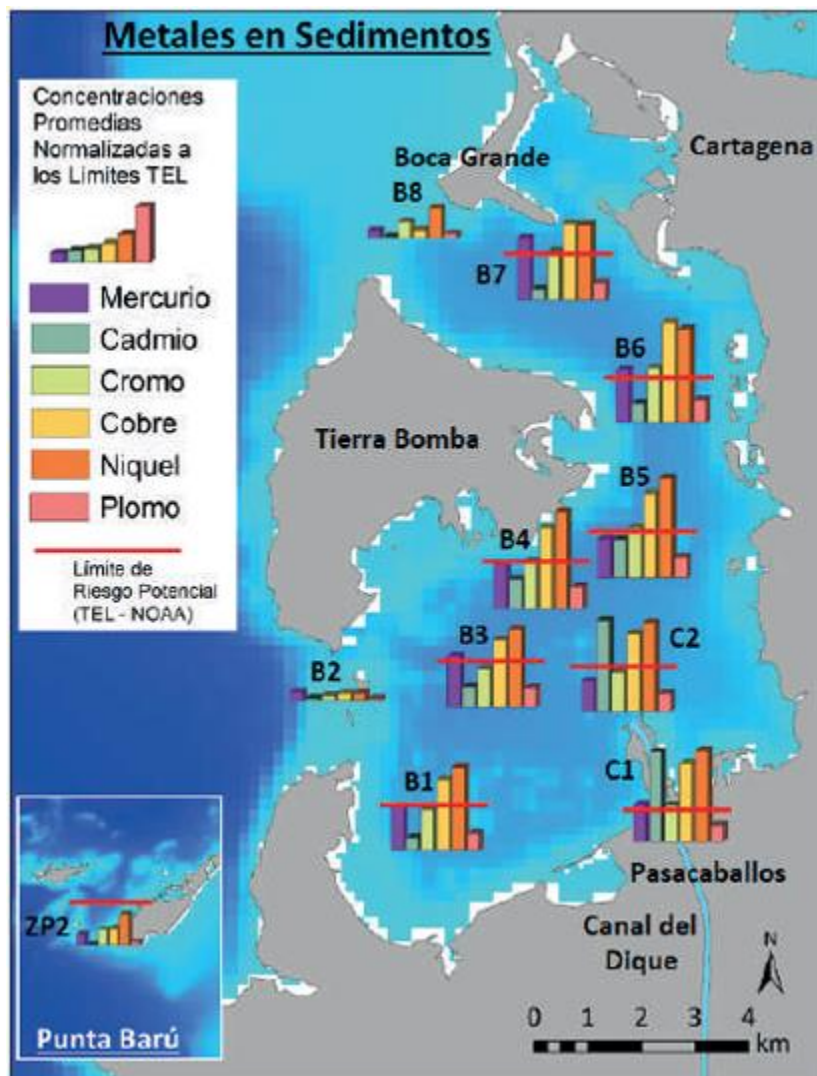
Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que la Bahía de Cartagena presenta área con “Muy Altas” presiones antrópicas sobre el recurso hídrico por residuos sólidos domésticos, vertimientos de aguas residuales y escorrentías urbanas, descargas del Canal del Dique, nutrientes, agroquímicos, materia orgánica, metales pesados, micro

plásticos, entre otras sustancias que alteran la calidad del agua de la bahía. Según la revisión efectuada por la ANLA, varios estudios han informado que las zonas industriales, comerciales, turísticas, marítimas y residenciales de la ciudad ejercen una gran influencia en la calidad del agua y de los sedimentos de la Bahía de Cartagena, debido a la gran cantidad de contaminantes.

En el estudio anteriormente mencionado, se recurre a información secundaria proveniente de una caracterización de sedimentos marinos realizada por Tasic, Lonin, Izquierdo, et al., (2019), las concentraciones de los contaminantes fueron comparadas con la normatividad canadiense, la cual establece un Nivel de Efecto Umbral (TEL) y el Nivel de Efecto Probable (PEL) los cuales son explicados en la Tabla 1. Los resultados obtenidos en el muestreo evidenciaron que metales pesados como el Mercurio, Cromo, Cobre, Cadmio y Níquel superaron el umbral TEL, lo cual representa la posibilidad de que ocasionalmente puedan ocurrir efectos biológicos adversos, por otro lado, una estación de muestreo presentó valores de Mercurio por encima del umbral PEL. Se llega a la conclusión de que el Canal del Dique realiza los más grandes aportes de Cadmio en la bahía debido a que su valor aumenta en la temporada de lluvias, estos resultados evidencian la importancia la gestión conjunta entre autoridades ambientales competentes y territoriales dirigidas a controlar las fuentes de estas sustancias contaminadas a la Bahía de Cartagena. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos en la investigación citada.

Figura 4

Concentraciones de metales pesados en los sedimentos de la Bahía de Cartagena - Promedios mensuales 2014-2015.



Fuente: Totic, 2019.

Continuando con la revisión de bibliografías relacionadas con la calidad ambiental de la zona de estudio, resulta pertinente analizar investigación realizada por Romero, Gallego & Leignel (2023) en donde se realiza una revisión bibliográfica sobre diferentes

investigaciones llevadas a cabo en la Bahía de Cartagena. En la revisión realizada se analizó la presencia de contaminantes y el impacto sobre la biodiversidad en las últimas décadas, aportando un análisis crítico del estado actual de la bahía y sus necesidades futuras para asegurar su recuperación y conservación.

Además, se presentan las dinámicas socioeconómicas relacionadas con el estado ambiental de la Bahía de Cartagena a partir del modelo conceptual DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impacts, responses, por sus siglas en inglés), en donde se analizaron los siguientes componentes; impulsores, presiones, estado, impactos y respuestas. A continuación, en la Tabla 3 se presenta el modelo DPSIR aplicado en la relación actual entre el componente socioeconómico y ambiental de la Bahía de Cartagena.

Tabla 3

Resumen de los componentes DPSIR aplicados a la Bahía de Cartagena.

Componente DPSIR	Tendencia
Impulsores	La población aumenta un 1,16 % anual; casi el 30 % de los habitantes vive en la pobreza y el 5,5 % en pobreza extrema; concentración de industrias altamente contaminantes; políticas y controles débiles sobre el uso de la tierra; un aumento del turismo; y un aumento de temperatura de +0,9 a +2,23 °C, una disminución de las precipitaciones del 15% al 17%, un aumento en el nivel promedio del mar de +15 a +20 cm, y un aumento del 30% en la intensidad de las tormentas extremas precipitaciones hasta el año 2100, debido a escenarios de cambio climático.
Presiones	Informalidad y baja adaptación de prácticas sustentables en las actividades económicas; aumento de residuos sólidos, generación y vertidos de aguas residuales; aumento de la demanda de agua procedente del turismo y de las actividades industriales; cargas permanentes de sedimentos y contaminantes del Canal del Dique; la ocurrencia de eventos extremos; y cambios de uso del suelo relacionados con la pérdida de tierras productivas, relleno de costas, ocupación de áreas de conservación, cargas de sedimentos y erosión costera.

Componente DPSIR	Tendencia
Estado	Baja calidad ambiental; ecosistemas degradados; la presencia de contaminantes orgánicos persistentes en sedimentos de diferentes zonas de la bahía; metales As, Cd, Cr, Cu, Hg y Pb en niveles superiores al umbral nivel de efecto; residuos sólidos y contaminación de playas; amenazas a las especies de interés por degradación de refugios y zonas de reproducción y sobrepesca; y un alto vulnerabilidad al cambio global, con escenarios que comprometen directamente al 27,5 % de la población y un riesgo de inundaciones en el 28 % de las industrias y el 35 % de las infraestructuras públicas.
Impactos	Pérdida de hábitat; la reducción de las praderas marinas en un 63 % en los últimos 25 años; disminución de la comunidad coralina; pérdida de manglares; conectividad reducida entre ecosistemas; alteración en la condición de los peces relacionado con una mayor infección por parásitos; bioacumulación de contaminantes orgánicos y metales en especies diferentes; mayores amenazas a la salud ambiental de las poblaciones circundantes; y la alteración de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua de la bahía.
Respuestas	Programas educativos; fortalecer las políticas y el control de la contaminación; la implementación del cambio climático programas de adaptación; articulación institucional para el monitoreo ambiental; y acceso a la información sistemas.

Fuente: Adaptado de Romero, 2023.

Esta revisión destaca que varios contaminantes que se han detectado que exceden los límites de calidad de sedimentos, como As, Cd, Hg y HAP's (Hidrocarburos aromáticos policíclicos), también se bioacumulan y causan daños en todos los niveles tróficos del ambiente costero. Además, se discute el uso potencial de especies centinela y biomarcadores para su seguimiento. Finalmente, los factores que causan contaminación y amenazan el estado de la bahía continúan ejerciendo presión e impacto; por lo tanto, hay un llamado a seguir monitoreando este ecosistema y fortaleciendo políticas y regulaciones.

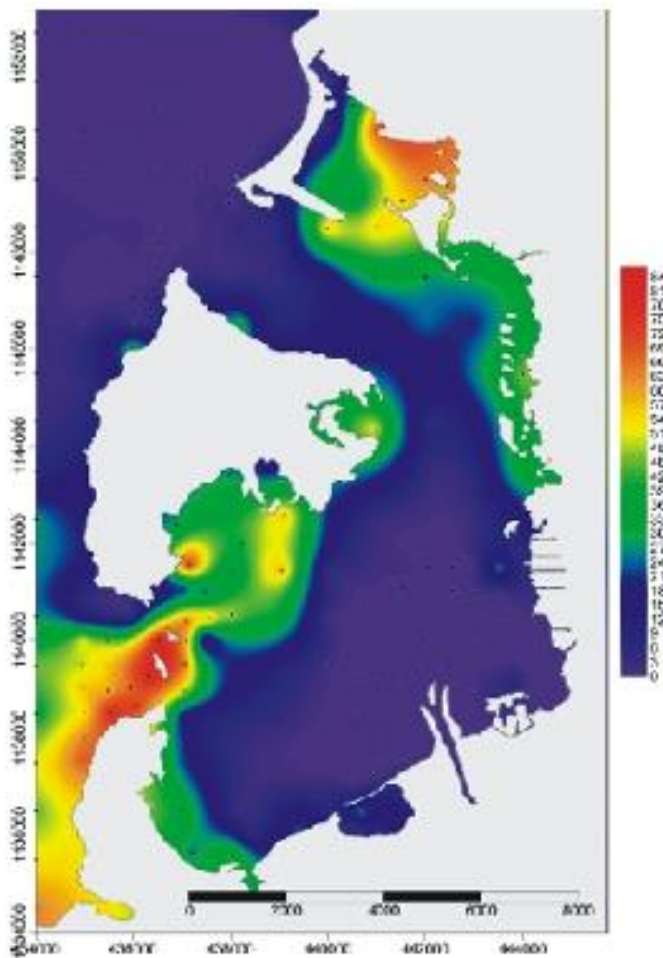
Se revisará también la investigación realizada por Andrade et al. (2004) sobre los aspectos morfodinámicos en la Bahía de Cartagena, en donde se analiza la concentración de Carbonatos y Carbono orgánico en los sedimentos de la bahía. Es importante mencionar que, según Vázquez, Canet, Prol, et al., (2013) los principales

factores que favorecen la adhesión de contaminantes en sedimentos son; los Carbonatos; el Carbono orgánico y el tamaño de partícula (principalmente arcillas y limos).

En la Figura 5 se muestra la composición de carbonatos en la Bahía de Cartagena, en donde se puede evidenciar que hay mayores concentraciones en la bahía interna (sector Norte) y en el punto de acceso sur de la bahía (Bocachica).

Figura 5

Distribución de Carbonatos (%) en la Bahía de Cartagena.

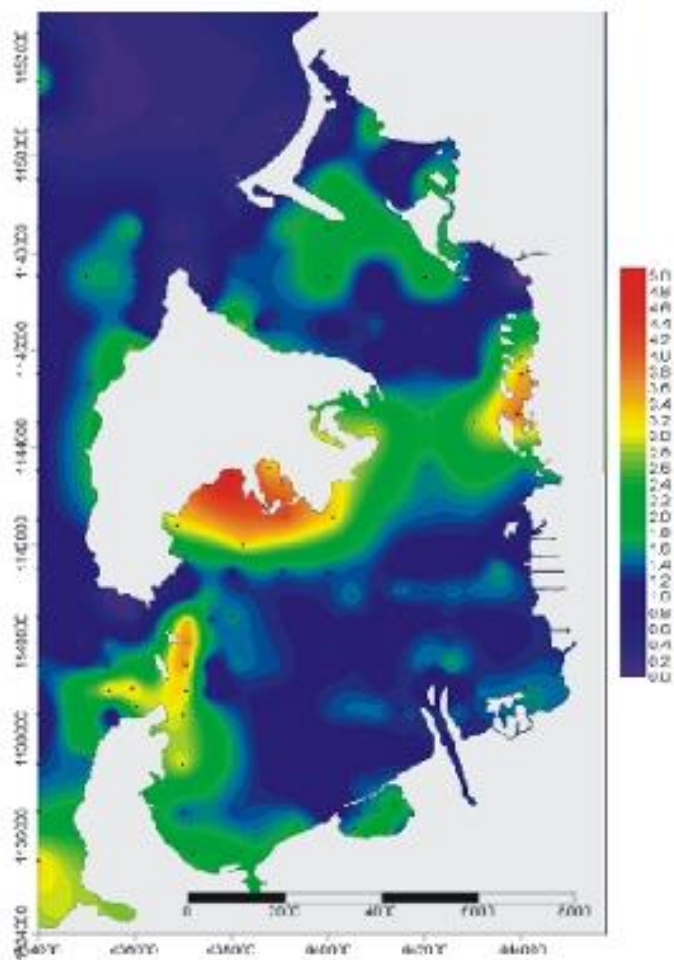


Fuente: Andrade, 2004.

De igual manera, en la Figura 6 se presenta la concentración en porcentaje de Carbono orgánico en la Bahía de Cartagena, en donde hay mayores concentraciones en la bahía central.

Figura 6

Distribución de Carbono orgánico (%) en la Bahía de Cartagena.

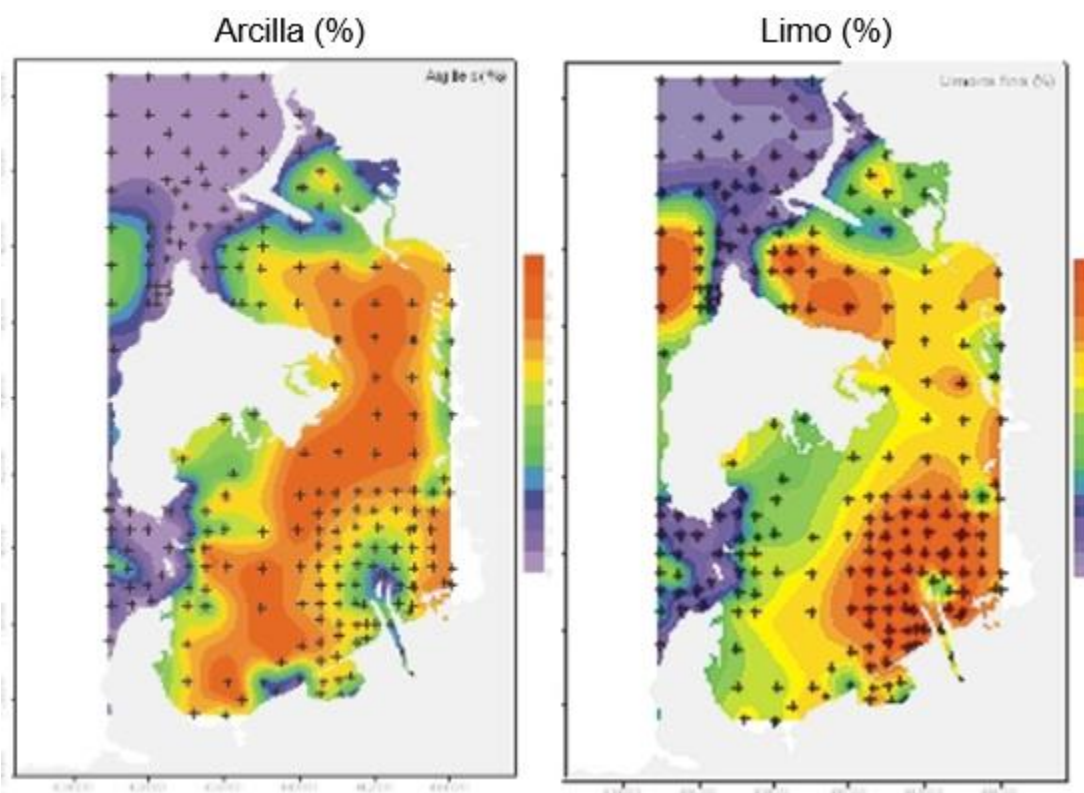


Fuente: Andrade, 2004.

De la misma manera, en el estudio relacionado anteriormente se presenta la composición granulométrica de la bahía, en donde se muestra que hay una predominancia de arcillas y limos (componentes principales para la adhesión de sedimentos). En la Figura 7 se muestra la composición (en porcentajes) de arcillas y limos en la Bahía de Cartagena.

Figura 7

Composición granulométrica de arcillas y limos en la Bahía de Cartagena.



