UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

INDICE DE GEOACUMULACIÓN Y FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO DE Hg, Cd, Pb y Cu EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHIA CALLAO, PERIODO 2019, 2021

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

Tesista:

Br. **ROOSEVELT MARX PANTOJA MEJÍA**

Asesor:

MSc. **MARIO LEYVA COLLAS**

Huaraz, Ancash, Perú

Noviembre, 2021

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCENTES A OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

1. Datos del autor:

Apellidos y Nombres: PANTOJA MEJÍA ROOSEVELT MARX

Código de alumno: 061.0506.349 Teléfono: 995018068

E-mail: mpantojamejia@gmail.com D.N.I. n°: 45074521

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Tipo de trabajo de investigación:

- (●) Tesis
- ( ) Trabajo de Suficiencia Profesional
- ( ) Trabajo Académico
- ( ) Trabajo de Investigación
- ( ) Tesinas (presentadas antes de la publicación de la Nueva Ley Universitaria 30220 – 2014)

3. Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

4. Título del trabajo de investigación:

"INDICE DE GEOACUMULACIÓN Y FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO DE Hg, Cd, Pb y Cu EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHIA CALLAO, PERIODO 2019, 2021"

5. Facultad de: Ciencias del Ambiente

6. Escuela o Carrera: Ingeniería Ambiental

7. Línea de Investigación(*): PRESERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD Y DE LOS ECOSISTEMAS

8. Sub-línea de Investigación(*): MONITOREO AMBIENTAL

(*)Según resolución de aprobación del proyecto de tesis

9. Asesor:

Apellidos y nombres LEYVA COLLAS MARIO VLADIMIR D.N.I n°: 06269590

E-mail: mleyvac@unasam.edu.pe ID ORCID:

10. Referencia bibliográfica: Tesis en formato APA

11. Tipo de acceso al Documento:

- (●) Acceso público* al contenido completo.
- ( ) Acceso restringido** al contenido completo

Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

12. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

Firma del autor

13. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia Creative Commons, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

……

14. Para ser verificado por la Dirección del Repositorio Institucional

Seleccione la Fecha de Acto de sustentación:

Huaraz, 17/12/2021

Firma: Varillas Wiliam Eduardo
Asistente en Informática y Sistemas
- UNASAM -

***Acceso abierto**: uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

****Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de independencia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los miembros del Jurado Evaluador de Tesis, en pleno que suscriben, reunidos el 17 de diciembre de 2021, en la sala virtual de la Facultad de Ciencias del Ambiente (FCAM) en la plataforma de Microsoft Teams (MT) de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), y en la sala virtual del Facebook Life, de conformidad a la normatividad vigente condujeron el acto académico público de sustentación y defensa virtual de la tesis **"INDICE DE GEOACUMULACIÓN Y FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO DE Hg, Cd, Pb y Cu EN SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHIA CALLAO, PERIODO 2019, 2021"** que presentó **PANTOJA MEJÍA ROOSEVELT MARX** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

Después de haber atendido la sustentación y defensa oral, y haber escuchado las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, la declaramos:

APROBADO

Con el calificativo de: DIECISÉIS (16)

En consecuencia, **PANTOJA MEJÍA ROOSEVELT MARX**, queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento del **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario Nº 399-2015-UNASAM), el Art. 48° y 4ta. disposición complementaria del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector Nº 761-2017-UNASAM y Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 211-2020-UNASAM que incorpora la sustentación virtual), el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector Nº 232-2017-UNASAM), y el Instructivo para sustentación virtual de tesis (Resolución de Consejo de Facultad N° 051-2020-UNASAM- FCAM del 24/octubre/2020).

Huaraz, 17 de diciembre de 2021.

Dr. ALFREDO WALTER REYES NOLASCO
Presidente
Jurado Evaluador de Tesis

Dr. PEDRO LIBERATO VALLADARES JARA
Primer miembro
Jurado Evaluador de Tesis

Ing. CIRO WALTER FERNANDEZ ROSALES
Segundo miembro
Jurado Evaluador de Tesis

M.Sc. MARIO VLADIMIR LEYVA COLLAS
Asesor de tesis

DEDICATORIA

A mis amados padres, Cleto Pantoja Romero y Brígida Mejía de Pantoja, por ser el pilar fundamental de cada meta lograda en mi vida profesional, por sus incansables esfuerzos para conmigo de brindarme un futuro mejor, por enseñarme a no rendirme en la vida y que los sueños son para ser realizados.

A mi hermana Milagros Pantoja Mejía, por todo su apoyo sincero y sus buenos consejos de vida.

A todos ellos, mi eterno agradecimiento.

Roosevelt Pantoja Mejía

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a las personas y entidades que apoyaron, de manera desinteresada, la culminación del presente estudio.

Al MSc. Mario Vladimir Leyva Collas, por su dedicación y tiempo para orientarme cortésmente en las etapas de la investigación.

A los miembros del jurado, el Dr. Alfredo Walter Reyes Nolasco, Dr. Pedro Liberato Valladares Jara y el Ing. Ciro Walter Fernández Rosales, por sus acertadas correcciones y observaciones, que me han servido para mejorar la presentación del informe final.

A mi compañero de aula Alberto Castañeda Barreto, por sus aportes y orientaciones durante el procesamiento de información y redacción del informe final.

Al señor Mauricio por su apoyo con su embarcación y asistencia durante todo el proceso de muestreo realizadas en ambas fechas.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb, y Cu en sedimentos marinos de la bahía Callao, esto a causa del permanente ingreso de efluentes con carga metálica, derivados principalmente de la actividad industrial y municipal. Para tal propósito se tomó muestras en dos fechas y en 8 puntos ubicados de manera sistemática en toda la bahía; zonas consideradas de mayor intervención e influencia de contaminantes marinos.

Los métodos empleados fueron: revisión documental, para recabar y organizar la información; observación sistematizada, en la etapa de campo conducidos por instrumentos de trabajo principalmente por el manual de muestreos “EPA-823-B-01-002”; y finalmente, la etapa de laboratorio, donde se emplearon la observación y el análisis de las variables mediante ensayos fisicoquímicos y utilizando la Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).

Los valores más notables en los resultados obtenidos fueron: el Cd (3.83 de Igeo y 34.97) y el Hg (2.34 de Igeo y 13.65 de FE). El cadmio reportó los valores más altos con una variación porcentual entre el primer y segundo muestreo de un 221% en el Igeo y de un 12765% en el FE. Por otro lado, los demás metales mostraron mínimas variaciones porcentuales.

Los resultados obtenidos indican que los niveles de contaminación por Hg, Cd, Pb, y Cu, son de moderado a fuerte, esto considerado de acuerdo a las escalas valorativas de Muller (1981), superando en su mayoría los valores ISQG y PEL de las directrices CEQG. Además, muestran enriquecimiento de origen antrópico de moderado a significante según escalas valorativas de Sutherland (2000), y que las zonas de mayor vulnerabilidad se ubican en el punto de convergencia entre el río Chillón, el Rímac y las aguas marinas.

Palabras clave: índice, geoacumulación, factor de enriquecimiento, sedimentos marinos, bahía, metales pesados

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ABSTRACT

The main objective of this research was to determine the geoaccumulation index and the enrichment factor of Hg, Cd, Pb, and Cu in marine sediments of Callao Bay, due to the permanent influx of effluents with metallic load, mainly derived from industrial and municipal activities. For this purpose, samples were taken during two dates and at 8 points systematically located throughout the bay, considering areas with greater intervention and influence of marine pollutants.

The methods used ranged from documentary review to collect and organize the information, systematized observation in the field stage conducted by work instruments, mainly by the sampling manual "EPA-823-B-01-002". Finally, in the laboratory stage, observation and analysis of the variables by means of physicochemical tests and using Atomic Absorption Spectrometry (AAS) were used.

Among the main results obtained, the most notable values were reported for Cd (3.83 for Igeo and 34.97) and Hg (2.34 for Igeo and 13.65 for FE), with cadmium reporting the highest values with a percentage variation between the first and second sampling of 221% for Igeo and 12765% for FE, while the other metals showed minimal percentage variations.

The results obtained indicate levels of contamination by Hg, Cd, Pb, and Cu, being found to be moderately to heavily contaminated according to Muller's (1981) rating scales, mostly exceeding the ISQG and PEL values of the CEQG guidelines. In addition, they show moderate to significant anthropogenic enrichment according to Sutherland's (2000) rating scales, and the areas of greatest vulnerability are centered in the zone where the Chillon and Rimac rivers mix with marine waters.