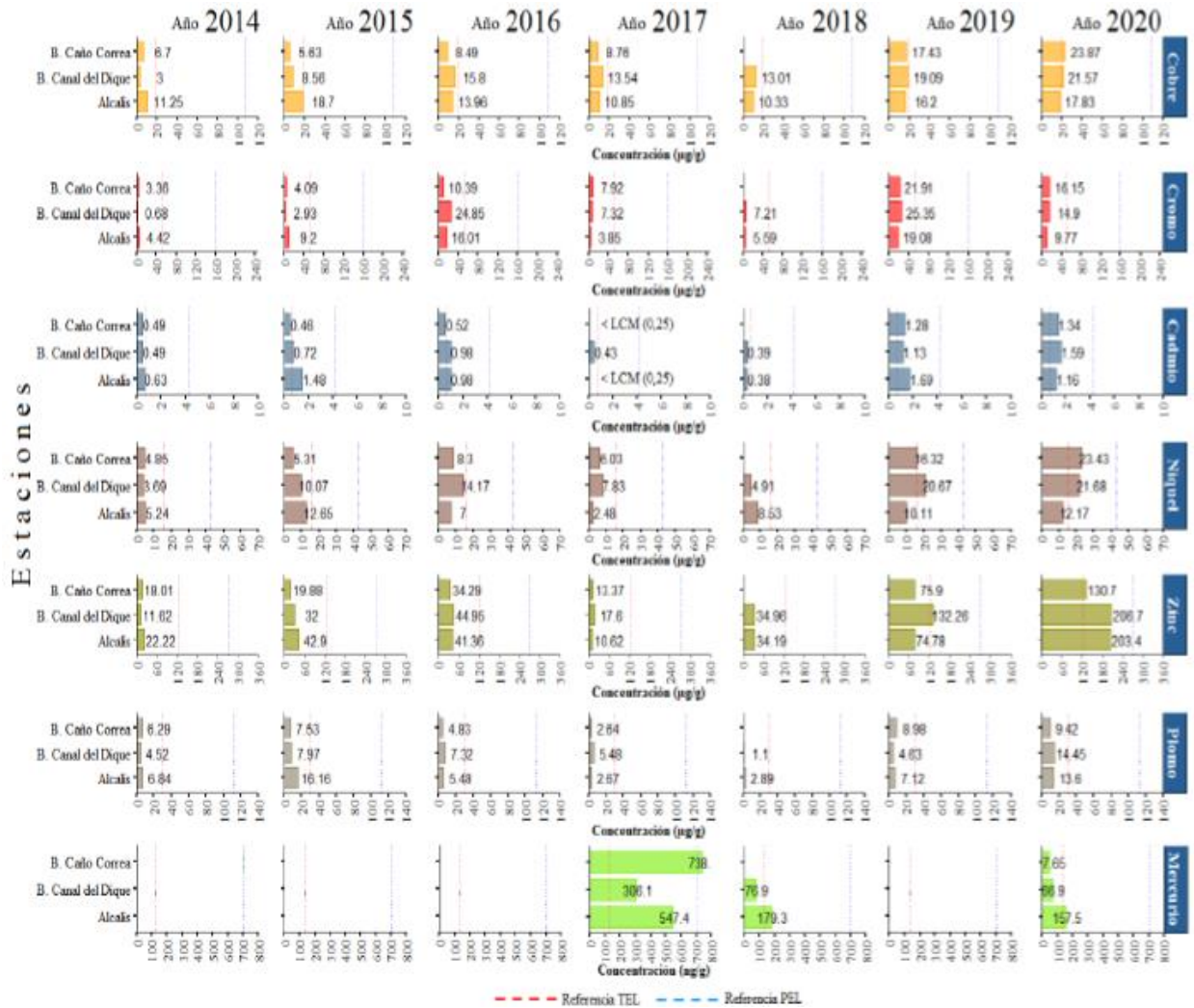
Fuente: Adaptado de Andrade, 2004.

Continuando con la revisión del estado del arte en la Bahía de Cartagena, es importante referenciar los reportes emitidos por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” – INVEMAR (2022), los cuales realizaron un

diagnóstico de la calidad de las aguas marinas y costeras en el territorio colombiano, particularmente en el departamento de Bolívar. Esta institución tiene una serie de estaciones en la Bahía de Cartagena en donde se monitorea la calidad del agua y sedimentos marinos, en su reporte del año 2021, se realizó un análisis multitemporal de metales pesados presentes en tres (3) estaciones ubicadas en la Bahía de Cartagena y se reportaron los siguientes resultados (*Figura 8*).

Figura 8

Metales totales en sedimentos marinos/estuarinos medidos entre 2014 y 2020 en el departamento de Bolívar.



Fuente: INVEMAR, 2022.

Teniendo en cuenta lo anterior, el INVEMAR utilizó como valores de referencia la normativa canadiense para las concentraciones de metales pesados en sedimentos

marinos, se puede evidenciar que en el año 2017 se registraron valores de Mercurio por encima del umbral TEL. En los sedimentos de las tres (3) estaciones muestreadas en los años 2019 y 2020 han registrado concentraciones de Cu, Cd, Ni, Zn y Hg valores superiores a las referencias internacionales de efectos umbrales para los organismos acuáticos. La presencia de metales pesados en sedimentos indica que se debe continuar con la medición de estos metales en los sitios de importancia ambiental impactados por aguas residuales industriales y evaluar su biodisponibilidad.

Metodología

Fase Uno

En primer lugar, para efectuar adecuadamente el análisis del estado de la Bahía de Cartagena en los últimos años, se va a realizar una revisión de cuatro (4) Estudios de Impacto Ambiental (EIA) que se desarrollaron en el área de estudio para la obtención de la licencia ambiental para actividades enfocadas al transporte marítimo, tales como ampliación de canales de entrada a puertos de gran calado y construcción de terminales marítimas. Hay que mencionar, además, que estos proyectos fueron licenciados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), en la Tabla 4 se relaciona la información principal de los proyectos seleccionados para el presente estudio.

Tabla 4

Información principal de los proyectos seleccionados para la investigación.

Expediente	Nombre proyecto	Resolución licencia ambiental	Fecha
LAV004-00-2020	Ampliación del Terminal Portuario OILTANKING COLOMBIA S.A.	Resolución 02097	23 de diciembre de 2023
LAM6522	Operación del Terminal Portuario ubicado en la ciudad de Cartagena	Resolución 00359	12 de marzo de 2018
LAM3485	Dragado de profundización de la zona de maniobras del Terminal marítimo de Manga	Resolución 01354	11 de noviembre de 2016
LAM0453	Dragado de profundización del canal de acceso a la Bahía de Cartagena	Resolución 868	01 de agosto de 2014

Fuente: Elaboración propia.

La información extraída de los EIA se refiere al capítulo de caracterización del medio abiótico, con el fin de conocer la caracterización de los sedimentos marinos superficiales en diferentes estaciones de muestreo ubicadas en la Bahía de Cartagena,

cabe resaltar que los EIA fueron realizados mediante los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental en proyectos de construcción o ampliación y operación de puertos marítimos de gran calado establecidos por la ANLA y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en el año 2015.

Tras haber realizado la revisión de la caracterización de sedimentos marinos en los cuatro proyectos seleccionados, se ha encontrado un total de 107 estaciones de monitoreo las cuales se encuentran ubicadas en la Bahía de Cartagena. En la Tabla 5 se muestran las características principales de las estaciones a analizar, tales como la fecha de toma de muestras, georreferenciación y método analítico empleado por el laboratorio.

Tabla 5

Características principales de las estaciones analizadas.

Estación Muestreo	Fecha	MAGNA SIRGAS origen Bogotá (m)		Método analítico
		Norte	Este	
S1	03-04/05/2019	1631268,88	842914,90	ICP – OES EPA 3050B – SM3120B / ICP/MS EPA 3051/200.8
S2	03-04/05/2019	1631280,61	843008,32	
S3	03-04/05/2019	1631194,96	843094,61	
S4	03-04/05/2019	1631343,52	843145,19	
S5	03-04/05/2019	1631436,52	843242,89	
S6	03-04/05/2019	1631451,65	843129,80	
S7	03-04/05/2019	1631500,40	843061,01	
S8	03-04/05/2019	1631585,26	843296,92	
S9	03-04/05/2019	1631691,50	843249,55	
S10	03-04/05/2019	1631795,92	843201,26	
R11	07/01/2017	1641948,73	840794,66	S.M. 22st Edition 3111 B / EPA 3050 B – SM 3114 C / EPA 3050 B – SM 3111 B / Absorción Atómica – USEPA, APHA WEF 3112B
R12	07/01/2017	1641996,78	840878,41	
R13	07/01/2017	1642049,87	840966,70	
R14	07/01/2017	1642103,69	841051,08	
R15	07/01/2017	1642160,02	841134,94	
R16	07/01/2017	1642224,20	841235,42	

Estación Muestreo	Fecha	MAGNA SIRGAS origen Bogotá (m)		Método analítico	
		Norte	Este		
R17	07/01/2017	1642229,68	841301,71		
R18	07/01/2017	1642133,45	841361,89		
R19	07/01/2017	1642056,14	841408,78		
R20	07/01/2017	1642028,48	840370,26		
R21	07/01/2017	1642004,23	840598,43		
R22	07/01/2017	1642051,79	840792,05		
R23	07/01/2017	1642121,84	840954,36		
R24	07/01/2017	1642235,22	841128,80		
R25	07/01/2017	1642170,42	841385,18		
R26	07/01/2017	1642313,35	841206,03		
R27	07/01/2017	1642378,80	841049,59		
T28	23/07/2016	1642840,79	839996,58		EPA 3051 Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils; Rev01; 2007 / EPA 200.8 Determination of trace metals elements in 41aters and wastes by inductively coupled plasma - Mass Spectrometry; Rev.5.4
T29	23/07/2016	1642824,77	840145,72		
T30	23/07/2016	1642808,75	840294,87		
T31	23/07/2016	1642792,72	840444,01		
T32	23/07/2016	1642773,06	840687,44		
T33	23/07/2016	1642696,78	840906,10		
T34	23/07/2016	1642696,68	841065,86		
T35	23/07/2016	1642770,44	839856,45		
T36	23/07/2016	1642696,03	840000,28		
T37	23/07/2016	1642680,00	840149,42		
T38	23/07/2016	1642663,98	840298,56		
T39	23/07/2016	1642647,95	840447,70		
T40	23/07/2016	1642631,93	840596,85		
T41	23/07/2016	1642615,91	840745,99		
T42	23/07/2016	1642544,93	840991,19		
T43	23/07/2016	1642554,90	839909,68		
T44	23/07/2016	1642538,87	840058,83		
T45	23/07/2016	1642522,85	840207,97		
T46	23/07/2016	1642506,82	840357,11		
T47	23/07/2016	1642490,80	840506,25		
T48	23/07/2016	1642474,78	840655,39		
T49	23/07/2016	1642458,75	840804,53		
T50	23/07/2016	1642397,74	839968,23		
T51	23/07/2016	1642381,72	840117,37		
T52	23/07/2016	1642365,69	840266,52		
T53	23/07/2016	1642333,65	840492,25		

Estación Muestreo	Fecha	MAGNA SIRGAS origen Bogotá (m)		Método analítico	
		Norte	Este		
T54	23/07/2016	1642317,62	840713,94		
T55	23/07/2016	1642256,61	839877,64		
T56	24/07/2016	1642240,59	840026,78		
T57	24/07/2016	1642224,56	840175,92		
T58	24/07/2016	1642099,46	839936,18		
T59	24/07/2016	1642100,59	840093,34		
T60	24/07/2016	1641942,30	839994,73		
T61	24/07/2016	N/D	N/D		
P62	29/06/2013	1633113,2	834888,24		Espectrometría de visión óptica EPA 3050 B /SM 3120 B / Absorción Atómica – Vapor frío SM 3112 B
P63	29/06/2013	1633052,36	835030,89		
P64	29/06/2013	1633123,88	835155,83		
P65	29/06/2013	1633033,41	835531,42		
P66	29/06/2013	1633140,85	835671,52		
P67	29/06/2013	1632935,21	835604,6		
P68	12/06/2013	1633150,73	835948,78		
P69	29/06/2013	1632943,47	835885,84		
P70	12/06/2013	1633054,41	836028,44		
P71	29/06/2013	1632955,91	836156,43		
P72	26/09/2013	1633245,47	835018,7		
P73	26/09/2013	1633286,48	835383,83		
P74	26/09/2013	1632815,53	835487,02		
P75	26/09/2013	1632766,58	835772,77		
P76	20/09/2013	1633113,2	834888,24		
P77	20/09/2013	1633052,36	835030,89		
P78	20/09/2013	1633123,88	835155,83		
P79	20/09/2013	1633033,41	835531,42		
P80	17/09/2013	1633140,85	835671,52		
P81	18/19/2013	1632935,21	835604,6		
P82	17/09/2013	1633150,73	835948,78		
P83	19/09/2013	1632943,47	835885,84		
P84	19/09/2013	1633054,41	836028,44		
P85	19/09/2013	1632955,91	836156,43		
P86	28/12/2013	1633245,47	835018,7		
P87	28/12/2013	1633286,48	835383,83		
P88	28/12/2013	1632815,53	835487,02		
P89	28/12/2013	1632766,58	835772,77		
P90	07/10/2013	1641416,11	839651,28		

Estación Muestreo	Fecha	MAGNA SIRGAS origen Bogotá (m)		Método analítico
		Norte	Este	
P91	07/10/2013	1641506,75	839784,2	
P92	07/10/2013	1641601,79	839925,27	
P93	07/10/2013	1641556,3	839639,36	
P94	07/10/2013	1641652,71	839779,03	
P95	07/10/2013	1641750,98	839919,81	
P96	07/10/2013	1641809,78	839791,5	
P97	07/10/2013	1641895,5	840077,75	
P98	07/10/2013	1641915,46	839924,89	
P99	16/12/2013	1641416,11	839651,28	
P100	16/12/2013	1641506,75	839784,2	
P101	16/12/2013	1641601,79	839925,27	
P102	16/12/2013	1641556,3	839639,36	
P103	16/12/2013	1641652,71	839779,03	
P104	16/12/2013	1641750,98	839919,81	
P105	16/12/2013	1641809,78	839791,5	
P106	16/12/2013	1641895,5	840077,75	
P107	16/12/2013	1641915,46	839924,89	

Fuente: ANLA, 2014, 2016, 2018, 2023.

Nota: Las estaciones que llevan la letra S corresponden al proyecto de expediente LAV0004-00-2020.

Las estaciones que llevan la letra R corresponden al proyecto de expediente LAM6522.

Las estaciones que llevan la letra T corresponden al proyecto de expediente LAM3485.

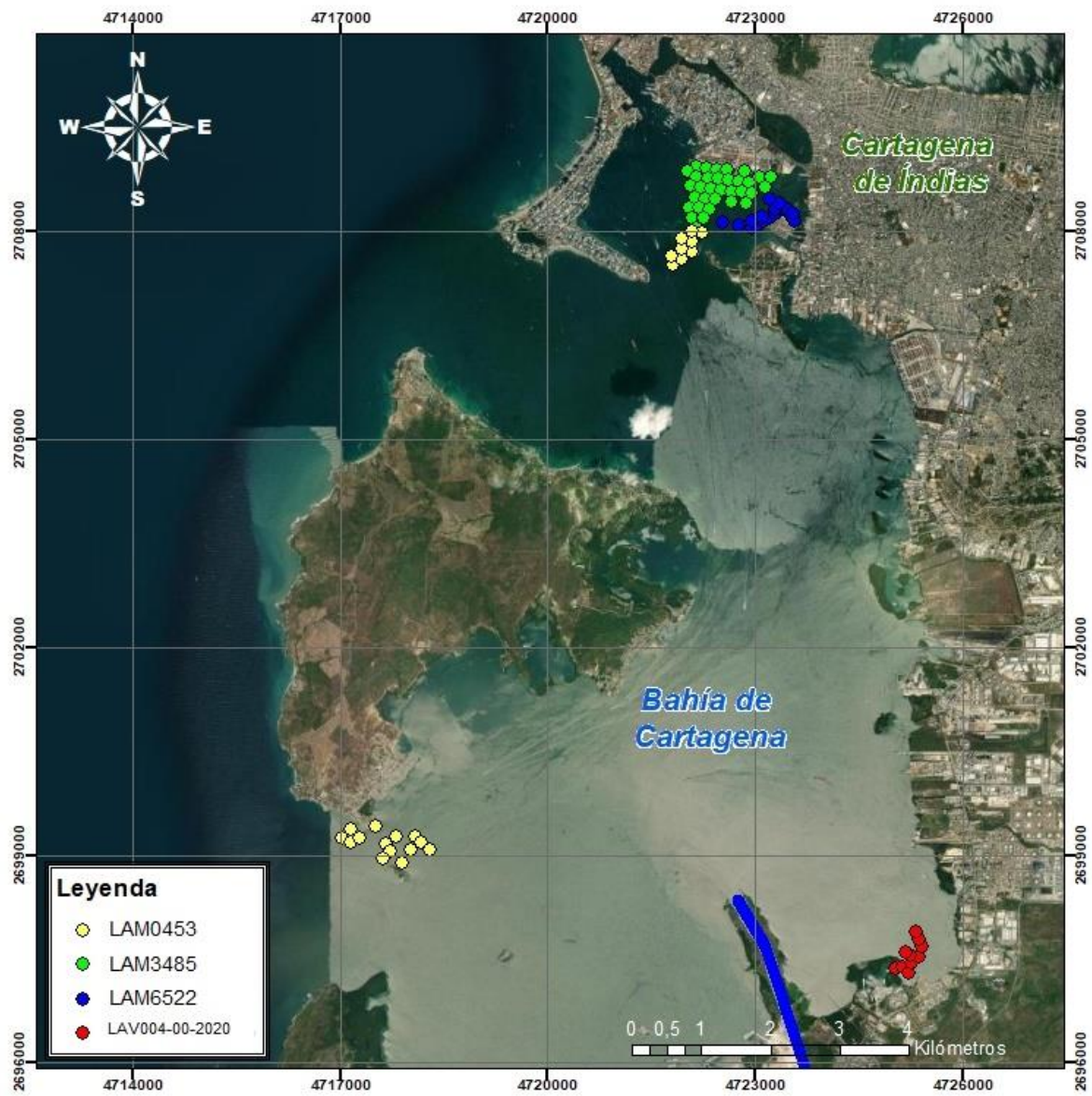
Las estaciones que llevan la letra P corresponden al proyecto de expediente LAM0453.

N/D: No determinado.

Ahora bien, teniendo en cuenta la información relacionada anteriormente, resulta pertinente mencionar que la revisión del estado de la Bahía de Cartagena consta de un rango temporal que va desde el año 2013 a 2019 (6 años), su distribución espacial en la bahía se puede observar en la Figura 9.

Figura 9

Ubicación estaciones de muestreo sedimentos marinos.



Fuente: Elaboración propia.

Fase Dos

Teniendo como referencia los insumos obtenidos en la Fase de la metodología, se puede evidenciar que no se encontraron estaciones de monitoreo distribuidas en la totalidad de la bahía de Cartagena, dado que solo hay estaciones en la bahía interna, en Bocachica y al sureste de la bahía principal, razón por la cual el análisis se va a realizar mediante una sectorización de la Bahía de Cartagena, el sector Norte (69 estaciones identificadas) y el sector Sur (38 estaciones identificadas). Inicialmente se plantea el supuesto de que en la bahía interna (sector Norte), se presentan concentraciones mayores de metales pesados con respecto al sector Sur.

Hay que mencionar, además, que los contaminantes a analizar en los sedimentos superficiales monitoreados en la Bahía de Cartagena son siete (7) metales pesados los cuales son; Mercurio (Hg); Arsénico (As); Cadmio (Cd); Níquel (Ni); Cromo (Cr); Cobre (Cu) y Zinc (Zn). Esto debido a la relevancia que tiene su presencia en el ecosistema marino y estos metales tienen valores de referencia para la normativa internacional tanto para el enfoque con respecto al material dragado (Directriz española) y la protección de la vida marina (Norma canadiense).

Después de realizar la recopilación de la información secundaria referente a la caracterización de metales en sedimentos de la Bahía de Cartagena, se procederá a realizar un análisis estadístico de carácter descriptivo con respecto a las concentraciones encontradas de los metales pesados presentes en los sedimentos superficiales monitoreados en la totalidad de las estaciones encontradas.

Inicialmente, se identificarán posibles patrones de concentración de metales en el sector Norte y Sur de la bahía, lo anterior con el fin de determinar en cual sector se presentan mayores concentraciones con respecto a cada metal analizado. Es importante mencionar que el análisis de los patrones de concentración solo se realizará a aquellos metales que presentaron valores por encima del límite de cuantificación en ambos sectores (Norte y Sur). Lo anterior aplica para el Cadmio, Arsénico y Plomo debido a que no presentan concentraciones representativas en el sector Sur.

Para el análisis estadístico se utilizará como medida de dispersión el rango intercuartílico (IQR por sus siglas en inglés), esta medida describe la dispersión en un conjunto de datos. Específicamente, el IQR mide la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1) de un conjunto de datos, los cuales representan el percentil 75 (P75%) y el percentil 25 (P25%) respectivamente, lo anterior con el fin de evidenciar la dispersión de los datos en el rango central del 50%, el IQR se centra en la mitad de los datos y no se ve afectado por valores extremos o atípicos, cabe resaltar que la medida de tendencia central asociada a el IQR es la mediana, la cual representa el valor central de los datos cuando están ordenados, dividiendo el conjunto en dos partes iguales, a diferencia de la media, esta no se ve afectada por valores atípicos.

El método estadístico empleado para el tratamiento de datos de la presente investigación es utilizado principalmente para conjuntos de datos con distribuciones asimétricas; en las cuales hay presencia de valores atípicos, siendo este el caso idóneo para las concentraciones de metales pesados encontradas en los sedimentos superficiales en los sectores Norte y Sur de la Bahía de Cartagena. Resulta pertinente

mencionar que el procesamiento de la información y el análisis estadístico se va a realizar mediante el programa EXCEL. Cabe resaltar que el análisis estadístico se va a realizar a nivel general (la totalidad de las estaciones), es decir, no se va a subdividir en los dos sectores a analizar.

Teniendo en cuenta las concentraciones obtenidas en las 107 estaciones recopiladas, es importante recalcar que en el análisis de metales pesados en sedimentos marinos no se van a tomar en cuenta los valores que se encuentren por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica empleada por el laboratorio (Ver Límite de Cuantificación), lo anterior se debe a que no representan un valor significativo para el análisis estadístico y al ser valores relativamente bajos, cumplen con la normativa internacional seleccionada para la siguiente fase de la metodología a emplear.

Fase Tres

En último lugar, teniendo en cuenta el análisis efectuado en la Fase II, se revisarán las concentraciones de los metales pesados a la luz de la normatividad internacional seleccionada, que en este caso se va a relacionar las directrices españolas y la norma canadiense, es importante aclarar que estas dos normas tienen un enfoque diferente, mientras que la primera se refiere a los niveles de acción para la correcta disposición del material dragado (enfoque 1), la segunda establece unos lineamientos fundamentalmente aplicados a la protección de la vida acuática (enfoque 2) respectivamente.

Es necesario recalcar que la normatividad internacional seleccionada puede dar unas aproximaciones más acertadas del estado de la Bahía de Cartagena de los últimos años para los dos enfoques mencionados anteriormente, teniendo en cuenta que los estudios revisados en el Marco Teórico solo utilizan la normativa con el enfoque en la protección de la vida acuática (como la norma canadiense y de la NOAA), resulta pertinente revisar el estado de los sedimentos marinos de la Bahía de Cartagena desde el enfoque de las directrices españolas que tienen que ver con el grado de contaminación de los sedimentos marinos a dragar. En la Tabla 6 se presentan los valores de referencia establecidos por la norma española y canadiense.

Tabla 6

Normatividad internacional seleccionada para el análisis de los resultados.

Norma internacional	Enfoque 1 – Grado de contaminación de sedimentos a dragar				Enfoque 2 – Protección de la vida acuática	
	Nivel de acción N.A.A	Nivel de acción N.A.B	Nivel de acción N.A.C	Umbral sedimento no peligroso	ISQG/TEL	PEL
Hg (mg/Kg)	0,35	0,71	2,84	17	0,13	0,7
Cd (mg/Kg)	1,2	2,4	9,6	72	0,7	4,2
Pb (mg/Kg)	80	218	600	1000	30,2	112
Cu (mg/Kg)	70	168	675	2500	18,7	108
Zn (mg/Kg)	205	410	1640	2500	124	271
Cr (mg/Kg)	140	340	1000	1000	52,3	160
Ni (mg/Kg)	30	63	234	1000	15,9	42,8
As (mg/Kg)	35	70	280	1000	7,24	41,6

Fuente: Adaptado de CIEM 2021 y CCME, 2024.

De acuerdo con las directrices españolas los resultados obtenidos son comparados con las concentraciones de contaminantes que presentan ciertos niveles de acción. Dichos niveles se establecen para determinar la concentración de ciertos contaminantes por debajo del cual se puede considerar que el material dragado no representará un peligro para los ecosistemas marinos presentes, lo anterior se debe a una potencial resuspensión de contaminantes que pueden establecerse nuevamente en la columna de agua. Estos niveles también determinan si hay evidencia estadística de que existan efectos biológicos significativos para los ecosistemas, por otro lado, se establece el nivel de acción o concentración por encima de la cual existen efectos biológicos que son estadísticamente significativos.

Esta normativa internacional establece en el capítulo 5 una clasificación para los sedimentos en donde se proponen unos planes de acción dependiendo de la

concentración de cada contaminante, los cuales constan de unos niveles A, B y C que se clasifican de la siguiente manera:

Nivel de acción A: Se clasificarán en Nivel de acción A, aquellos sedimentos por columna y profundidad que presenten parámetros entre el límite de detección del método analítico empleado por el laboratorio y el umbral del nivel de acción A. El material perteneciente a esta categoría podrá verterse al mar excepto en las zonas de exclusión.

Nivel de acción B: Se clasificarán en Nivel de acción B, aquellos sedimentos por columna y profundidad que presenten parámetros entre el límite del nivel de acción A y el umbral del nivel de acción B. Los materiales pertenecientes a la categoría B podrán ser vertidos al mar excepto en las zonas de exclusión y las zonas restringidas.

Nivel de acción C: Se clasificarán en Nivel de acción C, aquellos sedimentos por columna y profundidad que presenten parámetros entre el límite del nivel de acción B y el umbral del nivel de acción C, así como niveles superiores al umbral del nivel C. Sobre niveles de acción C, superponer sedimentos dragados provenientes de niveles de acción B o A

Finalmente, dentro de las mismas directrices se define el umbral de sedimento no peligroso, es decir, concentración límite por encima del cual el sedimento o material dragado deberá ser considerado como un Residuo Peligroso. Si no supera este umbral puede ser clasificado en los planes de acción mencionados anteriormente.

Por su parte en la norma canadiense, se evalúan dos (2) condiciones: el Nivel de efecto umbral (TEL por sus siglas en inglés) adoptados como el estándar intermedio de la calidad del sedimento (ISQG por sus siglas en inglés) y el segundo es el Nivel de Efecto probable (PEL por sus siglas en inglés). El primero, ISQG/TEL, es aquel nivel por debajo del cual no se presentan efectos biológicos adversos y el segundo (PEL), propone

límites de concentración sobre los cuales se encuentran con frecuencia efectos biológicos adversos; valores entre el TEL/ISQG y el PEL indican que posibles efectos biológicos adversos ocasionalmente pueden ocurrir.

Se va a presentar el cumplimiento normativo de cada metal pesado frente a los dos enfoques relacionados anteriormente, esto mediante diagramas de barras en donde se evidencien las concentraciones de cada estación que tiene valores por encima del límite de cuantificación frente a los valores de referencia establecidos por la normativa internacional (española y canadiense). Así mismo, el análisis normativo se va a dividir en las estaciones del sector Norte y el sector Sur, para su posterior comparación y aceptación o rechazo de la hipótesis planteada en la Fase Dos.

Resultados Obtenidos

Como se mencionó en la Fase de la metodología, el análisis de la calidad de sedimentos marinos se va a realizar por medio de la caracterización de metales pesados, lo anterior se debe a que estos contaminantes son los únicos que presentan valores de referencia en la normativa que se seleccionó para la presente investigación (canadiense y española). En la Tabla 7 se presentan las concentraciones de metales pesados encontradas en los sedimentos marinos de la zona de estudio en la Bahía de Cartagena.

Tabla 7

Resultados de la caracterización de sedimentos en los proyectos seleccionados.

Estación Muestreo	Mercurio (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Arsénico (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
S1	< 0,26	< 2,49	< 1,429	34	< 9,98	< 9,56	39	13,8
S2	< 0,26	< 2,49	< 1,429	34	< 9,98	< 9,56	51	30,64
S3	< 0,26	< 2,49	< 1,429	35	< 9,98	< 9,56	49	29,33
S4	< 0,26	< 2,49	< 1,429	38	< 9,98	< 9,56	52	28,39
S5	< 0,26	< 2,49	< 1,429	28	< 9,98	< 9,56	37	36,27
S6	< 0,26	< 2,49	< 1,429	33	< 9,98	< 9,56	45	40,19
S7	< 0,26	< 2,49	< 1,429	42	< 9,98	9,744	50	42,7
S8	< 0,26	< 2,49	< 1,429	39	< 9,98	< 9,56	50	45,89
S9	< 0,26	< 2,49	< 1,429	40	< 9,98	< 9,56	50	40,8
S10	< 0,26	< 2,49	< 1,429	39	< 9,98	10,476	53	44,83
R11	< 0,1	8,81	< 1,8	17,57	0,09	< 18	< 18	35,6
R12	< 0,1	0,69	< 1,8	16,64	< 0,09	< 18	< 18	26,02
R13	< 0,1	1,01	3	13,38	4,84	23	< 18	26,2
R14	< 0,1	0,79	2,2	11,78	2,57	20	< 18	23,34
R15	< 0,1	0,75	< 1,8	9,04	< 0,09	< 18	< 18	27,83
R16	< 0,1	0,78	2,8	11,36	< 0,09	< 18	< 18	15,26
R17	< 0,1	0,4	3,6	14,1	0,38	162	< 18	17,93
R18	< 0,1	0,77	< 1,8	9,31	< 0,09	< 18	< 18	29,33
R19	< 0,1	0,36	2,3	9,63	< 0,09	< 18	< 18	16,97
R20	< 0,1	0,54	2,55	7,83	3,79	< 18	< 18	26,22
R21	< 0,1	0,35	< 1,8	10,93	3,07	< 18	< 18	43,24
R22	< 0,1	0,42	< 1,8	13,07	0,19	< 18	< 18	34,93
R23	< 0,1	0,4	2,6	10,81	3,54	< 18	< 18	34,75
R24	< 0,1	0,64	< 1,8	10,76	< 0,09	< 18	< 18	20,75
R25	< 0,1	0,42	< 1,8	11,15	1,92	< 18	< 18	34,62
R26	< 0,1	0,4	2,39	12,61	0,19	< 18	< 18	22,36
R27	< 0,1	0,64	3,19	9,32	0,16	< 18	< 18	29,81

Estación Muestreo	Mercurio (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Arsénico (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
T28	0,6	< 1,4	6	21,4	30	44,5	22,5	116,92
T29	0,2	< 1,4	< 1,4	23,1	17	28,6	17,3	107,83
T30	0,5	< 1,4	< 1,4	25,1	15	31,1	< 5	101,01
T31	0,3	< 1,4	< 1,4	24	14	36,9	14,8	75,02
T32	0,2	< 1,4	< 1,4	21	12	37,9	12,6	92,87
T33	0,4	< 1,4	< 1,4	24,6	18	37,7	36,2	117,73
T34	3,5	< 1,4	< 1,4	28,7	5	40,3	19,4	76,28
T35	0,3	< 1,4	< 1,4	19,9	15	34,2	30,6	107,75
T36	0,5	< 1,4	7,3	19,9	26	30,5	22,7	103,69
T37	0,7	< 1,4	5,8	23,5	26	38,9	29,2	102,85
T38	0,2	< 1,4	12,4	57,4	42	47,2	< 5	154,38
T39	0,6	< 1,4	< 1,4	33,2	21	34,2	18,1	128,59
T40	0,3	< 1,4	< 1,4	20,7	12	32,4	16,9	90,42
T41	0,3	< 1,4	3	18,5	19	38,2	15,9	104,84
T42	0,2	< 1,4	4,4	24,4	20	35,6	29,8	146,2
T43	0,2	< 1,4	< 1,4	23,9	15	30,7	17,1	90,38
T44	0,2	< 1,4	< 1,4	25,5	27	44,9	< 5	82,92
T45	0,2	< 1,4	5,4	21,3	12	29,2	301,8	95,78
T46	< 0,1	< 1,4	< 1,4	19,6	13	37,3	14,7	93,38
T47	< 0,1	< 1,4	24	22	14	40,1	23,5	97,01
T48	< 0,1	< 1,4	< 1,4	21,3	19	32,2	27,7	104,67
T49	< 0,1	< 1,4	< 1,4	21,2	19	38,8	8,6	105,13
T50	< 0,1	< 1,4	< 1,4	19,7	14	35,4	11,6	92,28
T51	< 0,1	< 1,4	< 1,4	24,3	15	49,8	< 5	80,36
T52	< 0,1	< 1,4	< 1,4	22,2	22	38,7	< 5	69,99
T53	0,1	< 1,4	< 1,4	18,8	21	33,3	< 5	60,41
T54	1,5	< 1,4	12,3	22,4	17	31,3	15,9	103,06
T55	< 0,1	< 1,4	< 1,4	21,1	12	30,5	6,2	85,28
T56	< 0,1	< 1,4	8,2	21,4	6	43	< 5	62,74
T57	< 0,1	< 1,4	< 1,4	16,6	5	30	< 5	71,19
T58	< 0,1	< 1,4	< 1,4	23,8	9	30,9	< 5	64,59
T59	< 0,1	< 1,4	< 1,4	21	< 1	35,8	< 5	56,94
T60	0,2	< 1,4	25,4	11	8	22,1	< 5	49,85
T61	< 0,1	< 1,4	20,3	21	7	36,5	< 5	64,85
P62	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	12
P63	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P64	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	18
P65	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P66	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P67	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P68	0,11	< 10	N/D	N/D	< 10	39,8	15,1	61
P69	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P70	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	15,9	< 10	< 12
P71	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	14,8	< 10	22
P72	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	11,8	< 10	59
P73	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	15,6	< 10	< 12
P74	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12

Estación Muestreo	Mercurio (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Arsénico (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
P75	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	19
P76	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	28
P77	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	14
P78	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	24
P79	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P80	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P81	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P82	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P83	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	34
P84	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P85	< 0,03	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	< 12
P86	0,59	< 10	N/D	N/D	< 10	< 11	< 10	13
P87	0,583	< 10	N/D	N/D	< 10	13	< 10	33
P88	0,69	< 10	N/D	N/D	< 10	15,7	< 10	17
P89	0,669	< 10	N/D	N/D	< 10	14,9	< 10	12
P90	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	31,3	110
P91	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	22,4	39
P92	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	25,6	80
P93	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	26,2	109
P94	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	47	118
P95	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	31,7	87
P96	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	33,8	114
P97	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	35,6	124
P98	< 0,1	< 10	N/D	N/D	< 10	N/D	34,7	86
P99	0,114	< 10	N/D	N/D	< 10	30,6	19,1	68
P100	0,097	< 10	N/D	N/D	16,72	24,4	19,9	48
P101	0,188	< 10	N/D	N/D	< 10	35,5	35,2	118
P102	0,093	< 10	N/D	N/D	< 10	25,1	19,4	53
P103	0,289	< 10	N/D	N/D	< 10	31,7	24,4	69
P104	0,178	< 10	N/D	N/D	< 10	28	22,9	91
P105	0,819	< 10	N/D	N/D	13,77	25	92	73
P106	0,33	< 10	N/D	N/D	13,45	49	49	97
P107	0,21	< 10	N/D	N/D	< 10	30	34,2	79

Fuente: ANLA, 2013 – 2019.