Key words: index, geoaccumulation, enrichment factor, marine sediments, bay, heavy metals.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ÍNDICE

CONTENIDO **Pág.**

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN ii

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS iii

DEDICATORIA iv

AGRADECIMIENTOS v

RESUMEN vi

ÍNDICE viii

RELACIÓN DE TABLAS xi

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN 16

1.1. Planteamiento del problema 17

1.2. Formulación del problema 18

1.3. Objetivos 18

1.3.1. Objetivo general 18

1.3.2. Objetivos específicos 18

1.4. Hipótesis 19

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO 20

2.1. Antecedentes 20

2.2. Bases teóricas 23

2.3. Definición de términos 42

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO 45

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

3.1. Tipo de investigación 45
3.2. Diseño de investigación 45
3.3. Métodos o técnicas 52
3.3.1. Determinación del índice de geoacumulación 52
3.3.2. Determinación del factor de enriquecimiento 53
3.3.3. Valores estándares de referencia CEQG 53
3.3.4. Distribución espacial del Igeo y FE 54
3.4. Población y muestra 54
3.4.1. Población 54
3.4.2. Muestra 55
3.5. Instrumentos validados de recolección de datos 55
3.6. Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información 56
CAPÍTULO IV
RESULTADOS 57
4.1. Índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu ... 57
4.2. Las directrices CEQG en las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu reportadas 59
4.3. Distribución espacial del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu y vulnerabilidad en la bahía Callao 63
CAPÍTULO V
DISCUSIÓN DE RESULTADOS 73
5.1. De las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu reportadas 73
5.2. Del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu. 76
CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 86

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

6.1. Conclusiones..... 86

6.2. Recomendaciones 88

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....89

ANEXOS 95

Repositorio Institucional - **UNASAM** - Perú

RELACIÓN DE TABLAS

CONTENIDO **Pág.**

Tabla 1 Clasificación del índice de geoacumulación y grado de 37

Tabla 2 Clasificación del factor de enriquecimiento de un metal pesado 38

Tabla 3 Valores consensuados para Hg, Cd, Pb, y Cu en sedimentos marinos 39

Tabla 4 Abundancia de Cd, Cu, Pb, Hg en la corteza 40

Tabla 5 Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo, bahía Callao 47

Tabla 6 Límites de detección de metales 52

Tabla 8 Concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo 114

Tabla 9 Valores de Igeo de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo 114

Tabla 10 Valores de FE de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo 115

Tabla 11 Igeo y FE de Hg en la Bahía del Callao 117

Tabla 12 Igeo y FE de Cd en la Bahía del Callao 117

Tabla 13 Igeo y FE de Pb en la Bahía del Callao 117

Tabla 14 Igeo y FE de Cu en la Bahía del Callao 118

Tabla 15 Información del factor (Igeo) 120

Tabla 16 Análisis de Varianza (Igeo) 120

Tabla 17 Resumen del modelo (Igeo) 120

Tabla 18 Medias (Igeo) 120

Tabla 19 Comparaciones en parejas de Tukey (Igeo) 121

Tabla 20 Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias (Igeo) 121

Tabla 21 Información del factor (FE) 123

Tabla 22 Análisis de Varianza (FE) 123

Tabla 23 Resumen del modelo (FE) 123

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 24 Medias (FE) 123

Tabla 25 Comparaciones en parejas de Tukey (FE) 124

Tabla 26 Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias (FE) 124

Repositorio Institucional - **UNASAM** - Perú

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO **Pág.**

Figura 1 Mapa de procesos sedimentarios 26

Figura 2 Mapa de vertimientos marinos 27

Figura 3 Mapa de clasificación marina 29

Figura 4 Factores involucrados en el proceso de sedimentación marina 30

Figura 5 Mapa de ubicación del ámbito de estudio 42

Figura 6 Diagrama del proceso de investigación 46

Figura 7 Mapa de puntos de muestreo 48

Figura 8 Draga Van veen 50

Figura 9 Índice de geoacumulación de mercurio, plomo, cadmio y cobre en el primer y segundo muestreo en la Bahía Callao. 57

Figura 10 Factor de enriquecimiento de mercurio, plomo, cadmio y cobre en el primer y segundo muestreo en la Bahía Callao. 59

Figura 11 Concentraciones de Hg en la bahía Callao y la norma CEQG 60

Figura 12 Concentraciones de Cd en la bahía Callao y la norma CEQG 60

Figura 13 Concentraciones de Pb en la bahía Callao y la norma CEQG 61

Figura 14 Concentraciones de Cu en la bahía Callao y la norma CEQG 62

Figura 15 Mapa de distribución de metales – muestreo 1 63

Figura 16 Mapa de distribución de metales – muestreo 2 64

Figura 17 Mapa de distribución espacial del Igeo de mercurio 65

Figura 18 Mapa de distribución espacial del Igeo de cadmio 66

Figura 19 Mapa de distribución espacial del Igeo de plomo 67

Figura 20 Mapa de distribución espacial del Igeo de cobre 68

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 21 Mapa de distribución espacial del FE de mercurio 69

Figura 22 Mapa de distribución espacial del FE de cadmio 70

Figura 23 Mapa de distribución espacial del FE de plomo 71

Figura 24 Mapa de distribución espacial del FE de cobre 72

Figura 25 Variación espacial y temporal de concentraciones de Hg, Cd, Pb, Cu en el primer y segundo muestreo 74

Figura 26 Variación porcentual del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu 77

Figura 27 Valores de Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu en la bahía Callao 78

Figura 28 Vistas panorámicas del proceso de dragado 97

Figura 29 Vistas panorámicas del proceso de muestreo 98

Figura 30 Vista de las muestras tomadas de los 8 puntos en el primer y segundo muestreo 99

Figura 31 Mapa de batimetría de la bahía Callao 131

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ABREVIATURAS

Km	Kilómetro
G	Gramo
mg/Kg	Miligramos por kilogramo
ug/g	Microgramos por gramo
hP	Hectopascal
pH	Potencial de hidrógeno
Hg	Mercurio
Cd	Cadmio
Pb	Plomo
Cu	Cobre
Fe	hierro
Me	Metal
Igeo	índice de geoacumulación
FE	Factor de enriquecimiento

SIGLAS

MINAM	Ministerio del ambiente
EPA	Agencia de protección ambiental
OEFA	Organismo de evaluación y fiscalización ambiental
IMARPE	Instituto del mar del Perú
INACAL	Instituto nacional de calidad
CEQG	Canadian Environmental Quality Guidelines
ISQG	Interim Sediment Quality Guideline
PEL	Probable Effect Level
UTM	Universal transversal de mercator

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

La presente investigación fue desarrollada a raíz de la problemática ambiental que enfrentan los ecosistemas marinos del Perú. Esta, en los últimos años, se van degradando debido a una deficiente gestión y conservación de los recursos por parte de las instituciones competentes.

El estudio plantea como objetivo central determinar el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en sedimentos marinos dentro de un área de 148,57 Km2 que corresponden a la bahía Callao. Este fue desarrollado a partir de la extracción de muestras de sedimentos y posterior análisis químico en ocho puntos de muestreo, distribuidas estratégicamente en toda la bahía.

Los sedimentos marinos constituyen un almacén importante de elementos. Estos forman sustancias, compuestos orgánicos e inorgánicos, el cual son fuente de información valiosa que permite conocer la condición de los ambientes marinos e identificar eventuales perturbaciones producto de la acumulación de contaminantes como los metales pesados. Esto significa un riesgo para el ecosistema; pues, gran parte de los sedimentos marinos provenientes de diferentes fuentes, sean naturales o antrópicas, terminan depositándose en el fondo marino. Esto se genera por diversos procesos sedimentarios que dependen de condiciones físicas y químicas del ambiente marino, cuyo comportamiento serán inocuos o tóxicos para el ecosistema.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Hasta la actualidad se han desarrollado estudios en los sedimentos costeros marinos en diversos países. En el Perú, estos estudios, relacionados al índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento son prematuros, como para que contribuyan con las instituciones competentes a una mejor y efectiva gestión de los ecosistemas marinos. Por tanto, esta investigación pretende abrir una nueva brecha de conocimientos que servirá de base para futuros estudios.

Para la contrastación de la hipótesis se ha recurrido a diversos autores: por un lado, para la determinación del índice de Geoacumulación se aplicó una expresión propuesta por Müller, (1981), el cual se sustenta mediante una escala de valoración cuantitativa a los niveles de contaminación de los sedimentos (p.41); por otro lado, para la determinación del factor de enriquecimiento se usó la expresión de Sutherland, 2000, que se sustenta bajo una escala de valoración cualitativa para calificar los niveles de enriquecimiento en función de su origen (p.42). Además, los autores whedephol y Turekian reportaron compilaciones de la abundancia de los elementos en los tipos de roca comunes en la corteza terrestre. Estos datos fueron usados para los cálculos de ambos índices mencionados líneas arriba.

1.1. Planteamiento del problema

La bahía Callao es un ecosistema marino con biodiversidad. Por este motivo, cualquier agente contaminante que se introduce en este cuerpo acuático trae consigo la alteración del mismo. Por ejemplo, los metales como Hg, Cd, Pb y Cu pueden integrarse dentro del ciclo hidrológico en concentraciones intolerables y esto ocasionar alteraciones en los procesos y propiedades que puede significar un riesgo para el desarrollo de la vida acuática.

Por tanto, los metales pesados al ingresar al cuerpo marino tienden a acumularse o distribuirse en diferentes formas, siendo una ruta los sedimentos puesto que se comportan como un almacén. Esto produce, con el paso del tiempo, que estos materiales se tornen letales debido al incremento de su concentración.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Asimismo, los metales pesados aparte de encontrarse de manera natural en la corteza, son utilizados por la industria en distintas formas. Estas actividades productivas generan desechos que al ser eliminados al ambiente tienden a reaccionar y producir alteraciones que pueden llegar a ser permanentes.

La bahía Callao es cuerpo receptor de grandes cantidades de vertidos de origen industrial, municipal y otras actividades que tienen influencia en los vertimientos. Por otro lado; los ríos Rímac y Chillón también desembocan sus aguas a este cuerpo marítimo, arrastrando todo material que encuentran en su cauce.

Estos agentes mencionados llevan contenido de metales en sus vertidos en proporciones de acuerdo a la actividad que la origine; por tanto, es necesario considerar que, la permanente descarga de estas aguas a la bahía trae consigo la acumulación de metales pesados en las aguas y sedimentos.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es del índice de geoacumulación y cuál es el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en los sedimentos marinos de la bahía Callao?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en sedimentos marinos de la bahía Callao.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu en los sedimentos marinos de la bahía Callao y contrastar con la norma CEQG (Canadian Environmental Quality Guidelines, 2003).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- Evaluar la variabilidad temporal del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en los sedimentos marinos de la bahía Callao.

- Determinar las zonas de mayor vulnerabilidad de la bahía Callao mediante mapas de distribución espacial del índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en sedimentos marinos.

1.4. Hipótesis

Los sedimentos de la bahía Callao presentan niveles altos de concentración de Hg, Cd, Pb y Cu que se refleja en el índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Baggio (2019), en su tesis analizó la concentración y distribución de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) en sedimentos del fondo marino del área El Rincón, Argentina, durante la primavera de los años 2015, 2016 y 2017; y en sedimentos del área plataforma externa (transecta hasta zona de talud) durante el 2017. Los estudios realizados determinaron la existencia de variaciones temporales y espaciales en la concentración de metales.

Las diferencias halladas estarían asociadas a la dinámica del lugar (corrientes oceanográficas), influencia del estuario de Bahía Blanca, al aporte de los ríos Colorado y Negro, y el alto tráfico de embarcaciones. Los valores de Igeo indicaron que los sedimentos en su mayoría no están contaminados porque siete de los metales evaluados (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) registraron un valor por debajo de 0, con excepción del Cd, que en el 2017 presentó un sedimento no contaminado a moderadamente en el punto PM-E (Igeo = 0,091). Mientras que, para el Hg para el año 2016, los sectores CN, CS y PI presentaron contaminación de moderada a fuertemente contaminados (Igeo = 2,20; 2,34 y 2,00, respectivamente) y en el 2017 en PI dio Igeo= 0,62 (sedimento no contaminado a moderadamente contaminado) (pp. 3, 64).

Doria (2018), por su parte determinó la concentración de ocho metales pesados (cromo, cadmio, vanadio, cinc, plomo, níquel, mercurio y cobre) en

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

sedimentos marinos de seis sitios de las playas turísticas de la Guajira, Colombia para conocer los niveles de línea base y contaminación. La concentración se determinó mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica (CVAAS, GFAAS, FLAAS). Los resultados de las concentraciones oscilaron entre los siguientes valores: cromo, 0.086-0.058 mg/kg; cadmio, 0.0098-0.0028 mg/kg; vanadio, 0.046-0.829 mg/kg; cinc, 0.250-0.630 mg/kg; plomo, 0.055-0.124 mg/kg; níquel, 0.080-1.220 mg/kg; mercurio, 0.00015-0.00027 mg/kg; y cobre, 0.030-0.1 mg/kg. Además, afirma que la estimación del nivel de contaminación con el índice de geoacumulación indicó que no existe contaminación (pp. 8 – 12).

Pereyra et al., (2019), en su investigación evaluaron la calidad ambiental de la bahía San Julián, Argentina, a través de los sedimentos y el agua. Detectando que, los sedimentos mareales muestreados a 15 cm de profundidad actúan como entrampadores de los metales pesados y en función de su concentración pueden constituir zonas de contaminación relevantes. En el estudio se analizaron 39 elementos mediante digestión multiácida (ICP–OES). Los resultados obtenidos indicaron que los valores de concentración para el Pb, Cu y Zn estaban por debajo de los valores de referencia de acuerdo a la normativa nacional e internacional (CEQG) vigente. Por otro lado, los resultados del índice de geoacumulación concluyeron que la bahía presenta un ambiente no contaminado de acuerdo a las estaciones muestreadas y en comparación con los niveles basales de formaciones geológicas tradicionales (pp. 1, 8, 22).

Valdés & Castillo (2014), en su investigación midieron la concentración y distribución de Cu, Ni, Pb, V, Fe, Al y Zn en los sedimentos marinos en cuatro bahías (Caldera, Calderilla, Inglesa y Salada) de la Región de Atacama, Chile. Esto lo realizaron mediante un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu modelo 6300. Las concentraciones medias globales fueron: 76,8 mg/kg de Cu, 90,4 mg/kg de Zn, 39 mg/kg de Pb, 23,4 mg/kg de Ni, 118,5 mg/kg de V, 0,09% de Fe y 0,1 mg/kg para Al. Las muestras fueron tomadas con un mini boxcore de 225 cm.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

En su defecto, la aplicación del índice de geoacumulación y de normas ambientales de calidad de sedimentos, concluyeron que los niveles de metales medidos en estas bahías muestran un enriquecimiento incipiente y contaminación moderada, que está asociado a la actividad antrópica desarrollada en la zona, pero que, de momento, suponen un riesgo ocasional para las comunidades bentónicas (p. 1).

Valdés, Guiñez, Castillo & Vega (2014), en su investigación midieron el contenido de Cu, Pb y Zn para evaluar su enriquecimiento en sedimentos y sus eventuales procesos de biomagnificación en cadenas tróficas bentónicas de siete sectores costeros de la bahía San Jorge, Chile. Las muestras fueron recolectadas mediante buceo autónomo en la isóbata de los 10 m. El análisis se ejecutó mediante el método usado por Valdés & Castillo (2014) del contenido medio de Cu, Zn y Pb fue 103.6, 72.6 y 38.6 mg/kg, respectivamente en los sedimentos y 28.3, 32.5 y 21.9 mg/kg, respectivamente en los organismos.

El índice de geoacumulación indicó que existe algún grado de contaminación el cual varía desde no contaminado, para el caso de Cu en Coloso, Las Petroleras y La Rinconada, hasta fuertemente contaminado, para el caso de Pb en Las Petroleras; por otro lado, se detectó que hay enriquecimiento de metales en los sectores donde se realizan actividades industriales. Los autores mencionan también que durante el estudio se encontró evidencias de biomagnificación en tres de los siete sectores costeros estudiados, en donde las especies herbívoras y carnívoras fueron las que mostraron los mayores factores de transferencia de estos metales (pp. 45, 48).

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2016), realizó una evaluación ambiental de la bahía Callao, en donde se consideró 46 puntos de muestreo dentro del estudio para analizar metales totales, los cuales fueron ubicados en toda la línea de costa de la bahía usando criterios como el sistema de corrientes locales, batimetría, la ubicación de los administrados y el uso de las

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

zonas de la bahía Callao. El análisis de los resultados se desarrolló mediante una comparación con la norma internacional Canadian Environmental Quality Guide lines - CEQG, valores ISQG y PEL. Además, la presentación de resultados fue mediante el análisis de agrupación de Cluster tomando en cuenta zonas de similares características.

Finalmente, los resultados del estudio reportaron que el cobre y arsénico fueron los metales que excedieron el valor ISQG de la norma de referencia en todos los puntos de muestreo (excepto en 1 punto). Este resultado considera que, las fuentes principales de emisión, a las descargas de los ríos Rímac y Chillón, es el alto tránsito marítimo, los vertimientos de origen desconocido y los abundantes residuos sólidos presentes en el litoral de la bahía Callao. Por otro lado, los metales como Mercurio, cadmio, Zinc y plomo superaron los niveles máximos de referencia en algunos puntos de monitoreo. Por tanto, concluimos que, existen fuentes contaminantes de origen antrópico (pp. 121-123).

Guzmán (2014), en su tesis evaluó la bioacumulación de cobre total en organismos bentónicos en la bahía de Huarmey, detectando mayores concentraciones en crustáceos y moluscos de 110,70 µg/g y 108,79 µg/g respectivamente. Concluyendo que existe relación directa con las acciones naturales y antrópicas que ocurren dentro de ella, que el alto contenido de cobre en estos organismos tiene que ver con la presencia del metal en los sedimentos marinos, sedimentos de río y agua de río, que son aporte antrópico proveniente del pasivo de la mina Hércules con aporte de aguas acidas, que tienen concentraciones elevadas de metales pesados por ubicarse a 8 Km del río Huarmey (p. 4).

2.2. Bases teóricas

Los aspectos oceanográficos y antrópicos en la composición de metales, en sedimentos marinos, son requeridos para evaluar la contaminación en un escenario del mar. Es importante considerar diversos factores que influyen en la

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

movilidad y toxicidad de los contaminantes, los que podrían ser de tipo físico, químico, geográficos, entre otros.

Por ejemplo, en la bahía Callao existen una dinámica marina que se encuentra en permanente cambio que de acuerdo a Torres & Trinidad (2003), son difícilmente predecibles debido a la convergencia de diferentes movimientos de las aguas marinas, los que pueden clasificarse de manera generalizada en el oleaje, las mareas y las corrientes.

Además, PETRO-TECH, (s.f) sostiene que “dentro de una bahía o una ensenada, el sistema de corrientes responde también a otros factores como las mareas, la batimetría, los vientos locales, etc. Esto hace que las corrientes dentro de las bahías principalmente, sean muy variables y difíciles de describir”.

Por otro lado, “los estudios y observaciones sobre la convergencia o divergencia de las olas, brindan importante información sobre las condiciones de erosión, sedimentación o transporte” (GEF-ONUDI-IMARPE-IFOP, 2002, p. 11).

De acuerdo a Velazco (2001), en el área de estudio se produce el afloramiento costero con movimientos verticales que forma parte de la circulación oceánica producto de la fricción de los vientos y el efecto de Coriolis. Esto causa el desplazamiento de las aguas superficiales (aguas cálidas) de las costas por las aguas subsuperficiales (aguas frías).