Nota: Las concentraciones acompañadas con el carácter “<” presentaron valores por debajo del límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio, por lo cual se puede decir que no tienen representatividad y serán excluidas del análisis por cada metal pesado.

*N/D: No Determinado.

Llegados a este punto, se va a realizar el análisis de los resultados obtenidos para cada metal pesado presentado en la Tabla 7, así como su análisis estadístico y su

respectiva comparación con la normativa internacional. Cabe resaltar que en el proyecto LAM0453 no se determinaron concentraciones de Arsénico y Níquel, así como el Cromo de la estación P90 a la estación P98

Mercurio (Hg)

El Mercurio es un metal pesado de gran relevancia debido a su alta influencia en el medio ambiente y los efectos negativos en los seres vivos, debido a que es un elemento que se bioacumula y magnifica teniendo en cuenta su concentración en el medio acuático y los sedimentos del lecho marino.

Las actividades que más aportan mercurio al ambiente son la combustión de carbón para la generación de electricidad y calefacción. Aproximadamente la mitad del mercurio emitido procede de centrales termoeléctricas alimentadas con carbón, calderas industriales y del uso doméstico para calefacción y para cocinar. Otras fuentes importantes son procesos industriales, incineración de basuras y la minería del mercurio, el oro y otros metales (Duarte & Gaona, 2020).

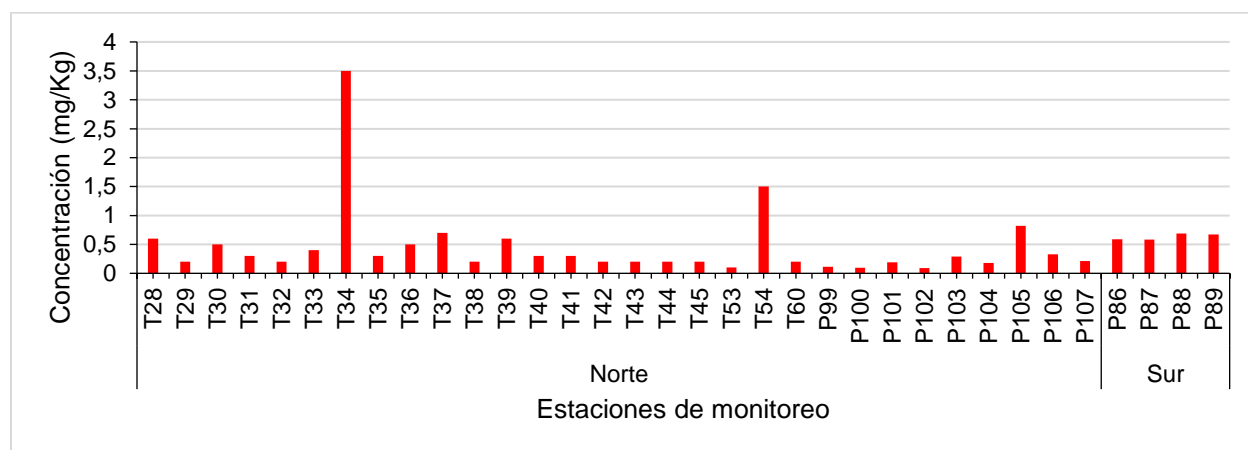
Análisis Estadístico

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede decir que en los años 2019 y 2017 el Mercurio presentó valores por debajo del límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio, por lo tanto, para este caso se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos en los años 2016 y 2013 de las cuales 35 estaciones presentaron valores por encima del límite de cuantificación.

Como se muestra en la Figura 10, en las concentraciones de Mercurio reportadas por encima del límite de cuantificación se evidencia la presencia de valores extremos en el sector Norte. Así mismo, no se presentan patrones que indiquen un grado mayor de contaminación teniendo en cuenta las concentraciones de Mercurio de un sector con respecto a otro.

Figura 10

Concentraciones de Mercurio en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Principalmente, se puede decir que el Mercurio presentó un valor mínimo de 0,093 mg/Kg y un máximo de 3,5 mg/Kg (ambas estaciones ubicadas en la bahía interna). La concentración mediana de mercurio en las estaciones de muestreo fue de 0.3 mg/Kg. Esto indica que la mitad de las estaciones presentó concentraciones por debajo de este valor y la otra mitad presentó concentraciones por encima. Mientras que el IQR fue de 0.3865 mg/Kg, lo cual indica una medida de la dispersión de las concentraciones de

mercurio en el rango central del 50% de los datos, este valor refleja una dispersión moderada en las concentraciones de mercurio.

El valor máximo de 3.5 mg/Kg, que es considerablemente más alto que la mediana, evidencia la presencia de valores atípicos. Estos valores extremos podrían estar asociados a fuentes de contaminación localizadas o a eventos de contaminación específicos en la Bahía interna.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

Con respecto a las directrices españolas, se puede decir que alrededor del 30% de las estaciones analizadas presentaron valor por encima del umbral nivel de acción A (N.A.A), el material perteneciente a esta categoría podrá verterse al mar excepto en las zonas de exclusión y las zonas restringidas. Adicional a esto, solo tres (3) estaciones presentan valores por encima del umbral nivel de acción B (N.A.B), y solo una estación (T34) supera el umbral del nivel de acción C (N.A.C). Para este sector con respecto al Mercurio, se presentan porcentajes altos de cumplimiento con respecto a las directrices españolas.

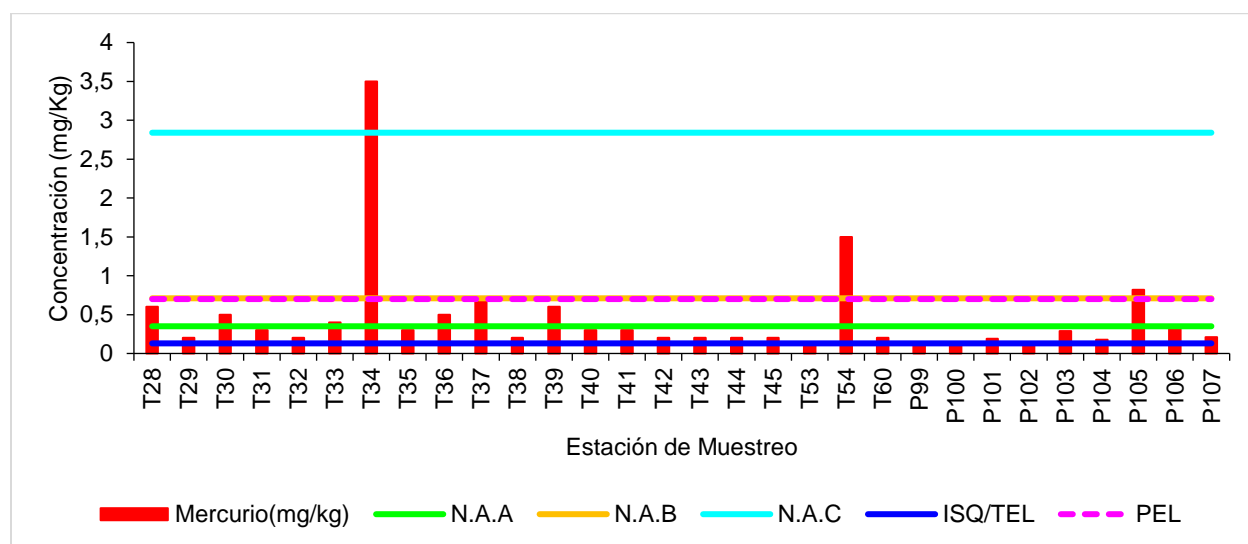
Enfoque 2

En cuanto a la norma canadiense, se puede evidenciar que la gran mayoría de las estaciones (84%) superan el Nivel de Efecto Umbral (ISQG/TEL), que para este caso es de 0,13 mg/Kg. Lo anterior indica que posibles efectos biológicos adversos

ocasionalmente pueden ocurrir, por otro lado, solo cuatro (4) estaciones superan el Nivel de Efecto Probable (PEL) que tiene un valor de 0,7 mg/Kg y quiere decir que hay probabilidades más altas de que la presencia de Mercurio en los sedimentos marinos provoque efectos negativos sobre la vida acuática. En la Figura 11 se muestran las concentraciones de Mercurio frente a los dos enfoques de la normativa internacional seleccionada.

Figura 11

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Mercurio (Hg).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

Enfoque 1

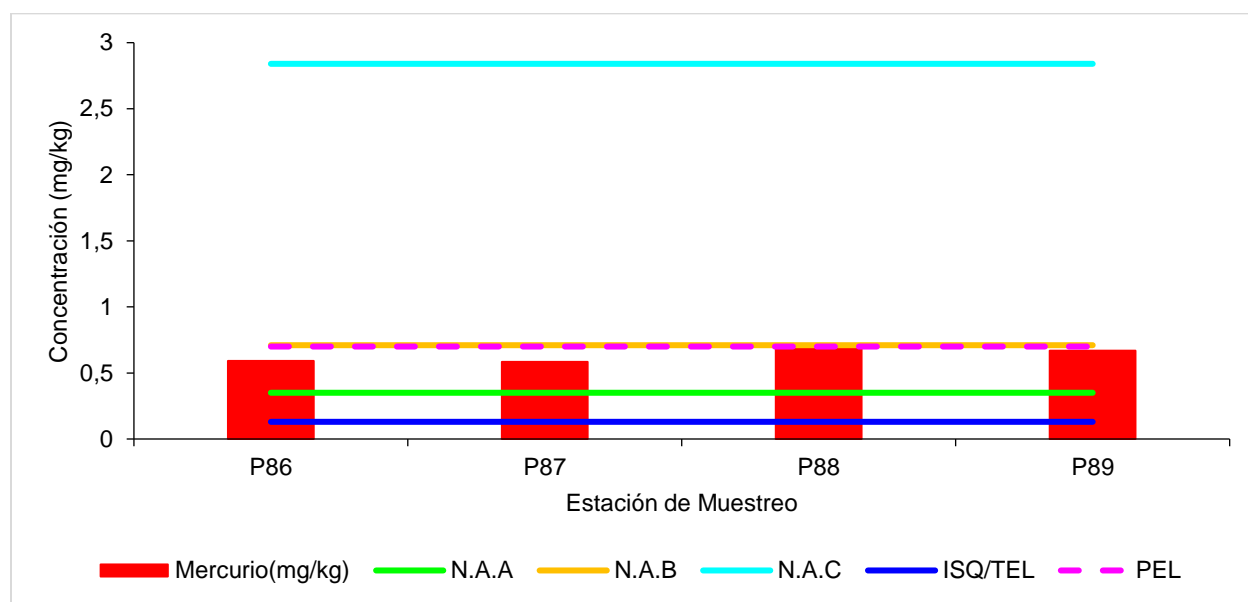
Para el sector sur de la Bahía, el Mercurio solo ha presentado valores por encima del límite de cuantificación en cuatro (4) estaciones, en donde se puede evidenciar que todas las muestras superan el umbral N.A.A (0,35 mg/Kg) estos puntos son clasificados en el nivel de acción B (ver Figura 12)

Enfoque 2

Teniendo en cuenta la norma canadiense, las 4 estaciones presentaron valores por encima del umbral ISQG/TEL (0,13 mg/Kg) teniendo en cuenta lo anterior, en esta zona pueden ocurrir ocasionalmente efectos biológicos adversos por la presencia de Mercurio en los sedimentos marinos superficiales. En la Figura 12 se presentan los resultados de Mercurio en el sector Sur y su comparación con la normativa internacional.

Figura 12

Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Mercurio (Hg).



Fuente: Elaboración propia.

Cadmio (Cd)

El Cadmio (Cd) es un metal tóxico liberado al ambiente por fuentes naturales y antrópicas, dentro de las fuentes naturales se encuentran la actividad volcánica, los incendios forestales y el transporte por el viento de partículas del suelo. Las fuentes

antrópicas son la minería, el uso de fertilizantes fosfatados, la fundición de metales, la quema de combustibles fósiles, la fabricación de baterías, pigmentos, cemento, y plásticos, el Cd liberado al ambiente tiende a acumularse en los suelos haciéndose disponible para las plantas, entrando así a la cadena alimenticia y generando impactos muy negativos para la biota marina (Mero, Pernía, Ramírez, et al., 2019).

Análisis Estadístico

Teniendo en cuenta los monitoreos de sedimentos marinos revisados en la presente investigación, solo en el año 2017 se presentaron valores por encima del límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio, razón por la cual el análisis estadístico solo contempla las 17 estaciones monitoreadas en este año.

Las concentraciones de Cadmio oscilaron entre un mínimo de 0,35 mg/Kg y un máximo de 8,81 mg/Kg, este último se considera como un valor atípico debido a que supera considerablemente las concentraciones reportadas en las otras estaciones. La concentración mediana de Cadmio fue de 0,64 mg/Kg, indicando que la mitad de las estaciones registraron valores inferiores a este y la otra mitad valores superiores, mientras que el IQR, que mide la dispersión de los valores centrales, fue de 0,37 mg/Kg, lo que refleja una dispersión moderada en las concentraciones de Cadmio.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

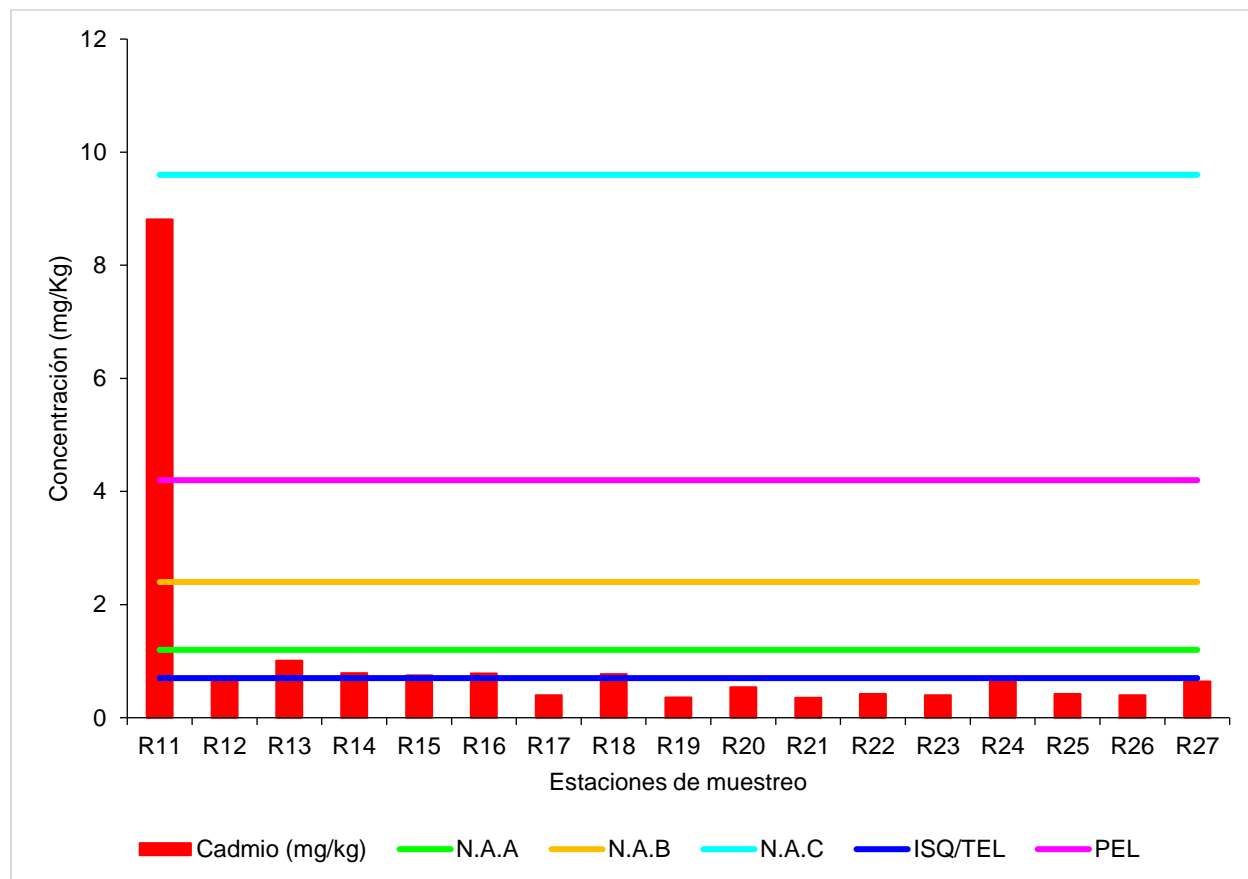
Tomando como punto de partida los valores de referencia establecidos en las directrices españolas, solo la estación R11 (identificada como un valor atípico) incumple con la normativa debido a que supera el N.A.A. y el N.A.B., el resto de las estaciones presenta buenas condiciones con respecto al enfoque 1

Enfoque 2

Al igual que con el primer enfoque, la estación R11 supera los umbrales ISQG/TEL y PEL, lo que supone que en este punto hay probabilidades altas de efectos adversos biológicos. Con respecto a las otras estaciones, se puede decir que solo cinco (5) estaciones superan el umbral ISQG/TEL. En la Figura 13 se presentan los resultados del Cadmio y su comparación con la normativa internacional.

Figura 13

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cadmio (Cd).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

En el sector sur todas las estaciones de monitoreo presentaron valores por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica empleada por el laboratorio, para el Cadmio.

Arsénico (As)

Debido a su alta concentración en los sedimentos marinos, el arsénico puede causar toxicidad aguda y crónica a los organismos que allí habitan, el As se puede almacenar en su interior de una forma no controlable y por lo que se considera un contaminante muy nocivo para los organismos vivos, se asocia a las vitaminas, minerales y carbohidratos por lo que, la exposición crónica al arsénico puede producir cáncer de vejiga, pulmones, piel y próstata, así como, enfermedad del corazón (Fernández, 2011). El Arsénico se origina de fuentes naturales como actividad volcánica y diferentes procesos geológicos, así como fuentes antrópicas en actividades industriales.

Análisis Estadístico

Para la presente investigación, se ha encontrado que el Arsénico presentó valores por encima del límite de cuantificación únicamente en los años 2017 y 2016, entre estos dos años solo reportaron valores significativos 21 estaciones de monitoreo. Las concentraciones de arsénico oscilaron entre un mínimo de 2,2 mg/Kg y un máximo de 25,4 mg/Kg, indicando la presencia de estaciones con niveles moderadamente elevados de arsénico.

La mediana de 4,4 mg/Kg sugiere que la mayoría de las estaciones presentan concentraciones moderadas de arsénico. Sin embargo, la dispersión reflejada en el IQR (el cual es de 5,4 mg/Kg) y los valores extremos indica diferencias significativas entre las estaciones.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

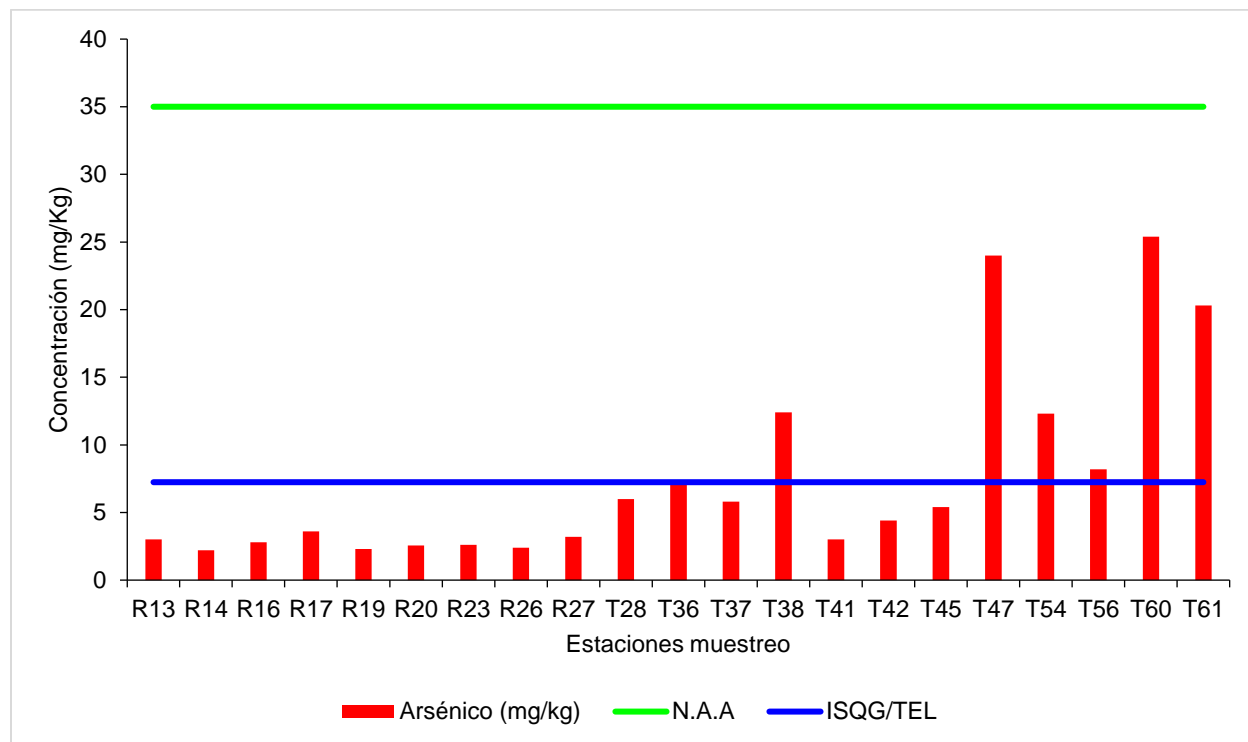
Teniendo como referencia el umbral N.A.A. (35 mg/Kg), se puede decir que todas las estaciones analizadas para el Arsénico cumplen con la normativa debido a que no se supera este valor de referencia.

Enfoque 2

Ahora bien, considerando que la norma canadiense al ser más estricta que las directrices españolas por estar enfocada en la protección de la vida acuática, siete (7) estaciones superan el umbral ISQG/TEL (7,24 mg/Kg), lo que supone que posibles efectos biológicos adversos ocasionalmente pueden ocurrir. En la Figura 14 se presentan los resultados de Arsénico en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 14

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Arsénico (As).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

En el sector sur todas las estaciones de monitoreo presentaron valores por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica empleada por el laboratorio, para el Arsénico.

Níquel (Ni)

El Níquel es un metal que se encuentra en distintos minerales, en meteoritos (aleado con hierro), entre otros. Es un mineral muy demandado en la industria (como la

siderúrgica), principalmente para la obtención de aceros de gran calidad y en muchísimas aleaciones con cobre, cromo, aluminio, plomo, cobalto, manganeso, plata y oro. El níquel da a las aleaciones dureza, tenacidad y ligereza, así como cualidades anticorrosivas, eléctricas y térmicas, la mayor parte del níquel se emplea para fabricar acero inoxidable (Alomá, Blásquez, Calero, et al., 2013).

En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero a altas concentraciones puede resultar muy peligroso para la salud humana. Aumenta las posibilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata. Es desencadenante también de embolias, fallos respiratorios, desórdenes del corazón, así como reacciones alérgicas (erupciones cutáneas), en menor grado (Alomá, et al., 2013).

Análisis Estadístico

Este metal presentó valores por debajo del límite de cuantificación en el año 2013, razón por la cual se va a excluir en el análisis de Níquel en sedimentos marinos de la Bahía de Cartagena. Las concentraciones de níquel oscilaron entre un mínimo de 28 mg/Kg y un máximo de 57,4 mg/Kg, lo que indica una dispersión moderada en los niveles de Níquel.

La concentración mediana de níquel fue de 36,5 mg/Kg, indicando que el 50% de las estaciones registraron valores por debajo de este nivel, mientras que el otro 50% tuvo valores superiores. Así mismo, el IQR, es de 5 mg/Kg, este valor sugiere una dispersión relativamente baja en las concentraciones de Níquel entre las estaciones.

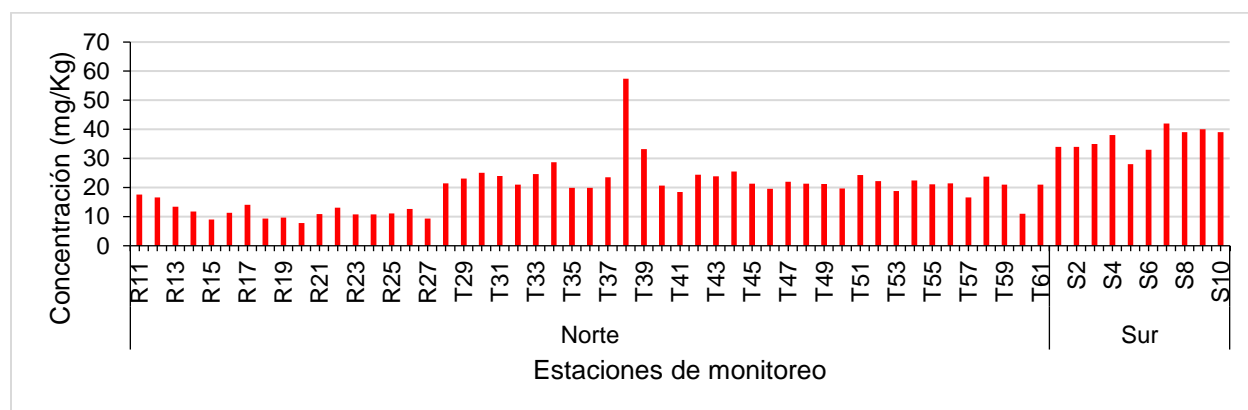
Con respecto a los patrones de contaminación por Níquel en los dos sectores de la bahía analizados, se puede decir que en el sector Sur se presentan concentraciones

más altas que en el sector Norte. La mediana en el sector Norte es de 20,7 mg/Kg, mientras que en el sector Sur es de 36,5 mg/Kg.

Como se puede observar en la Figura 15, el sector Sur presenta concentraciones más altas de Níquel con respecto al sector Norte (a pesar del valor extremo que presenta en la estación T38).

Figura 15

Concentraciones de Níquel en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

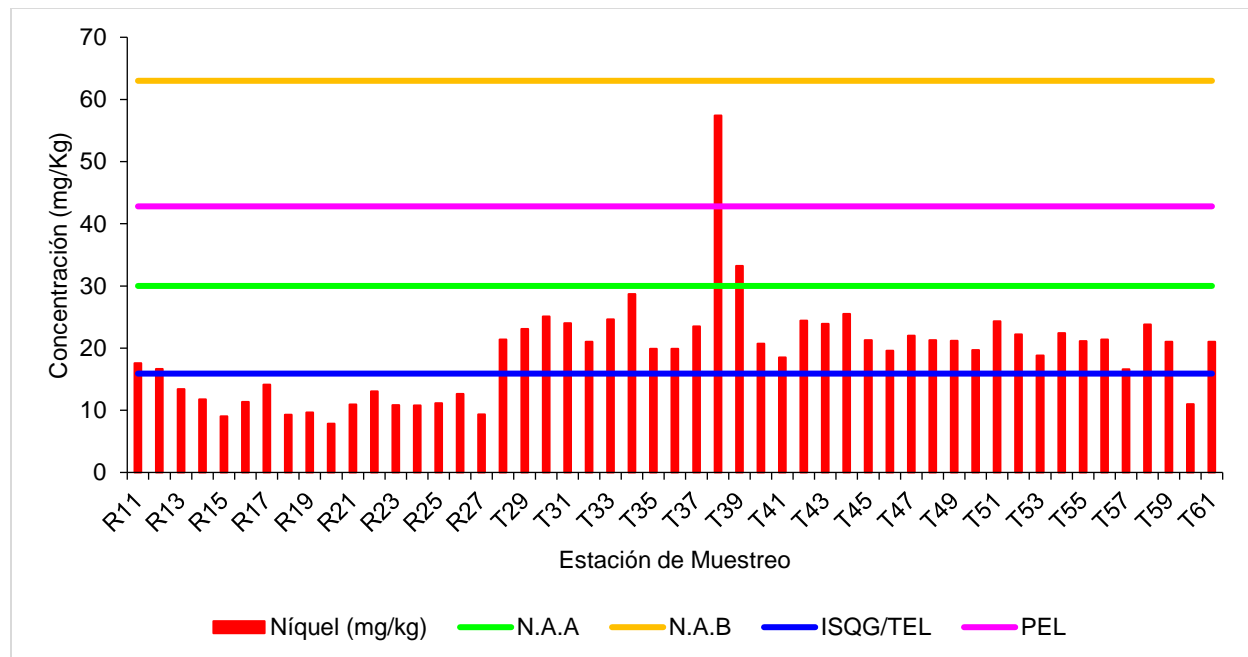
En cuanto a las directrices españolas, se puede decir que en el sector Norte con respecto al níquel solo hay dos estaciones (T38 y T39) que superan el umbral N.A.A. que para este caso es de 30 mg/Kg, se evidencia un porcentaje de cumplimiento alto para esta norma.

Enfoque 2

De las 51 estaciones analizadas (con valores de Níquel por encima del límite de cuantificación), se puede decir que el 69% (35 estaciones) superan el umbral ISQG/TEL (15,9 mg/Kg), en la mayoría de los puntos muestreados pueden ocurrir ocasionalmente efectos biológicos adversos. Por otro lado, solo una estación (T38) supera el umbral PEL, que en este caso es de 42,8 mg/Kg. En la Figura 16 se presentan los resultados de Níquel en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 16

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Níquel (Ni).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

Enfoque 1

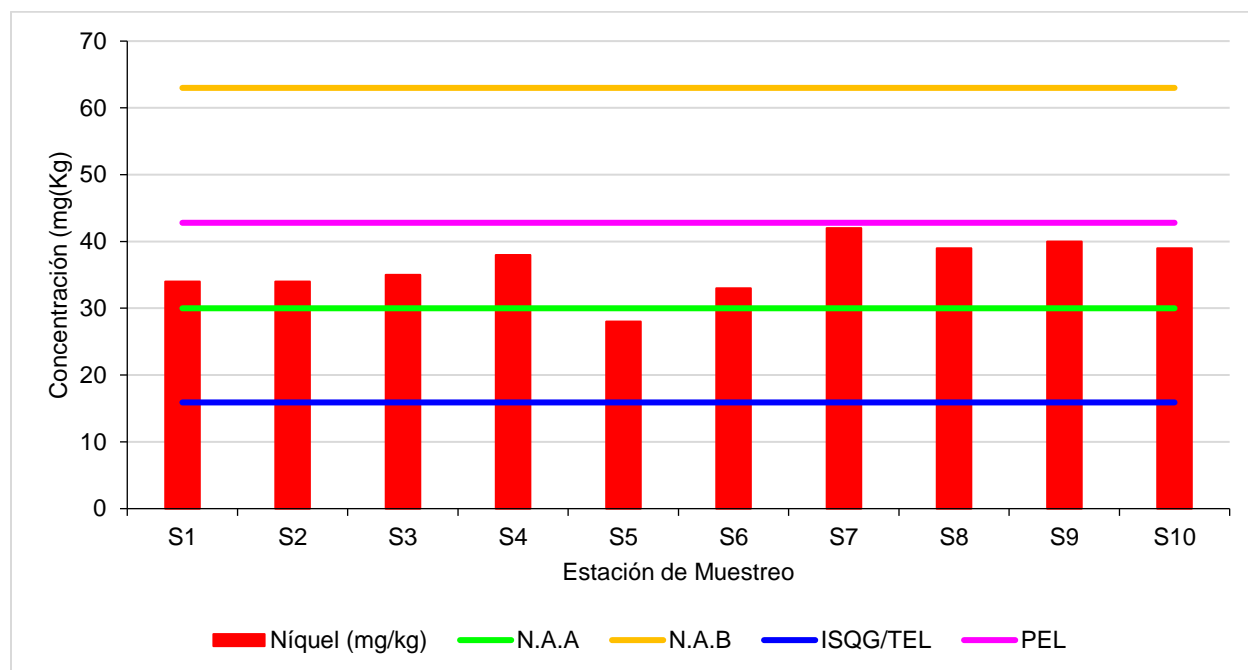
De las diez (10) estaciones analizadas en el sector sur, se puede decir que 9 de estas superan el umbral del nivel de acción A (30 mg/Kg), razón por la cual se clasifican en el nivel de acción B en donde el material dragado podrá ser vertido al mar excepto zonas de exclusión y áreas restringidas.

Enfoque 2

Con respecto a la norma canadiense, se puede decir que todas las estaciones superan el umbral ISQG/TEL (15,9 mg/Kg), teniendo en cuenta lo anterior, en esta zona pueden ocurrir ocasionalmente efectos biológicos adversos por la presencia de Níquel en los sedimentos marinos superficiales. En la Figura 17 se presentan los resultados de Níquel en el sector Sur y su comparación con la normativa internacional.