Otro elemento importante a tomar en cuenta es “La Corriente Costera Peruana o Humboldt”. Su gran influencia en la vida marina (provisor de nutrientes), originado por el ascenso de aguas profundas y frías como producto de rotación terrestre y de la fuerza centrífuga de las aguas oceánicas en la zona ecuatorial que se desplazan de sur a norte en toda la costa peruana. Sin embargo, hay épocas donde estas aguas no emergen por la presencia del fenómeno El Niño (aguas cálidas) que vienen del norte, lo que genera el incremento de la temperatura en de unos 10 C°. Este fenómeno provoca mayor desoxigenación de

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

las aguas y por consiguiente la acidificación de los mismos que pone en riesgo ecosistemas que presentan altos niveles de acumulación de metales pesados (Sánchez, s.f).

La dinámica marina en es un factor esencial en los diferentes procesos de sedimentación. Velazco (2000), detectó que la mayor actividad se da en las costas al norte del río Chillón hasta ventanilla, y al sur la zona del Banco El Camotal y La Punta, debido a la confluencia de varios elementos: mezclas de aguas, corrientes, vientos, etc., haciéndolos más vulnerables a la erosión. Todo ello conlleva a que la mayor sedimentación se de en la zona de mezcla de los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas.

Por otra parte, la predominancia del movimiento de la corriente marina con dirección hacia el norte provoca el transporte de sedimentos con mayor frecuencia en zonas de la bahía mencionadas; además, en su recorrido acompañan otros procesos sedimentarios como se observan en la **figura 1**.

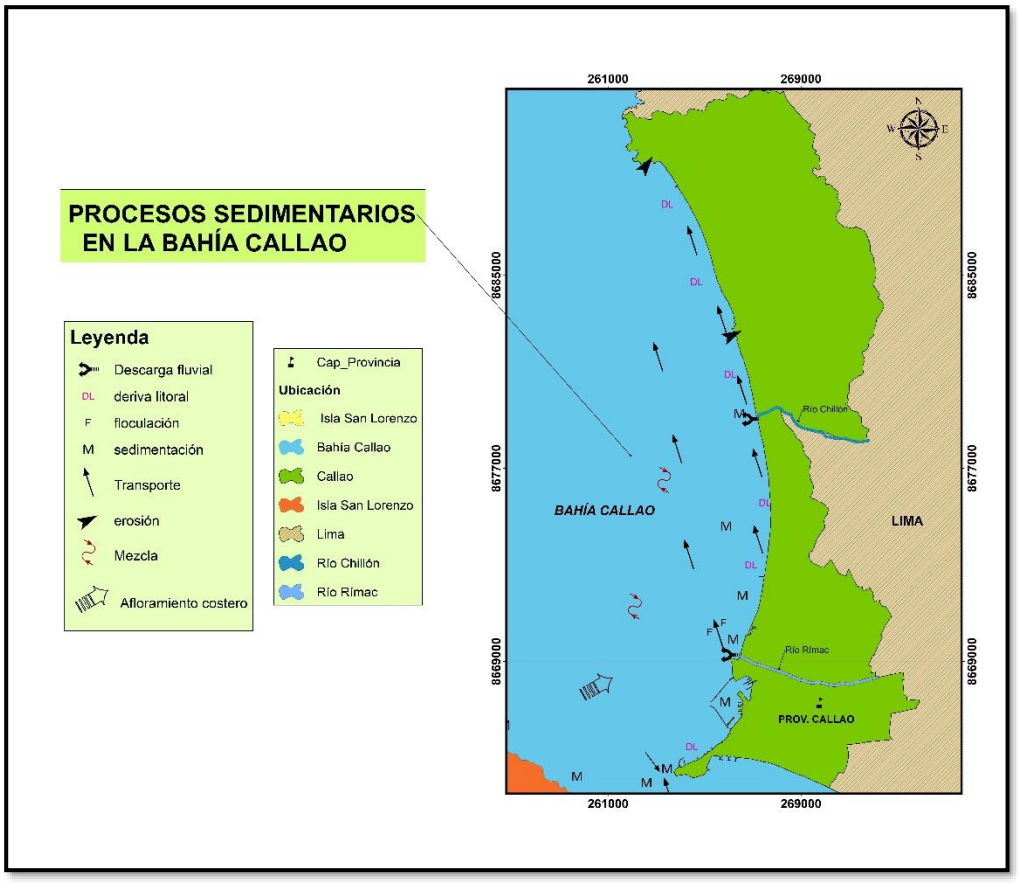
Es importante mencionar que la desembocadura de los ríos Rímac y Chillón, afectan la circulación: elevan la temperatura y disminuyen la salinidad. Según Velazco (2001): estos ríos, en su desembocadura, forman un delta submarino de poca pendiente formada por el material que transporta, lo que provoca variaciones en la configuración de la bahía a más de 80 m de profundidad donde generalmente se observa un fondo plano.

Considerando la geomorfología submarina en la bahía Callao, Velazco (2001), menciona que las rocas que forman la plataforma continental tienen similitud con los afloramientos rocosos adyacentes al continente. Además, frente a Lima y Callao, comprende rocas sedimentarias del Grupo Morro Solar del Cretácico inferior que subyacen a los depósitos del cono aluvial del río Rímac, de 150m. de espesor, que se extienden bajo el mar hasta aproximadamente la Isla San Lorenzo.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 1

Mapa de procesos sedimentarios



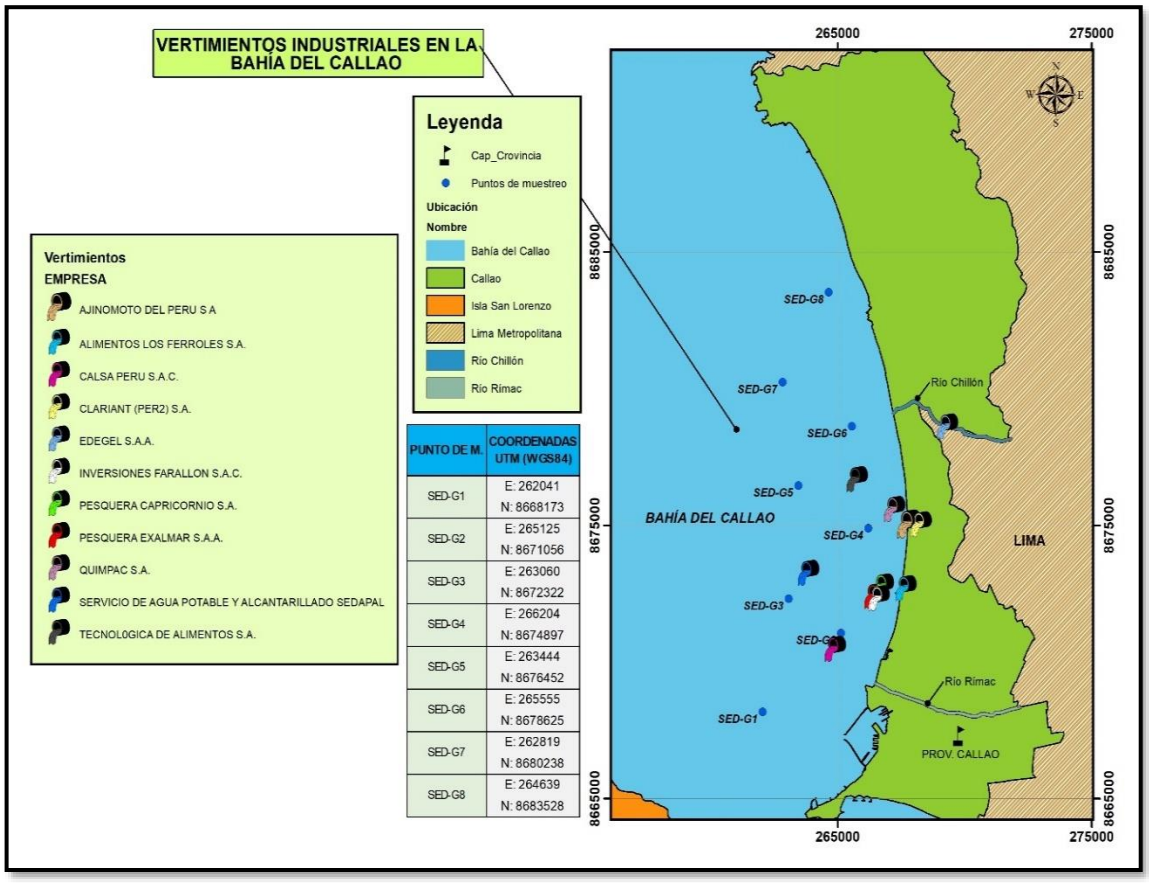
Nota: Mapa adaptado de Velazco, (2000) y GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

La contaminación de la bahía Callao, como parte de la intervención del ser humano es un factor trascendente a la hora de explicar la acumulación de metales. El más importante son los vertimientos de aguas residuales, pues en la actualidad el ANA ampara el vertimiento autorizado de sus residuos líquidos a once entidades privadas (**Figura 2**) bajo el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2018-MINAM.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 2

Mapa de vertimientos marinos



Nota: El mapa muestra a las empresas más importantes. Estas cuentan con autorización del ANA para realizar vertidos a los cuerpos de agua con resoluciones directorales vigentes. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

En este punto, los ríos Chillón y Rímac también forman parte de la contaminación de la bahía. Así Aliaga (2010), sustenta que el río Chillón arrastra residuos provenientes del lavado de tanques de embarcaciones petroleras, residuos de la refinería, La Pampilla; además de los desperdicios del terminal pesquero y plantas procesadoras. Asimismo, señala que la presencia de metales en el agua está asociados a las plantas de fundición informales donde se arroja

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

los residuos de escoria al río Chillón, botadero de curtiembres, así como los botaderos de residuos sólidos.