Figura 17

Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Níquel (Ni).



Fuente: Elaboración propia.

Plomo (Pb)

El plomo es un constituyente que se localiza de forma natural en el medio ambiente, se puede encontrar en fuentes exógenas como el suelo (tierras de cultivo, polvo), agua (océanos, lagos y ríos) y aire (emisiones producidas por la adición en gasolina). Además, se ha detectado su presencia en procesos industriales, fuentes domésticas y en la alimentación. El agua de mar presenta concentraciones de plomo que oscilan de 0,003 a 0,20 mg L⁻¹ lo cual ocasiona exposición de las especies marinas que habitan este medio. Su uso generalizado ha tenido gran impacto en la contaminación ambiental debido a que la mayor parte del plomo se encuentra en el aire bajo la forma

de partículas finas (haluros, óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos de plomo) las cuales son liberadas a la atmósfera en forma de gases, vapores o partículas sólidas. Esta contaminación es responsable de numerosos problemas de salud y muertes por intoxicación de acuerdo con datos reportados por la Organización Mundial de la Salud (Salas, Garduño, Mendiola, et al., 2019).

Análisis Estadístico

Principalmente, se puede decir que en los años 2013 y 2019 todas las estaciones reportaron valores de Plomo por debajo del límite de cuantificación. Las concentraciones de plomo en las estaciones que reportaron valores representativos oscilaron entre un mínimo de 0,09 mg/Kg y un máximo de 42 mg/Kg, indicando una amplia dispersión en los niveles de plomo.

La concentración mediana de plomo fue de 13,77 mg/Kg, lo que indica que el 50% de las estaciones registraron valores por debajo de este nivel, mientras que el otro 50% tuvo valores superiores. El IQR, fue de 13,5 mg/Kg, este valor sugiere una moderada dispersión en las concentraciones de plomo entre las estaciones.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

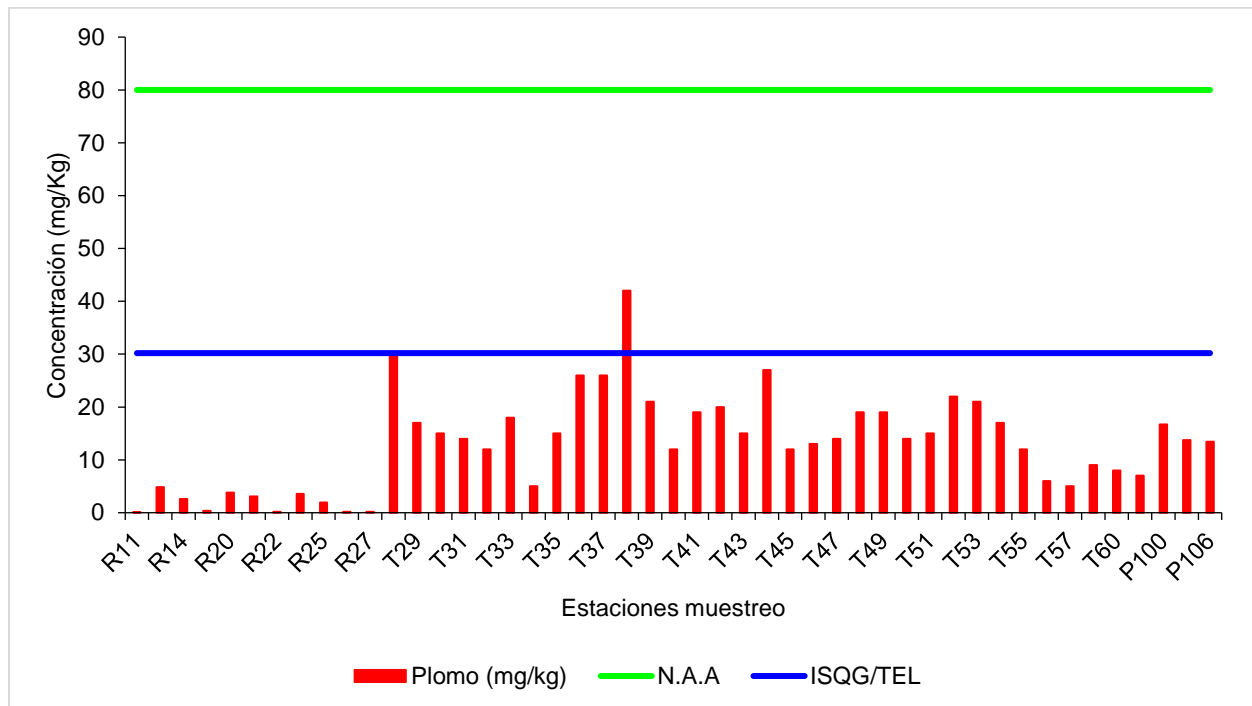
De acuerdo con los valores de referencia establecidos por las directrices españolas, para el Plomo, el umbral N.A.A. con un valor de 80 mg/Kg no es superado por ninguna estación de monitoreo. Razón por la cual se puede considerar que el Plomo cumple con la norma española para el material dragado, el cual puede ser vertido al mar excepto zonas de exclusión.

Enfoque 2

Con respecto a la norma canadiense, se puede decir que solo una estación (T38) sobrepasa el umbral ISQG/TEL. Lo anterior evidencia un cumplimiento del metal Plomo frente al enfoque de la protección de la vida acuática. En la Figura 18 se presentan los resultados de Plomo en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 18

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Plomo (Pb).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

En el sector sur todas las estaciones de monitoreo presentaron valores por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica empleada por el laboratorio, para el Plomo.

Cromo (Cr)

El cromo es un elemento que ha sido identificado tanto como un micronutriente esencial, como un agente carcinogénico, dependiendo de su forma química, una vez iniciado el proceso de acumulación de cromo en el medio ambiente a partir de distintas fuentes ya sean naturales o antrópicas, este puede verse transferido de unos compartimentos a otros del ecosistema, tales como aire, aguas superficiales, sedimentos, aguas subterráneas, suelos y seres vivos (Arauzo, Rivera, Valladolid, et al., 2003).

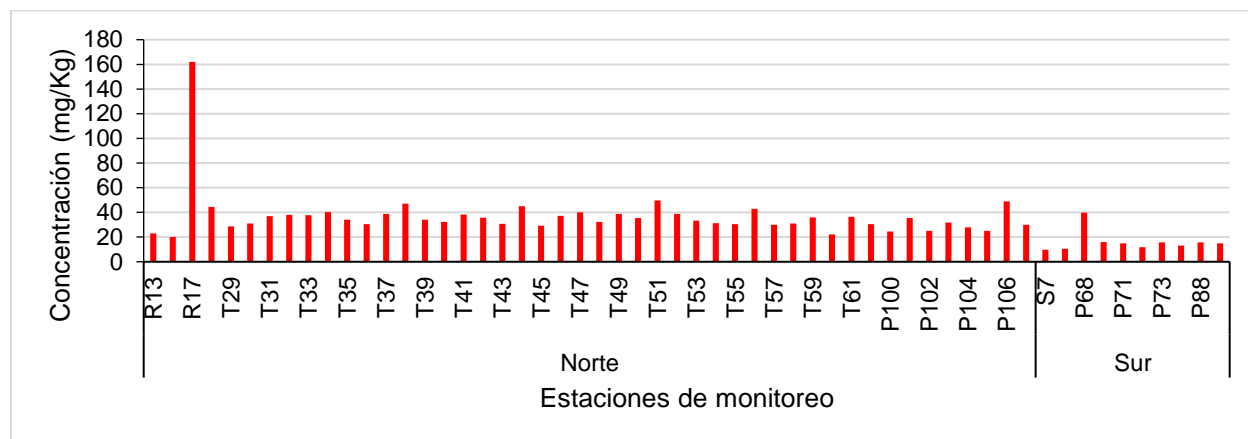
Análisis Estadístico

Las concentraciones de Cromo en las estaciones analizadas mostraron un valor mínimo de 0,09 mg/Kg y un máximo de 162 mg/Kg, este último se puede considerar como un valor atípico debido a que el valor que lo antecede es de 49,8 mg/Kg. Se obtuvo mediana de 31,95 mg/Kg, y el IQR identificado fue de 12,9 mg/Kg los cuales evidencian que la mayoría de las estaciones presentan una dispersión moderada en las concentraciones de Cromo.

Ahora bien, teniendo en cuenta los patrones de contaminación por Cromo en los dos sectores de la bahía analizados, se puede decir que en el sector Norte se presentan concentraciones más altas que en el sector Sur. La mediana en el sector Norte es de 34,2 mg/Kg, mientras que en el sector Sur es de 14,8 mg/Kg. En la Figura 19, En el sector Norte se evidencian concentraciones más altas con respecto al sector Sur.

Figura 19

Concentraciones de Cromo en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

Con respecto a las directrices españolas, únicamente la estación R17 con un valor de 162 mg/Kg presentó una concentración por encima del umbral N.A.A. (140 mg/Kg), el resto de las estaciones cumple con los valores de referencia.

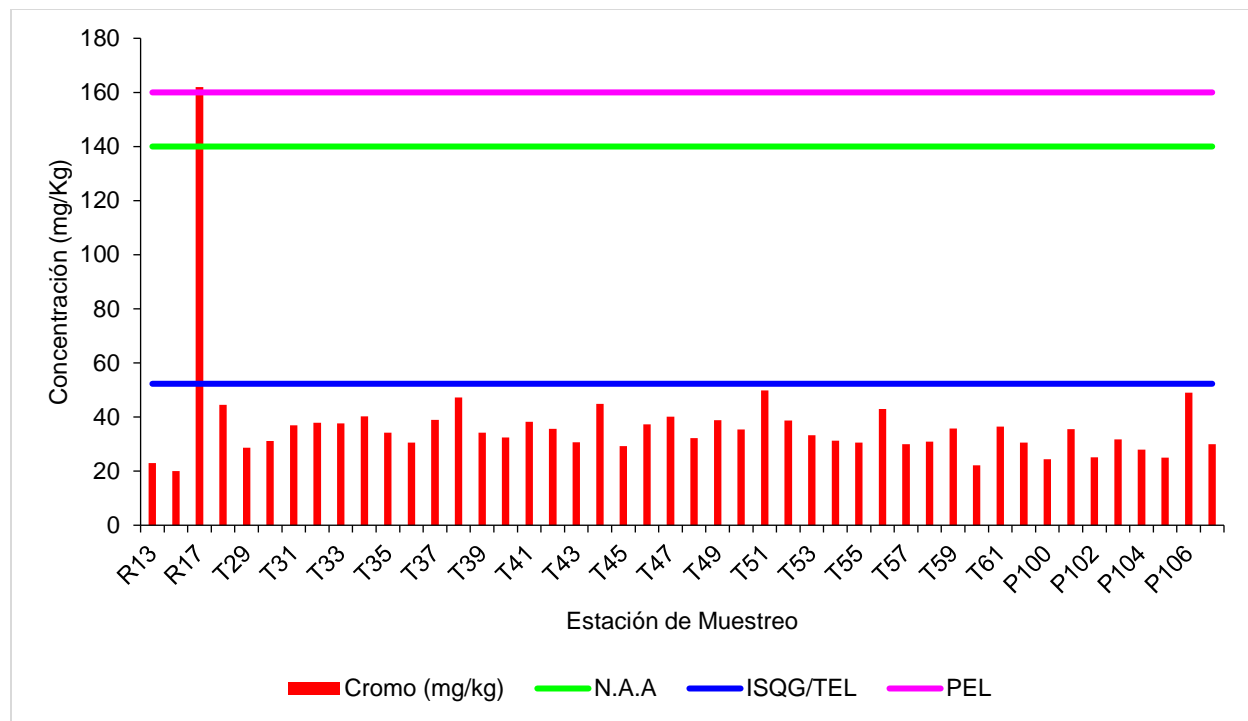
Enfoque 2

Al igual que con el Enfoque 1, solamente la estación R17 supera los umbrales de la norma canadiense, tanto el ISQG/TEL (52,3 mg/Kg) como el PEL (60 mg/Kg), solo hay posibilidades de efectos biológicos adversos en este punto de muestreo, el resto de las estaciones suponen buenas condiciones con respecto al Cromo. En la Figura 20 se

presentan los resultados de Cromo en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 20

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cromo (Cr).



Fuente: Elaboración propia.

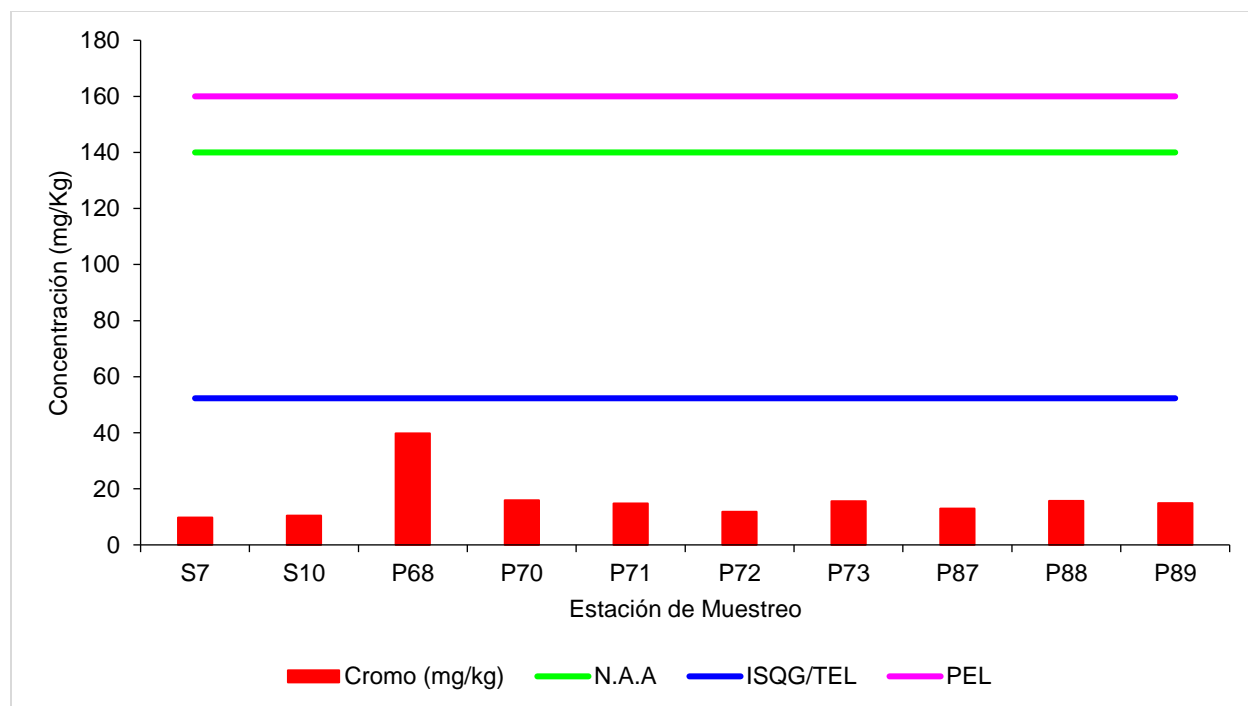
Sector Sur

Para las estaciones del sector Sur que presentaron concentraciones por encima del límite de cuantificación, es posible decir que todas las estaciones cumplen con la normativa analizada desde los dos enfoques, debido a que ninguna concentración supera los umbrales de los valores de referencia establecidos por la norma española y

canadiense. En la Figura 21 se presentan los resultados de Cromo en el sector Sur y su comparación con la normativa internacional.

Figura 21

Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Cromo (Cr).



Fuente: Elaboración propia.

Cobre (Cu)

El cobre, es escasamente soluble en agua, sal o soluciones ácidas, se puede encontrar en una gran variedad de sales minerales y compuestos orgánicos, y en forma metálica, se caracteriza por ser uno de los mejores conductores de electricidad. El cobre se encuentra naturalmente en el ambiente, las fuentes naturales incluyen el polvo arrastrado por el viento, los volcanes, la vegetación en descomposición, los incendios

forestales y la espuma del mar. Las emisiones antropogénicas incluyen fundiciones, talleres de fundición de hierro, centrales eléctricas y fuentes de combustión como los grandes incineradores. Es muy importante su uso en la agricultura, como fungicida, pesticida, alguicida, utilizándose también para tratar follaje, semillas, maderas y cueros; para inhibir el crecimiento de algas en reservorios municipales, piletas, cañerías y sistemas de enfriamiento industrial (Aronzon, 2012).