Un caso similar es el del río Rímac, lo cual Aliaga, Quevedo y Alfaro (2019) señalan que se encuentran contaminados debido a las diferentes actividades productivas desarrolladas a lo largo de la cuenca: la minería, la industrial, la agricultura, actividades de saneamiento, residuos sólidos, entre otras que tienen como destino la bahía Callao.

En la bahía Callao se realizan diversas actividades: la pesca artesanal, uso recreacional y demás actividades que generan una interacción permanente entre el cuerpo marino y el ser humano. Por ello, el ANA realizó la clasificación del cuerpo de agua marino costero en el Perú, mediante la RESOLUCIÓN JEFATURAL Nº030 – 2016 – ANA, el cual la bahía Callao presenta 3 categorías el cual se aprecia en la **figura 3**.

Un punto importante a la hora de estudiar contaminantes en sedimentos marinos es partir por identificar el origen del material que sedimenta en el ambiente marino. Esto puede originarse en el continente o en el océano, lo que posteriormente son inducidos al proceso de sedimentación a mediante diversos factores que inducen, tal como se observa detalladamente en la **figura 4**.

Muchos autores coinciden al identificar de manera general el origen natural de los sedimentos. Por ejemplo, García & Maza (1998), señalan que los movimientos naturales de los terrenos como el deslizamiento de grandes masas de tierra y rocas ayudan a que mucho material quede suelto y sin protección, que con el transcurso del tiempo por acción de la lluvia y vientos son acarreados hacia las corrientes.

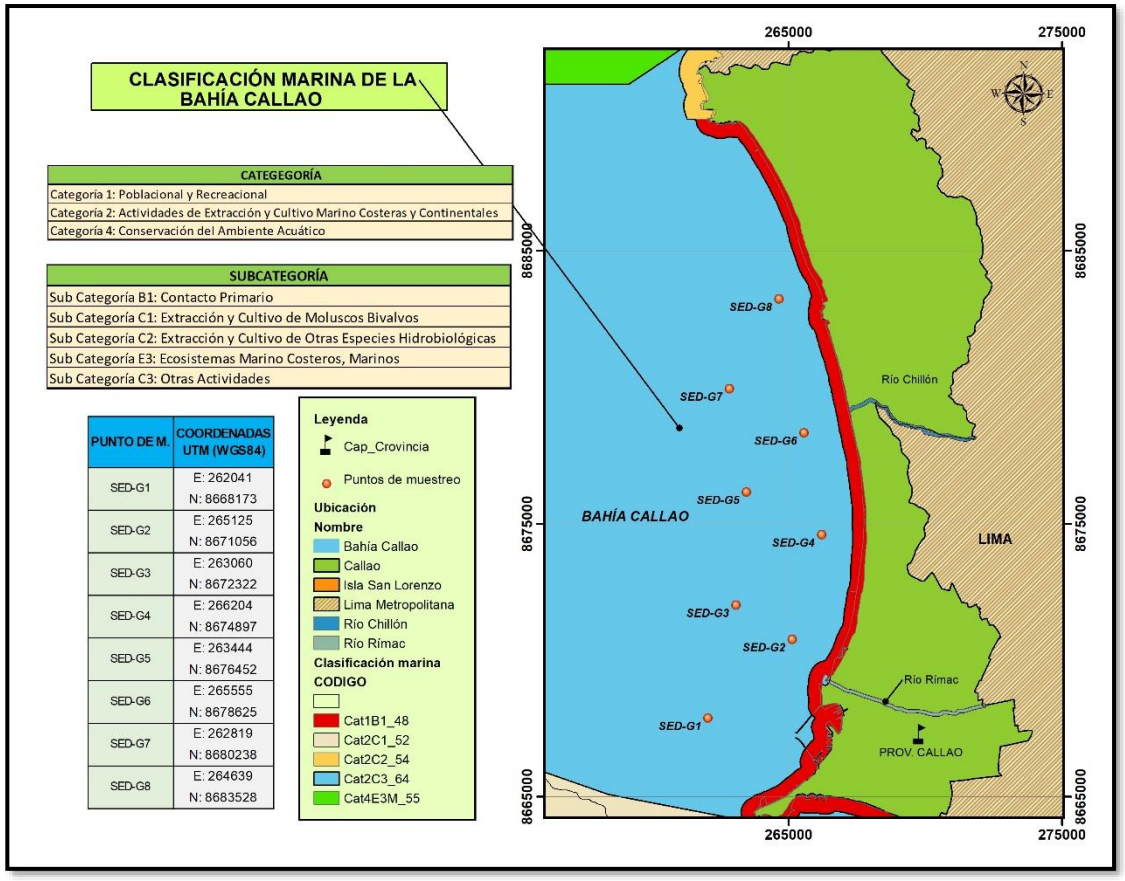
De acuerdo a Valdés & Castillo (2014) una parte importante del sedimento acumulado en el fondo del océano es producida en la capa de agua superficial, mediante la fotosíntesis, es por esto que en los ambientes de alta productividad

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

predomina la materia orgánica autóctona. Otra parte puede ser originado sobre el continente y estar constituido, tanto de restos de minerales como de materia orgánica, principalmente vegetal. En este punto, los desechos urbanos e industriales (sólidos y líquidos) son un factor fundamental debido a que contienen mucha carga material que tienen destino a los cuerpos de agua.

Figura 3

Mapa de clasificación marina

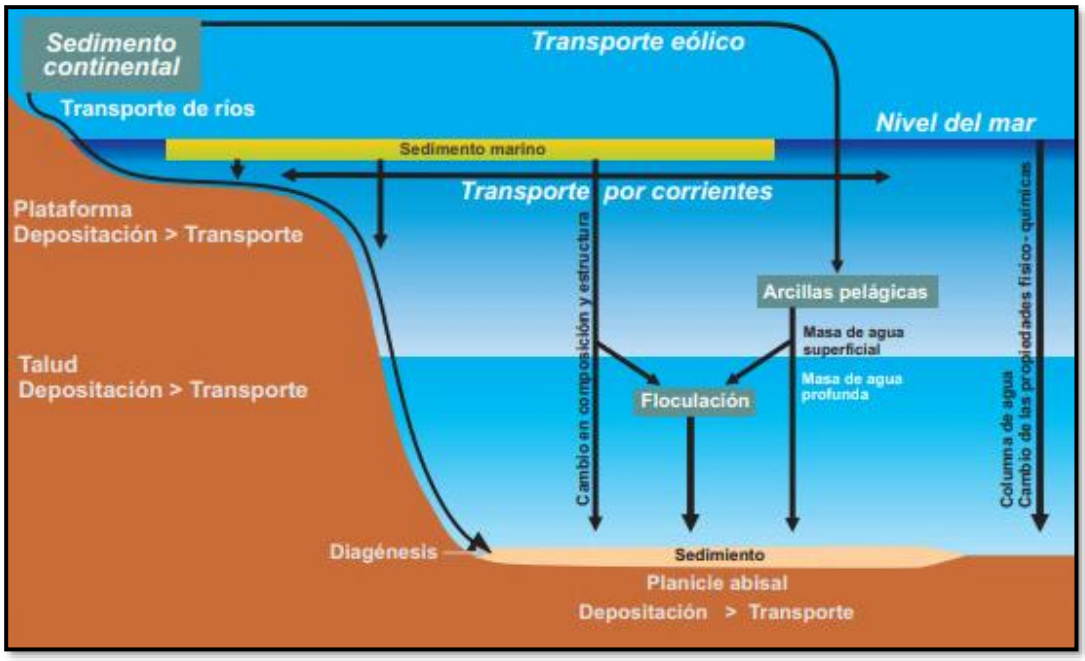


Nota: La clasificación marina y de acuerdo al mapa muestran las diferentes interacciones de la población con la bahía Callao en sus actividades cotidianas. Adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 4

Factores involucrados en el proceso de sedimentación marina



Nota: tomado de Valdés, (s.f).

Es importante tener en cuenta que existen diferentes tipos de sedimentos en los ambientes marinos. Un factor relevante es su composición, pues hará que la retención y acumulación de metales sea diferente. Por ello, Velazco (2001) identificó que la bahía Callao está compuesta principalmente por rocas sedimentarias y que las zonas más profundas y alejadas de la costa presentan sedimentos de grano fino, con textura limo arcillosa y arcillo limosa, pero que también pueden encontrarse cerca de la costa.

Los procesos de sedimentación están condicionados por el cambio y la actividad entre las diferentes masas de agua presentes. La sedimentación mecánica es uno de ellos: ocurren en las desembocaduras de los ríos Rímac y Chillón. Esto se debe a la pérdida de fuerza de transporte que se van depositando como sedimentos terrígenos en forma de prodelta, los que a su vez su formación y prolongación dependen del caudal de los ríos que pueden variar en época de

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

lluvias y estiaje. La fracción más fina son transportados hacia partes más centrales y profundas para mezclarse con otro material suspendido donde floculan y se depositan en un ambiente típico de la bahía (Velazco, 2001)

Por otro lado, Rosas (2005), sustenta que la sedimentación por acción físico-química ocurre debido a la variación de las condiciones físico-químicas del agua (salinidad, temperatura, pH, etc.). Esto ocasiona la floculación de parte de los materiales más finos transportados en suspensión por los ríos y por descargas municipales, domésticas e industriales.

La importancia que tiene el estudio de metales pesados en sedimentos se debe a su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos. Además, cabe precisar que sus efectos tóxicos no pueden detectarse fácilmente a corto plazo. Esto hace que tengan mayor incidencia a mediano y largo plazo. Los metales son difíciles de eliminar del medio, además, son fácilmente absorbidos por los organismos y más al encontrarse en su forma iónica (Rosas, 2005).