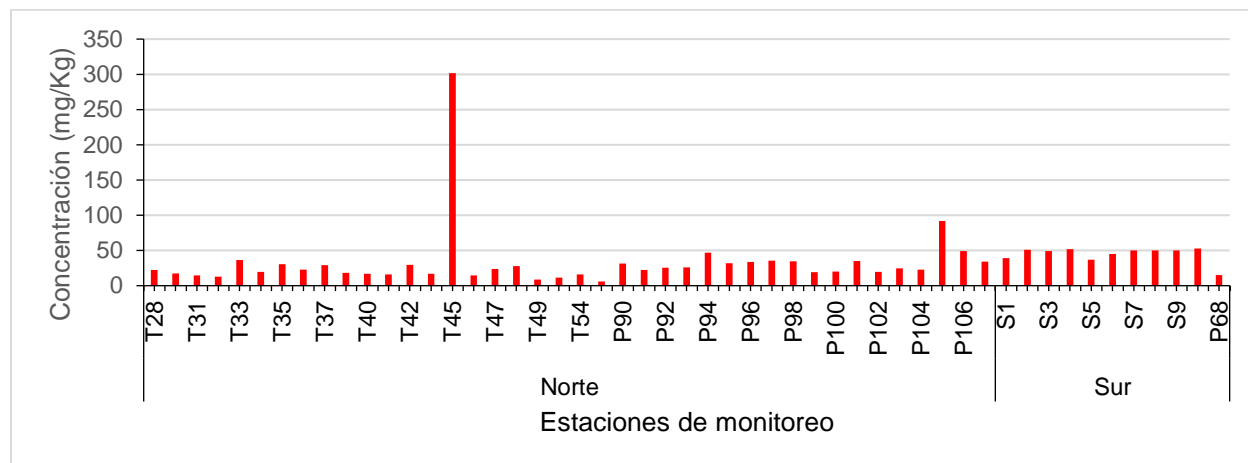
Análisis Estadístico

Por lo que se refiere al Cobre, este metal no presentó valores representativos en el año 2017. Las concentraciones de cobre oscilaron entre un mínimo de 6,2 mg/Kg y un máximo de 301,8 mg/Kg, siendo este último considerado como un valor atípico con respecto a las otras estaciones de monitoreo, La mediana de 27,7 mg/Kg sugiere que la mayoría de las estaciones presentan concentraciones moderadas de cobre. El IQR, que mide la dispersión de los valores centrales, fue de 19,4 mg/Kg. Este valor sugiere una dispersión moderada en las concentraciones de cobre entre las estaciones.

En relación con los patrones de contaminación por Cobre en los dos sectores de la bahía analizados, se puede decir que en el sector Sur se presentan concentraciones más altas que en el sector Norte. La mediana en el sector Norte es de 23,2 mg/Kg, mientras que en el sector Sur es de 50 mg/Kg. En la Figura 22 se puede observar cómo el sector Sur muestra concentraciones más altas con respecto al sector Norte, cabe aclarar que el valor extremo que se presenta en el sector Norte no tiene relevancia en los patrones de concentraciones.

Figura 22

Concentraciones de Cobre en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

Con respecto a las directrices españolas, los resultados de Cobre en el sector norte muestran que la estación T45, con una concentración de 301,8 mg/Kg supera los umbrales N.A.A. (70 mg/Kg) y N.A.B. (168 mg/Kg), lo anterior indica que los sedimentos en esta estación se clasifican en el nivel de acción C. Adicionalmente, la estación P105 supera el umbral N.A.A., el resto de las estaciones cumple con la norma española y todas las concentraciones de Cobre se encuentran por debajo de los límites establecidos.

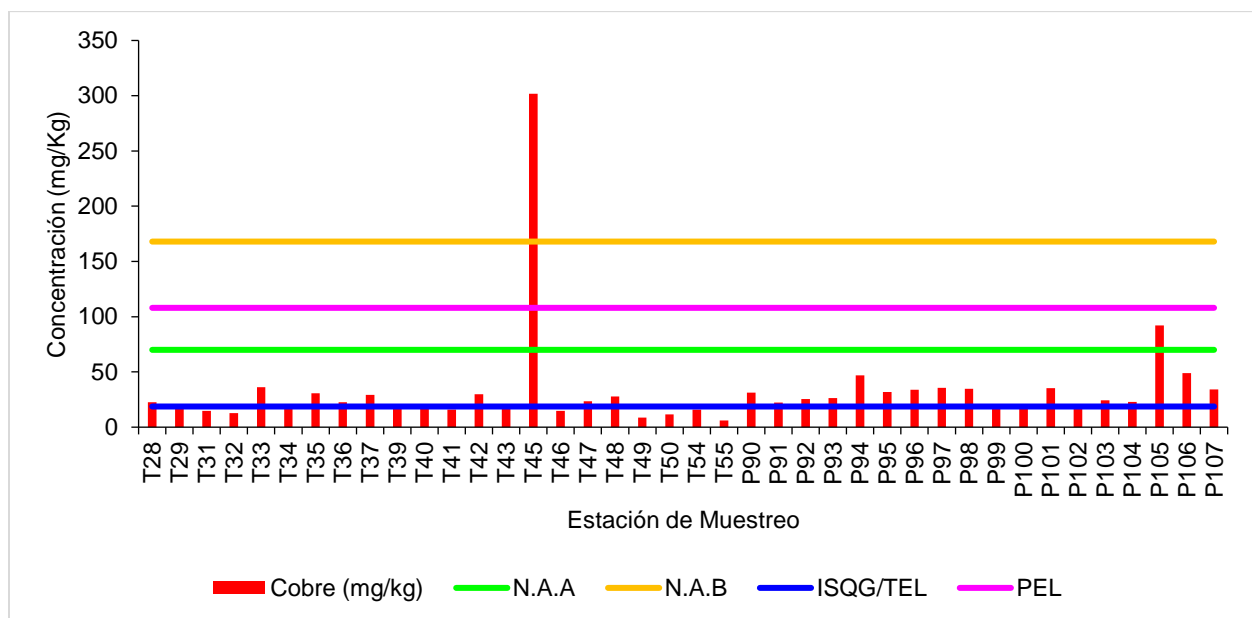
Enfoque 2

Teniendo en cuenta los valores de referencia establecidos por la norma canadiense, con respecto al umbral ISQG/TEL (18,7 mg/Kg) el 68 % de las estaciones

del sector norte superan este límite, razón por la cual se puede decir que pueden ocurrir ocasionalmente efectos biológicos adversos. Únicamente la estación T45 supera el umbral PEL (108 mg/Kg). En la Figura 23 se presentan los resultados de Cobre en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 23

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Cobre (Cr).



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

Enfoque 1

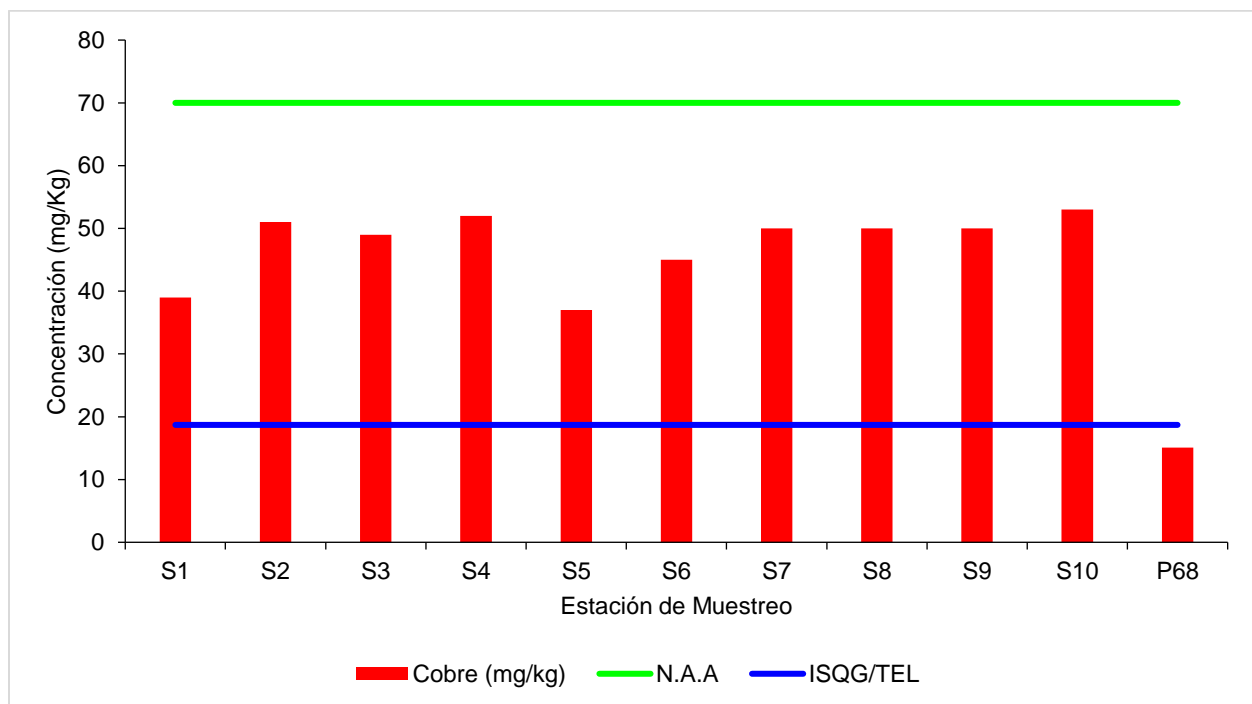
Teniendo el umbral N.A.A. para el Cobre se establece un valor límite de 70 mg/Kg, es posible decir que, para el sector Sur, todas las estaciones de monitoreo cumplen con las directrices españolas, esto debido a que ninguna concentración supera el umbral N.A.A.

Enfoque 2

Con respecto a la norma canadiense, se puede decir que de las 11 estaciones que presentaron concentraciones por encima del límite de cuantificación, 10 de estas superan el umbral ISQG/TEL (18,7 mg/Kg). En la Figura 24 se presentan los resultados de Cobre en el sector Sur y su comparación con la normativa internacional.

Figura 24

Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Cobre (Cr).



Fuente: Elaboración propia.

Zinc (Zn)

El Zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre, se encuentra en el aire, el suelo y el agua, se combina con otros elementos para formar compuestos de Zinc, algunos compuestos comunes que se encuentran en sitios de desechos peligrosos incluyen al cloruro de Zinc, óxido de Zinc, sulfato de Zinc y sulfuro de Zinc. Cierta cantidad de zinc es liberada al ambiente por procesos naturales, pero la mayor parte proviene de actividades humanas tales como la minería, producción de acero, combustión de petróleo e incineración de basura, este se adhiere al suelo, sedimentos y a partículas de polvo en el aire (ASTDR, 2005).

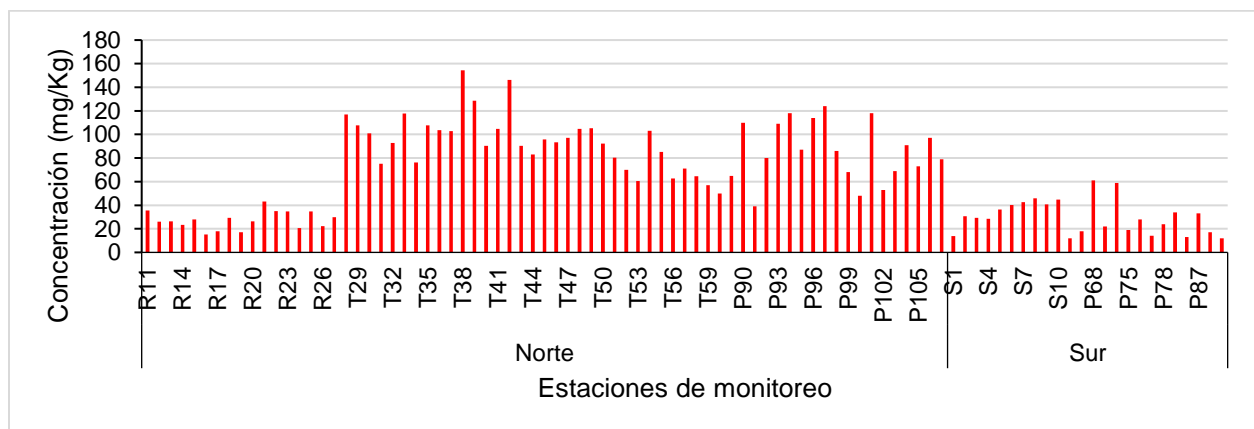
Análisis Estadístico

Principalmente, se puede decir que el Zinc fue el metal que más valores representativos reporto en todas las estaciones analizadas, lo anterior no denota unas malas condiciones en cuanto a este compuesto, debido a que el Zinc no tiene un potencial tan alto de toxicidad y en bajas concentraciones no representa un riesgo para los ecosistemas marinos. Las concentraciones de zinc oscilaron entre un mínimo de 12 mg/Kg y un máximo de 154,38 mg/Kg, La concentración mediana de zinc fue de 61 mg/Kg, lo que indica que el 50% de las estaciones registraron valores por debajo de este nivel, mientras que el otro 50% tuvo valores superiores. El IQR, que mide la dispersión de los valores centrales, fue de 64,05 mg/Kg. Este valor sugiere una dispersión alta en las concentraciones de zinc entre las estaciones.

Los patrones de contaminación por Zinc en los dos sectores de la bahía analizados, se puede decir que en el sector Norte se presentan concentraciones más altas que en el sector Sur. La mediana en el sector Norte es de 80 mg/Kg, mientras que en el sector Sur es de 28,8 mg/Kg. En la Figura 25 se evidencia cómo el sector Norte muestra concentraciones más altas que el sector Sur.

Figura 25

Concentraciones de Zinc en el Sector Norte y Sur de la Bahía de Cartagena.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Normativo

Sector Norte

Enfoque 1

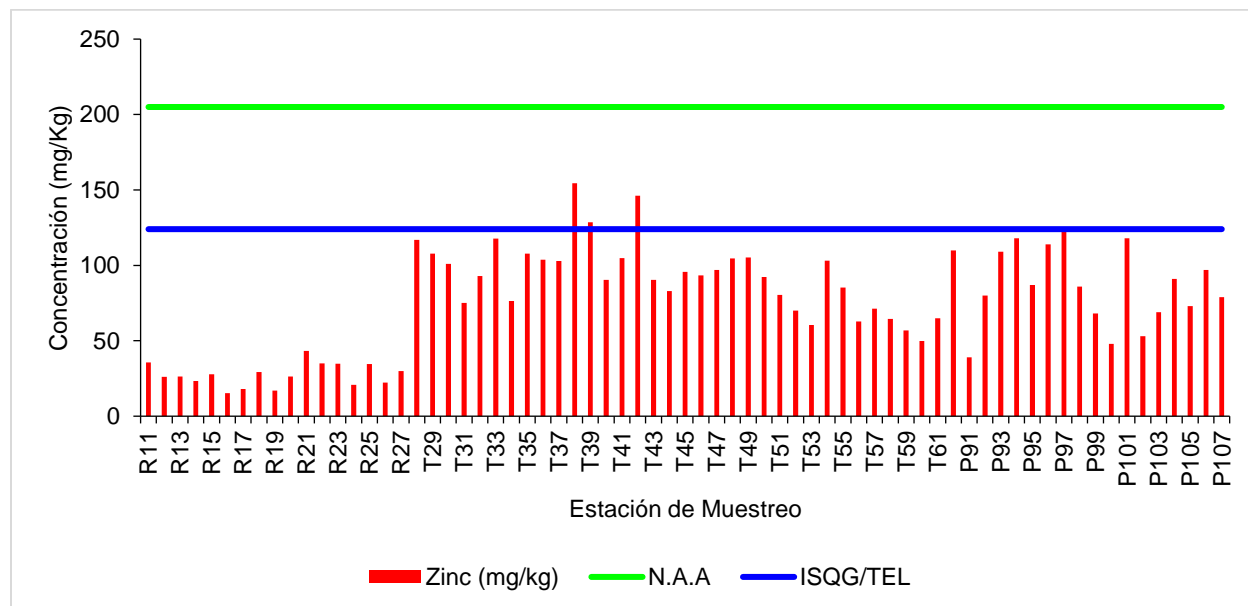
Teniendo el umbral N.A.A. para el Zinc se establece un valor límite de 205 mg/Kg, es posible decir que, para el sector Norte, todas las estaciones de monitoreo cumplen con las directrices españolas, esto debido a que ninguna concentración supera el umbral N.A.A.

Enfoque 2

Para el Zinc se reportaron concentraciones por encima del límite de cuantificación en 69 estaciones, de las cuales solo se superó el umbral ISQG/TEL (124 mg/Kg) en cuatro (4) de estas, específicamente en las estaciones T38, T39, T42 y P97. En la Figura 27 se presentan los resultados de Zinc en el sector Norte y su comparación con la normativa internacional.

Figura 26

Sedimentos marinos superficiales en el sector Norte – Zinc (Zn).



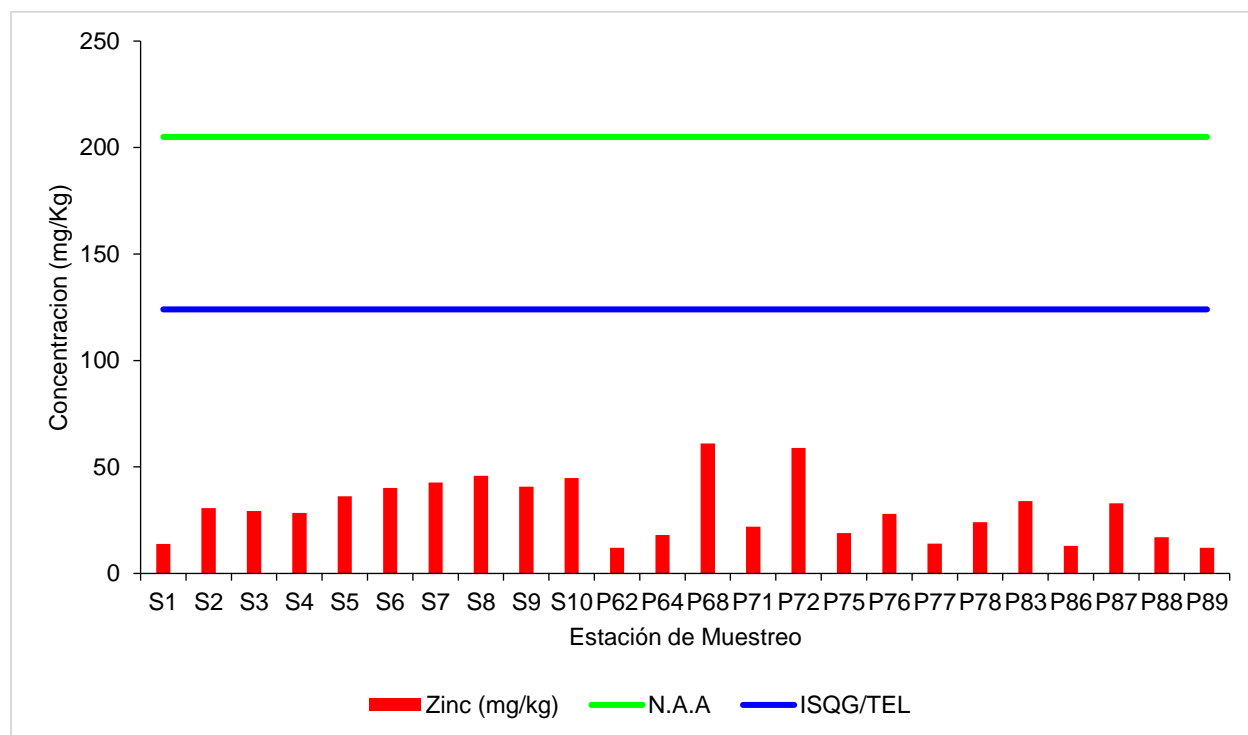
Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

Para las estaciones del sector Sur que presentaron concentraciones por encima del límite de cuantificación, es posible decir que todas las estaciones cumplen con la normativa analizada desde los dos enfoques, debido a que ninguna concentración supera los umbrales de los valores de referencia establecidos por la norma española y canadiense. En la Figura 27 se presentan los resultados de Zinc en el sector Sur y su comparación con la normativa internacional.

Figura 27

Sedimentos marinos superficiales en el sector Sur – Zinc (Zn).



Fuente: Elaboración propia.

Síntesis de Resultados

Considerando los resultados obtenidos, es importante resaltar la presencia de concentraciones extremas encontradas en el sector Norte de la bahía, estos valores extremos podrían estar asociados a fuentes de contaminación localizadas o a eventos de contaminación específicos en la Bahía interna.

Se puede decir que el Zinc es el metal que mayor dispersión presentó en las concentraciones reportadas por las diferentes estaciones de monitoreo. Lo anterior se debe a que es el parámetro que mayor rango intercuartílico presenta 64,05 mg/Kg, esto

quiere decir que el rango central del 50% de los datos se encuentra muy disperso con respecto a los otros metales evaluados, no obstante, su cumplimiento en la gran mayoría de estaciones frente a la norma internacional es alto.

Metales como el Cadmio, Arsénico y Plomo no presentaron concentraciones representativas en el sector Sur.

Tanto el Cadmio como el Arsénico fueron los metales que más concentraciones presentaron por debajo del límite de cuantificación en la gran mayoría de estaciones de monitoreo analizadas.

El Níquel y el Cobre presentan patrones de concentraciones más altas en el Sector Sur, El cromo y el Zinc mayores concentraciones en el Sector Norte. Con respecto al mercurio no se evidenciaron patrones que evidencien patrones de concentración en los sectores Norte y Sur, el resto de metales no presentó patrones significativos.

A nivel general, es posible señalar que el metal pesado que presentó el más alto porcentaje de incumplimiento en sus estaciones analizadas con respecto a las directrices españolas (enfoque 1) fue el Mercurio, puesto que supera el umbral N.A.A. en 13 estaciones, y en la estación T34 supera el umbral N.A.C.

Por otra parte, en torno a la norma canadiense (enfoque 2), los metales que presentaron concentraciones más altas en las estaciones de monitoreo fueron; Mercurio; Níquel y Cobre, estos presentan porcentajes más altos de incumplimiento por ser más estrictas que las directrices españolas, lo anterior justifica el hecho de que hay mayores probabilidades de efectos biológicos adversos por los tres metales mencionados anteriormente en la Bahía de Cartagena.

Discusión de Resultados

Por otra parte, remitiéndonos a los diferentes estudios realizados en el Marco Teórico, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos con la caracterización de sedimentos marinos realizada por Tosic et al, (2019) (ver Figura 4) en donde se puede evidenciar que la estación B7 (ubicada en el sector Norte delimitado para la presente investigación) presenta concentraciones altas de Mercurio, Níquel y Cobre, superando los límites de referencia por la normatividad estadounidense (mismos valores de la norma canadiense). Lo anterior demuestra que los resultados obtenidos en la presente investigación divergen con los revisados en el estado del arte sobre la calidad de sedimentos marinos en el sector Norte de la Bahía de Cartagena.

Tomando como punto de referencia el estudio realizado por Duarte et al, (2004) sobre los aspectos morfodinámicos de la Bahía de Cartagena, uno de los factores principales para la fijación de contaminantes en los sedimentos marinos es la presencia de carbonatos. Como se puede observar en la Figura 5, uno de los sectores con mayor presencia de carbonatos es el sector Norte, específicamente en la bahía interna (donde se encuentran las estaciones de monitoreo analizadas en el presente estudio).

Llegados a este punto, es posible afirmar que las altas concentraciones de Mercurio, Níquel y Cobre (también valores extremos de los otros metales), posiblemente estén relacionadas con el alto porcentaje de carbonatos (Figura 5) en los sedimentos superficiales del sector norte de la Bahía de Cartagena.

Conclusiones y Recomendaciones

Teniendo en cuenta el análisis estadístico de las concentraciones de metales en las estaciones de monitoreo revisadas, se identificaron patrones de mayor contaminación por Níquel y Cobre en el sector Sur con respecto al sector Norte. Mientras que el Cromo y Zinc presentaron patrones de contaminación más altos en el sector Norte.

Las concentraciones encontradas de Mercurio, Níquel y Cobre representan un grado de contaminación mayor con respecto al resto de metales analizados. Tomando como referencia los metales mencionados anteriormente, se puede decir que posibles efectos biológicos adversos ocasionalmente pueden ocurrir en la Bahía de Cartagena.

Hay que mencionar, además, que otros metales como el Cadmio, Arsénico, Plomo, Cromo y Zinc, en general no presentaron concentraciones significativamente altas que puedan representar un grado alto de contaminación de los sedimentos y un riesgo alto para la vida marina, debido a que, en el análisis de cumplimiento frente a la norma internacional, los porcentajes de cumplimiento en las estaciones de monitoreo son altos con respecto a los tres metales mencionados en el párrafo anterior.

También resulta importante decir que, con respecto a la normativa internacional seleccionada, hubo un cumplimiento mayor frente a las directrices españolas con respecto a la norma canadiense, siendo esta última más estricta en cuanto a los valores de referencia debido a que su enfoque se basa en la protección de la vida acuática.

Por todo esto, es posible concluir que la calidad de los sedimentos marinos en la Bahía de Cartagena es un tema de especial cuidado que ha tomado relevancia en los últimos años, lo último se puede justificar en la cantidad de investigaciones realizadas al

respecto, las cuales han dejado en evidencia cómo unos sedimentos contaminados pueden provocar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos. Lo anterior se puede considerar como una influencia directa con el desarrollo económico de una comunidad que en su gran mayoría depende directamente de los servicios ecosistémicos que brindan las zonas costeras en el país.

Cabe resaltar que es de suma importancia la implementación de valores de referencia en la normatividad nacional para la caracterización fisicoquímica de los sedimentos marinos, esto debido a que se promueven las actividades sostenibles para la preservación estratégica de la vida acuática y los ecosistemas marinos, además, lo anterior se justifica en la necesidad de ajustar estas concentraciones de referencia a las condiciones propias de las zonas costeras del territorio colombiano.

A partir de la investigación realizada anteriormente, se han planteado las siguientes preguntas de investigación, las cuales pueden ser complementarias al presente estudio con el fin de generar una ampliación de conocimientos en el marco del análisis de la calidad de sedimentos en la Bahía de Cartagena.

¿Cuál es la influencia de la concentración de carbonatos en la fijación de contaminantes en los sedimentos marinos de la Bahía de Cartagena?

¿Cuál es la influencia de la composición granulométrica en la fijación de contaminantes en los sedimentos marinos de la Bahía de Cartagena?

¿Cómo influye la presencia de Carbonatos y Carbono orgánico en la adhesión de metales pesados a los sedimentos marinos en la zona central de la Bahía de Cartagena?

Referencias

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2005). Reseña Toxicológica del Cinc (versión actualizada). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. [en línea] <https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts60.html#:~:text=El%20cinc%20es%20un%20elemento,de%20cinc%20puede%20ser%20perjudicial>.
- Alomá-Vicente, I. D. L. C., Blázquez-García, G., Calero-de-Hoces, M., Martín-Lara, M. Á., Rico, I. L. R., & Ronda-Gálvez, A. (2013). Panorama general en torno a la contaminación del agua por níquel. La biosorción como tecnología de tratamiento. *Revista Cubana de Química*, 25(3), 266-280.
- Andrade, C., Thomas, Y. F., Lonin, S., Parra, C., Kunesch, S., Menanteau, L., ... & Velasco, S. (2004). Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Boletín científico CIOH*, (22), 90-104.
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C., & Cedenilla, O. (2003). Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama.
- Aronzon, C. M. (2012). Evaluación de la toxicidad de los contaminantes Cobre, Nonilfenol y Diazinón sobre embriones y larvas de *Rhinella* (*Bufo*) *arenarum* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. (2019). ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA DRAGADO DEL ÁREA DE MANIOBRAS,

ATRAQUE Y CANAL DE ACCESO AL MUELLE DE OILTANKING. Capítulo 3, Caracterización del área de influencia. Resolución 2097 del 23 de diciembre de 2023.

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. (2017). ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA EL TERMINAL MARÍTIMO COMPAS – CARTAGENA. Capítulo 5, Caracterización del área de influencia. Resolución 359 del 12 de marzo de 2018.

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. (2016). MODIFICACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE LA SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL DE CARTAGENA - SPRC, PARA EL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES DE DRAGADO DE PROFUNDIZACIÓN EN LA ZONA DE MANIOBRAS. Capítulo 5, Caracterización del área de influencia. Resolución 1354 del 11 de noviembre marzo de 2016.

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. (2013). MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL PARA EL DRAGADO DE PROFUNDIZACIÓN DEL CANAL DE ACCESO A LA BAHÍA DE CARTAGENA, COLOMBIA. Capítulo 3, Caracterización del área de influencia. Resolución 868 del 01 de agosto de 2014.

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. (2021). Reporte de Análisis Regional de la Bahía de Cartagena y Canal del Dique

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Términos de referencia para la elaboración del

- estudio de impacto ambiental – EIA en proyectos de construcción o ampliación y operación de puertos marítimos de gran calado.
- Baker, B. J., Appler, K. E., & Gong, X. (2021). New microbial biodiversity in marine sediments. *Annual Review of Marine Science*, 13, 161-175.
- Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. (1999). Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada.
- Carrquiriborde, P. (2021). Biodisponibilidad, bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación de los contaminantes. *Libros de Cátedra*.
- Catalán, F. S., Mancebo, G. M., Hernandez, J. R., Páez, J. P. M., & Restrepo, B. G. J. (2020). Caracterización fisicoquímica de aguas y sedimentos en puerto de carga de la Bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 39(2), 41-50.
- CEDEX. (2013). Materiales de dragado. Recuperado de: <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/31/materiales-de-dragado/>
- Comisión Interministerial De Estrategias Marítimas. (2021). Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre. España: MAGRAMA.
- Duarte Prieto, S. J., & Gaona Miranda, P. A. (2020). Evaluación del riesgo en salud por contaminación con mercurio en la Bahía de Cartagena. (Título profesional, Universidad El Bosque). Tomado de: <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/77108549-60b9-49e1-a71e-8b18c4da93e1>

- Duarte-Restrepo, E., Noguera-Oviedo, K., Butryn, D. *et al.* Spatial distribution of pesticides, organochlorine compounds, PBDEs, and metals in surface marine sediments from Cartagena Bay, Colombia. *Environ Sci Pollut Res* **28**, 14632–14653 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11504-6>
- Fernández, L. W. I. (2011). Estudio de la contaminación por metales ecotóxicos en sedimentos en la bahía de Ite, Tacna. *Ciencia & Desarrollo*, (13), 28-35.
- Franco Arias, D. A., Restrepo López, J. C., Sanabria Ruíz, N. Y., & Gutierrez, J. C. (2013). Caracterización y distribución de facies sedimentarias en la bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín de Geología*, 35(1), 43-53
- García, C. A. B. (2016). Impacto del dragado de sedimentos del puerto de Salaverry en el ecosistema marino litoral. *Revista ECIPerú*, 13(2), 5-5. Recuperado de: <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2016.0009/>
- González Sánchez, L. (2013). Propuesta para la prevención y mitigación de la contaminación por la actividad minera de oro sobre el canal del Dique (Título profesional, Universidad Santo Tomás).
- González-Lozano, M. C., Méndez-Rodríguez, L. C., López-Veneroni, D. G., & Vázquez-Botello, A. (2006). Evaluación de la contaminación en sedimentos del área portuaria y zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México. *Interciencia*, 31(9), 647-656.
- Gutiérrez-Galindo, E. A., Casas-Beltrán, D. A., Muñoz-Barbosa, A., Macías-Zamora, J. V., Segovia-Zavala, J. A., Orozco-Borbón, M. V., & Daessle, L. W. (2007). Distribución espacial y enriquecimiento de mercurio en sedimentos superficiales

- de la costa noroccidental de Baja California, México. *Ciencias marinas*, 33(4), 473-482.
- INVEMAR. (2022). Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico colombianos. Pp. 81-84.
- Lara-Lara, J. R., Arenas-Fuentes, V., Bazán-Guzmán, C., Díaz-Castañeda, V., Escobar-Briones, E., García-Abad, M. D. L. C., ... & Valdez-Holguín, J. E. (2008). Los ecosistemas marinos. *Capital natural de México*, 1, 135-159.
- Londoño Escudero, E. D. (2017). Transporte marítimo internacional y su impacto ambiental en la bahía de Cartagena (Trabajo de grado). Universidad Piloto de Colombia.
- Mero, M., Pernía, B., Ramírez, N., Bravo, K., Ramirez, L., Larreta, E., Egas, F. (2019) CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN AGUA, SEDIMENTOS, *Eichhornia crassipes* Y *Pomacea canaliculata* EN EL RÍO GUAYAS (ECUADOR) Y SUS AFLUENTES. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 35, no 3, p. 623-640.
- Molares, R., & Mestres, M. (2012). Efectos de la descarga estacional del Canal del Dique en el mecanismo de intercambio de aguas de una bahía semicerrada y micromareal: Bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, (30), 53-74.
- Rendón, L. A. Q., Agudelo, E. A., Hernández, Y. A. Q., Gallo, S. A. C., & Arias, A. F. O. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Gestión y ambiente*, 13(3), 51-64.

- Romero-Murillo, P.; Gallego, J.L.; Leignel, V. (2023). Marine Pollution and Advances in Biomonitoring in Cartagena Bay in the Colombian Caribbean. *Toxics*, 11, 631. [https://doi.org/ 10.3390/toxics11070631](https://doi.org/10.3390/toxics11070631)
- Salas-Marcial, C., Garduño-Ayala, M. A., Mendiola-Ortiz, P., Vences-García, J. H., Zetina-Román, V. C., Martínez-Ramírez, O. C., & Ramos-García, M. D. (2019). Fuentes de contaminación por plomo en alimentos, efectos en la salud y estrategias de prevención. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 20(1).
- Salcedo Heredia, G., Quintana Saavedra, D.M., López, K. y Tous, G. (2013). Evaluación de la calidad de agua en la Bahía de Cartagena durante la temporada seca de 2013. *Bol. Cient. CIOH* (31):143-158.
- Sarasa, J. L. A. (1989). El diálogo puerto-ciudad en la bahía de Cartagena. *Paralelo 37*, (13), 7-24.
- Serman & Asociados S.A. (s.f.). Estudio de Impacto Ambiental – Dragado para la Extensión del Canal de Acceso hasta puerto cuatrerros, Provincia de Buenos Aires. Capítulo 4. Línea base ambiental. Pp. 5-8.
- Tosic, M., Martins, F., Lonin, S., Izquierdo, A., & Restrepo, J. D. (2019). Hydrodynamic modelling of a polluted tropical bay: Assessment of anthropogenic impacts on freshwater runo- and estuarine water renewal. *Journal of Environmental Management*, 236(January), 695–714. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.104>

- Tosic, M. (2017). La Bahía de Cartagena: Un destino final de la contaminación en Colombia. *Arrastrando la montaña al mar*, 56-65.
- Valdés, J., Castillo, A. (2014). Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27 S), Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 42(3), 497-513.
- Vázquez-Figueroa, V., Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., & Villanueva-Estrada, R. E. (2013). Procedencia de los elementos químicos en los sistemas marinos y su influencia en la composición de los sedimentos. *La frontera final: el océano profundo*. INECC, México, 47-56.