Es importante mencionar que los metales pueden sufrir diferentes cambios por procesos fisicoquímicos lo que hace que se encuentren disponibles bajo diversos tipos de especiación como iones libres, compuestos de sales metálicas solubles o insolubles, óxidos metálicos, carbonatos e hidróxidos tal como lo menciona (Cabrera, 2018).

Por otra parte, el comportamiento ambiental de los metales de acuerdo a Álvarez et al. (2011), depende críticamente de su forma química influyendo en la biodisponibilidad y toxicidad para los organismos. En el caso de los sedimentos, los metales pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación. Esto se debe a que no se quedan permanentemente y pueden ser liberados a la columna del agua por diversos cambios ambientales, tales como: pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos o, al ser ingeridos por los organismos bentónicos con las partículas de materia orgánica, pudiéndose

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

acumular y mover a lo largo de la cadena trófica. Por ende, estos factores influyentes se señalan a continuación:

- El pH puede influir fuertemente en la adsorción o liberación de cationes (desorción) por las sustancias orgánicas debido a su carácter anfótero, esto implica que a menor pH se produce un incremento en la toxicidad de los metales (Rovira, 2016).

- El potencial REDOX influye sobre los fenómenos de especiación metálica debido a que diferentes valencias del mismo elemento pueden provocar distintas toxicidades diferentes grados de bioasimilación (Rovira, 2016).

- Los iones inorgánicos (cationes y iones) en el agua tienen una gran influencia sobre la toxicidad de los metales debido, por ejemplo, a la formación de carbonatos insolubles o a la adsorción sobre carbonato cálcico (Rovira, 2016).

- Los minerales de arcilla y los hidróxidos de metales también influyen en la toxicidad. Este material posee superficies con cargas predominantemente negativas compensadas por cationes, las cuales pueden ser desplazados por otros existentes en el ecosistema, donde los metales pesados pueden ser extraídos (Rovira, 2016).

- La materia orgánica soluble y particulada puede alterar la distribución de los metales pesados. Es consecuencia de una disminución en los niveles disueltos y un aumento de la concentración de metales en forma coloidal y en suspensión, así como en los sedimentos (Rovira, 2016).

- También la actividad metabólica de los microorganismos influye en la movilidad de los elementos tóxicos en el medio ambiente, debido a la acción de algunas cepas bacterianas o a la de algunos organismos bentónicos detritívoros, como los gusanos tubificidos, incorporándose metales que

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

serían tóxicos y bioasimilables para la biota de niveles tróficos superiores (Rovira, 2016).

Del mismo modo, Pérez (2015), sostiene que una vez que los metales entran en los ecosistemas acuáticos pueden ingresar a las cadenas alimenticias, a través de procesos de bioacumulación, bioconcentración y biomagnificación. Además, sostiene que estos pueden transformarse a través de procesos biogeoquímicos y distribuirse entre varias especies (material particulado, coloidal, especies disueltas) con distintas características físico-químicas.

- **Mercurio**

  Las formas naturales predominantes de mercurio en el agua son el mercurio elemental (Hg^0) y los iones mercúricos (Hg^{+2}); por otro lado, el cinabrio (HgS) es común en los suelos mineralizados y los sedimentos anaeróbicos. Las principales transformaciones químicas y biológicas que el mercurio sufre son metilación, desmetilación y reducción de Hg^{+2} a Hg0 (D´Itri, 1992).

  Los sedimentos en condiciones anaeróbicas permiten que los compuestos de mercurio precipitados se conviertan en sulfuro mercúrico (HgS), y otra fracción puede estar unido a la materia orgánica. En ambos casos son más estables y reducen su liberación a la columna de agua. (Fagerstrom y Jernelov, 1971).

  En condiciones aeróbicas, el HgS se puede reducir a sulfato (SO_4^{-2}), que es más soluble, de manera que el Hg^{+2} se encuentra disponible para ser metilado por los microorganismos (Fagerstrom y Jernelov, 1971).

- **Cadmio**

  El cadmio se halla en el ambiente como producto secundario; por ejemplo, dentro de los depósitos de Zinc en su forma más común: el sulfuro (CdS). Otra forma de presentarse el cadmio es en los hidróxidos, cloruros y iones complejos con grupos amonio y cianuro. Su movilidad depende del pH y el potencial redox principalmente (Rovira, 2016).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Así mismo, la solubilidad de sus compuestos en el agua depende fundamentalmente de su acidez y por la baja solubilidad de sus complejos húmicos (D'ltri, 1992).

- **Plomo**

  Rovira (2016), señala que el plomo en el medio acuático a un pH comprendido entre 7 y 9 se encuentra como ion libre divalente Pb^{2+} y como carbonato disuelto $PbCO_3$. Además, en presencia de sulfatos se forma la sal soluble $PbSO_4$ y con el ión OH^- forma complejos estables, principalmente $PbOH^+$. También, considera que el plomo tiende a concentrarse en sedimentos con grandes cantidades de arcilla y materia orgánica y que su enriquecimiento puede aumentar por la precipitación, por los recubrimientos metálicos, por su incorporación en estructuras cristalinas y en materia orgánica. Asimismo, la porción insoluble en agua tiende a precipitar en el sedimento para formar compuestos de poca solubilidad, lo que tiene poco muy efecto en las aguas.

- **Cobre**

  Rovira (2016), menciona que en los ecosistemas acuáticos el cobre puede aparecer asociado a diferentes fracciones:

  - en solución, como ion cúprico o acomplejado (carbonatos, cianuros, aminoácidos, polipéptidos, sustancias húmicas),

  - en sedimentos suspendidos, en forma de precipitados (hidróxidos complejos, fosfatos, sulfuros), o sorbido sobre otras partículas y,

  - en sedimentos profundos, precipitado o sorbido sobre otros materiales.

  D'ltri (1992), precisa que la solubilidad, movilidad y biodisponibilidad del Cu en los sedimentos dependen fundamentalmente del valor del pH. Del mismo modo Adriano (1986), indica que la biodisponibilidad del Cu se reduce

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

drásticamente en los sedimentos a pH por encima de 7 y es fácilmente disponible por debajo de pH 6; además, argumenta que la materia orgánica tiene incidencia alta: debido a la capacidad de adsorción de Cu; así mismo, los óxidos de Fe – Mn, son los principales responsables de la fijación de metales pesados como el Cu.

Por otro lado, dentro del estudio de los metales en los sedimentos marinos, existen herramientas de evaluación de contaminación; estos permiten discernir la naturaleza de un ambiente marino y con ello precisar la presencia de contaminantes. En este caso, el índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento son dos herramientas valiosas para tales estudios.

En términos similares Pérez (2015), sostiene que los estudios de metales pesados en sedimentos proporcionan información valiosa sobre el grado de enriquecimiento o contaminación que ha sufrido el medio, esto implica que el estudio de los sedimentos en un ecosistema acuático permite una evaluación completa de una contaminación del sitio, ya que estos metales en su mayoría terminan precipitándose como destino final para formar parte de los sedimentos.

Además, “El enriquecimiento de una serie de sustancias químicas ambientales y materiales de desecho poco solubles y degradables se denomina geoacumulación y se utiliza para favorecer el enriquecimiento de sustancias en la biosfera: bioacumulación” (Müller, 1986).

Existen muchas metodologías para evaluar los niveles de contaminación de sedimentos por metales pesados; dentro de ellas, el índice de geoacumulación es una, la cual permite categorizar el grado de contaminación bajo una escala establecida haciendo una relación de concentraciones del metal en una muestra y en la corteza de manera natural (Müller, 1981).

Álvarez et al., (2011) señala que en el estudio de la acumulación y enriquecimiento de metales pesados en los sedimentos se emplean técnicas de

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

normalización geoquímica las cuales permiten determinar el enriquecimiento del sedimento en relación al metal, el grado de contaminación e incluso la toxicidad del sedimento.

Por otro lado; además del grado o nivel de contaminación, muchos investigadores optan por determinar las causas o el origen del aporte de metales al cuerpo acuático que son causantes de la acumulación. Para ello, se aplica el factor de enriquecimiento. Esto, al igual que el índice de geoacumulación, relaciona valores de concentración de metales en relación a sus valores de base existentes en la corteza terrestre; con la finalidad de detectar niveles de enriquecimiento y su origen (Sutherland, 2000).

El índice de geoacumulación es una propuesta hecha por Müller (1981) para medir la calidad del sedimento que bien puede ser usado para suelos.

Este índice de geoacumulación (Igeo) es una medida de la cantidad de contaminación de un sedimento o suelo con trazas y sustancias de desecho inorgánicas u orgánicas ambientalmente relevantes y con bioelementos. Establece la concentración actual en relación con concentraciones precisas de valores de referencia que resultan de una supuesta distribución global uniforme de estas sustancias (Müller, 1981).

Así mismo, el autor precisa que el índice de geoacumulación permite evaluar cuantitativamente la contaminación de los sedimentos marinos por metales pesados, categorizando así el grado de contaminación de los sedimentos desde no contaminados a fuertemente contaminados. Todo esto mediante una escala establecida que va desde el 0 al 7, precisados en la **tabla 1**. Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Igeo} = \boldsymbol{Log_2}\left(\frac{\boldsymbol{Cn}}{\mathbf{1.5}\boldsymbol{Bn}}\right)$$

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Donde: Cn es la concentración del elemento examinado, Bn la concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre) y 1.5 es el factor de corrección de efectos litogénicos.

Tabla 1

Clasificación del índice de geoacumulación y grado de contaminación

CLASES DE Igeo	GRADO DE CONTAMINACIÓN
Igeo ≤ 0	No contaminado
0≤ Igeo ≤1	No contaminado a moderado
1≤ Igeo ≤2	Moderadamente contaminado
2≤ Igeo ≤3	Moderado a fuertemente contaminado
3≤ Igeo ≤4	Fuertemente contaminado
4≤ Igeo ≤5	Fuerte a extremadamente fuerte contaminado
5 ≤ Igeo	Extremadamente fuerte contaminado

Nota: clasificación propuesta por Müller, (1981)

Con respecto al enriquecimiento de metales en los sedimentos marinos Sutherland (2000), considera que con el factor de enriquecimiento es posible distinguir entre origen natural o antropogénico de los metales presentes en los sedimentos evaluados de acuerdo a una escala de valoración propuesta, que es contrastado con los resultados luego de aplicar la siguiente fórmula:

$$FE = \left[\frac{(\frac{Me}{Fe})_{sedimento}}{(\frac{Me}{Fe})_{corteza}} \right]$$

Donde:

$(Me/Fe)_{sed}$: Razón entre el metal X y el Fe presente en la muestra. $(Me/Fe)_{corteza}$: Razón entre el metal X y el Fe presente en la corteza terrestre. Se considera al Fe como elemento normalizador por ser el

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

elemento más abundante de la corteza terrestre de acuerdo a reportes de Turekian y Wedepohl.

De acuerdo a Morales (2019), el cálculo de los factores de enriquecimiento de elementos en las muestras se basa en la normalización del elemento medido contra un elemento de referencia. Todavía no existe una regla bien establecida para la elección de un elemento de referencia, excepto que no debería verse afectado por factores artificiales. Por este motivo, la presente investigación optó por considerar al hierro como elemento normalizador por ser un elemento abundante en la naturaleza y tiene menor fuente antropogénica.

Tabla 2

Clasificación del factor de enriquecimiento de un metal pesado

CLASES DE FE	CALIDAD DEL SEDIMENTO
FE < 2	Existe enriquecimiento mínimo
2 < FE < 5	Existe enriquecimiento moderado
5 < FE < 20	Existe enriquecimiento significante
20<FE<40	Enriquecimiento muy alto
40 < FE	El enriquecimiento es extremadamente alto

Nota: clasificación propuesta por Sutherland, (2000)

Es preciso indicar que dentro de la distribución y acumulación de metales en los sistemas acuáticos existen regulaciones ambientales que permiten establecer niveles de tolerancia por los cuales un metal no puede causar efectos negativos. Por ende, a falta de una reglamentación en el Perú sobre los estándares de calidad permitidos en metales pesados en sedimentos acuáticos, una buena alternativa es la norma internacional “Valores Guías de Calidad Ambiental Canadiense – sedimentos de cuerpos de agua continental-CEQG” el cual es ampliamente usada por muchos investigadores a nivel internacional, presentados en la siguiente tabla.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 3

Valores consensuados para Hg, Cd, Pb, y Cu en sedimentos marinos según CEQG

	CEQG*	
	ISQG	**PEL**
Hg (mg/kg)	0.13	0.70
Cd (mg/kg)	0.70	4.20
Pb (mg/kg)	30.20	112
Cu (mg/kg)	18.7	108

Nota:

*Canadian Environmental Quality Guidelines, 2001 (Valores Guías de Calidad Ambiental Canadiense – sedimentos de cuerpos de agua continental).

*ISQG (Interim Sediment Quality Guideline), Valor guía interino de la calidad de sedimento: concentración por debajo el cual no se presenta efecto biológico adverso.

*PEL (Probable Effect Level), Nivel de efecto probable: concentración sobre la cual se encuentran efectos biológicos adversos con frecuencia.

Tanto el ISQG como el PEL son dos umbrales que permiten identificar cuán tóxico representa un metal y los posibles efectos en animales y plantas marinas que produce al acumularse en cantidades importantes dentro de los sedimentos.

Por otro lado, hasta la actualidad se han publicado varias tablas de la abundancia de la corteza de los elementos, ya sea como parte de tratados sobre la geoquímica de los elementos o como instrucciones para compilar una lista para uso general. Entre ellos, los autores Turekian & Wedepohl (1961), eligieron tres grupos principales para la presentación de los datos, categorizándolos como; rocas ígneas, rocas sedimentarias y sedimentos de aguas profundas.

Así mismo, Vinogradov (1956), green (1959) y Turekian & Wedepohl (1961), proporcionaron valiosas compilaciones de la abundancia de los elementos en los tipos de roca comunes. De ello se desprende la **tabla 4,** es un resumen que muestra la abundancia de los metales en estudio (Cd, Cu, Pb, Hg), que principalmente son aportes extraídos de Turekian y Wedepohl.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 4

Abundancia de Cd, Cu, Pb, Hg en la corteza

DISTRIBUTION OF THE ELEMENTS IN THE EARTH´S CRUST (Expressed in parts per million)											
Element	Symbol	Igneus rocks				Sedimentary rocks				Deep-sea sediments	
		Ultrabasaltic	Basaltic rocks	Granitic rocks		Syenites	Shales	Sandstones	Carbonate	Carbonate	Clay
				High Calcium	Low calcium						
Mercurio	Hg	0.0X	0.09	0.08	0.08	0.0X	0.4	0.03	0.04	0.0X	0.X
Cadmio	Cd	0.X	0.22	0.13	0.13	0.13	0.3	0.0X	0.035	0.0X	0.42
Plomo	Pb	1	6	15	19	12	20	7	9	9	80
Cobre	Cu	10	87	30	10	5	45	X	4	30	250
Hierro	Fe	94,300	86,500	29,600	14,200	36,700	47,200	9800	3800	9000	65,000

* In some cases, only order of magnitute estmates could be mades. These are indicated by the symbol X
A: These elements are the basic constituents of the biosphere, hydrosphere, and atmosphere. Oxígeno is also de most important element of the lithosphere, whereas carbon is important in sedimentary rock.

Nota: valores recopilados por Turekian y Wedepohl, 1961

En consideración al ámbito de estudio la bahía Callao se encuentra ubicada en la costa central del Perú, en el departamento de Lima, ocupando una extensión de aproximadamente 148,57 Km2. Está delimitada en el sur por el distrito de la Punta en alineamiento con las islas San Lorenzo y el Frontón hasta los 12° 08' de latitud sur, en el norte por la playa Bahía Blanca en Ventanilla hasta los 11 ° 52' latitud sur, por el oeste con el océano pacífico y por el este la zona de playas que se encuentran dentro de los distritos del Callao, Ventanilla y la Punta. (Velazco, 2001).

Cabe señalar que las razones principales de tomar la bahía Callao como objeto de investigación reside en la importancia que posee como cuerpo marino y ecosistémico; además de la biodiversidad existente. También porque en esa zona se encuentra ubicado el puerto marítimo más grande del país y uno de los más importantes de Latinoamérica en tráfico y capacidad de almacenaje (Puerto del Callao, 2021).

Otra de las razones reside, como se ha mencionado anteriormente, en que la bahía es receptora de efluentes y residuos sólidos, así como la desembocadura

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

de los ríos Rímac y Chillón. De cualquier modo, todas estas acciones mencionadas llegan a tener influencia directa en el mar; por tanto, es importante realizar periódicamente investigaciones en el cuerpo marino para detectar comportamientos extraños a tiempo y, con ello, considerar medidas que mantengan el equilibrio. La **figura 5** enmarca a mejor detalle la ubicación del área de estudio.

Considerando el clima en la costa frente al Callao y Ventanilla de acuerdo Velazco (2001), está definido como subtropical desértico. Según la información proporcionada por Weather Spark (s.f) posee una temperatura que varía desde los 15 °C a 27 °C. La humedad relativa llega en época de invierno a un 90%, además de tener una escasa precipitación llegando a un 11mm al año. Los vientos son variados dependiendo la época que puede llegar a 14,8 kilómetros por hora en los meses más ventosos (invierno). Finalmente, la presión atmosférica es de 1012 hP en promedio.

Los siguientes datos que se presentan son el resultado de reportes históricos realizados por el IMARPE, los que representan el comportamiento durante los últimos 10 años.

- **El pH:** el pH del agua de mar varía entre 7,6 y 8,4. Son aguas ligeramente alcalinas debido a la presencia de iones (HCO_3^-), iones carbonato (CO_3^{2-}) y ácido carbónico (H_2CO_3).

- **temperatura:** presenta un gradiente térmico que varía desde los 16 °C a 20 °C en promedio, considerando las épocas del año.

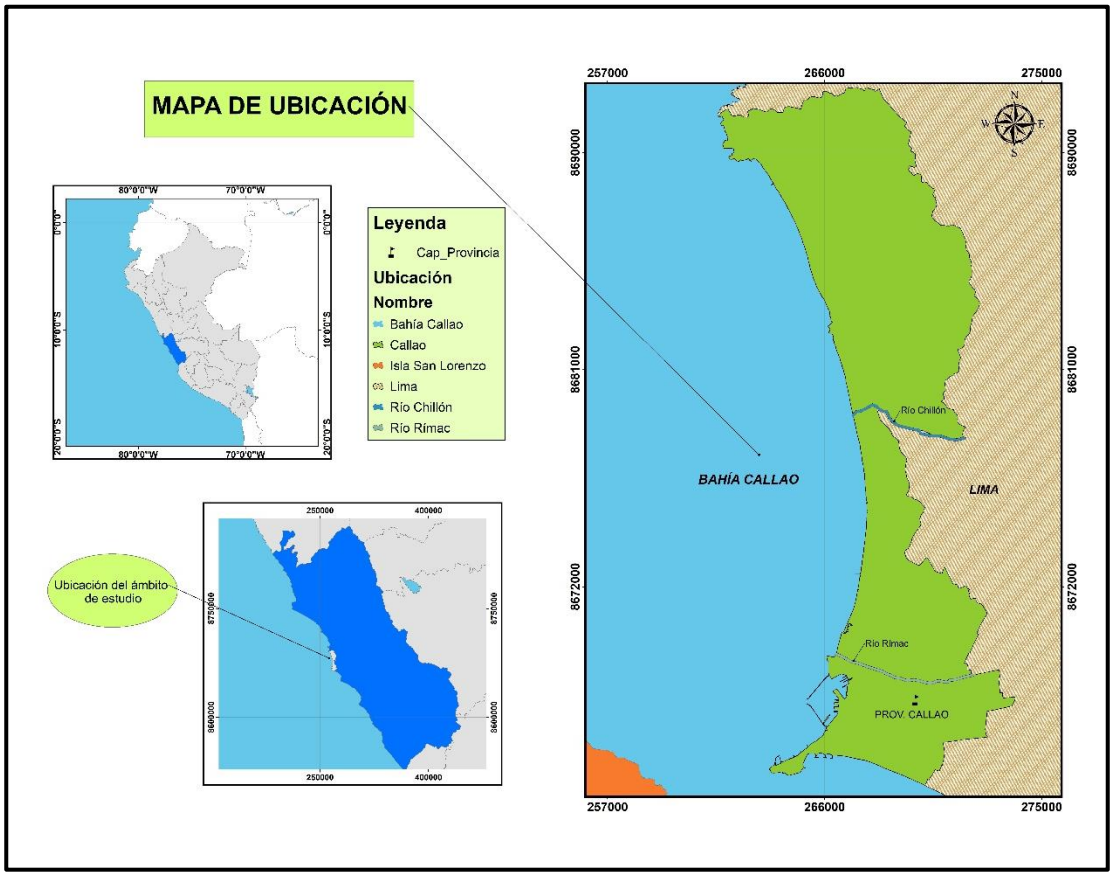
- **Oxígeno disuelto:** el contenido de oxígeno disuelto varía entre 0 y 8,5 ml/L con un valor medio entre 1 y 6 ml/L. de acuerdo a la variación de la profundidad.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- **Salinidad:** la salinidad del mar peruano presenta concentraciones de 33,2 a 35,6 UPS en verano, y de 33,8 a 35,4 UPS en invierno

Figura 5

Mapa de ubicación del ámbito de estudio



Nota: adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

2.3. Definición de términos

- **Contaminación ambiental**

Se trata de un proceso y del resultado de acciones concretas que afectan el ambiente, a partir de residuos principalmente de la actividad social, tanto doméstica como industrial (Tovar, 2000).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- **Contaminación marina**

  Consiste en la introducción por el hombre, directa o indirectamente, sustancias o energía en el medio marino, incluidos los estuarios, que produzca o pueda generar efectos nocivos, tales como daños a los recursos vivos y a la vida marina, peligros para la salud humana, obstaculización de las actividades marítimas, incluidos la pesca y otros usos legítimos del mar, deterioro de la calidad del agua del mar para su utilización y menoscabo de los lugares de esparcimiento (MPAFRE 2000).

- **Dinámica marina**

  Es el movimiento de las aguas marinas generalmente influenciado por los vientos. Los movimientos en mención son oleajes, mareas y corrientes, los cuales permiten modelar la morfología de las costas (Guzmán, 2014).

- **Especiación química**

  Proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada (Hlavay et al. 2004).

- **Agua residual**

  Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que, por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

- **Contaminante**

  Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o periodo de tiempo, pueda

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

constituir un riesgo a las personas, a la calidad de vida a la población, a la preservación de la naturaleza o conservación del patrimonio ambiental (Tovar, 2000).

- **Índices de calidad**

Un índice medioambiental se define como un modelo aplicado para medir el estado actual y las tendencias en condiciones físicas, químicas o biológicas del medio ambiente. (Cabrera, 2018).

- **Indicios de contaminación**

Son circunstancias o signos suficientemente acreditados que permiten inferir de forma preliminar la posible existencia de un sitio contaminado (D.S N°012-2017-MINAM).

- **Bio acumulación**

Ocurre en los organismos cuando se exponen a un contaminante químico, y que consiste básicamente en su acumulación en el interior del cuerpo (Estival, 2019).

- **Bio magnificación**

Aumento sucesivo de los niveles de contaminantes químicos persistentes según se sube de nivel trófico (Estival, 2019).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

Tras la revisión de la literatura y/o fuentes de información existente sobre el tema y según ejecución de la investigación, la investigación es de tipo descriptivo. Su enfoque es de tipo cualitativa, pues se han utilizado datos e información secundaria para conocer y evaluar las características del medio receptor. Por otro lado, es de tipo cuantitativa y correlacional: se ha comparado más de una variable durante los ensayos fisicoquímicos para conocer las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu, así como durante la determinación del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento en los sedimentos entre ambos muestreos. Además, se ha considerado la prueba estadística de Tukey aplicada a las variables.

3.2. Diseño de investigación

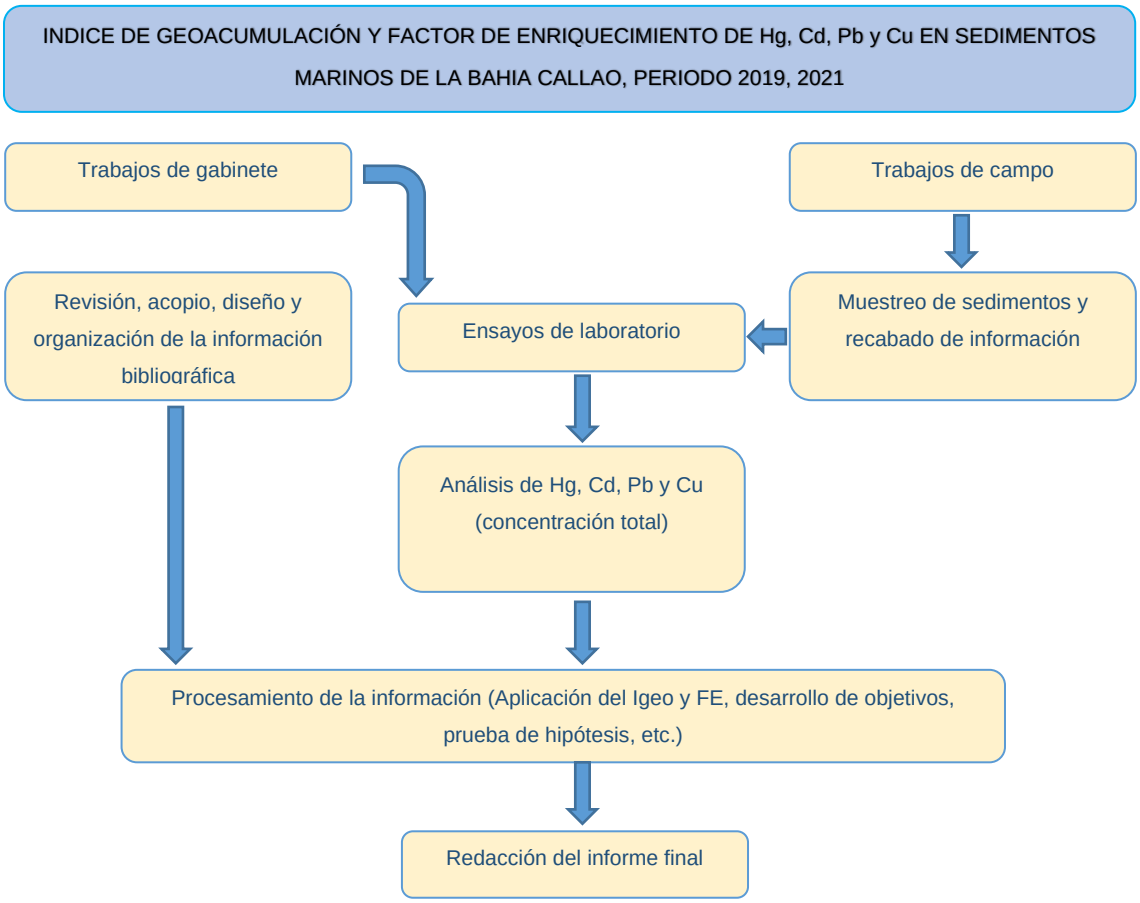
3.2.1. Etapas del diseño

La investigación estuvo distribuida en etapas: cada una constó de actividades particulares que al final se adhirieron para procesar la información final. En el siguiente esquema se resume el diseño de la investigación.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 6

Diagrama del proceso de investigación



a) Etapa de gabinete

En la etapa de gabinete se aplicó la revisión documental para el acopio de la información provenientes de fuentes primarias y secundarias. La información estuvo conformada por artículos científicos, tesis, fichas técnicas y textos académicos recopilados de diferentes bases de datos como bibliotecas, internet y otros. Por otra parte, esta etapa también fue un espacio de planificación para los trabajos a realizarse en campo.

- Ubicación y selección de los puntos de muestreo

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Para la ubicación de los 8 puntos de muestreo se consideró el método sistemático de acuerdo a la EPA-823-B-01-002, 2001. Este método nos permitió abarcar eficazmente el área de estudio en forma uniformizada con el objetivo de detectar los puntos o zonas con mayor vulnerabilidad.

La distribución homogénea de los puntos de muestreo se aplicó en un transecto lineal intercalado que consta de 6km de ancho y 20 km de largo a nivel de toda la bahía. Utilizamos como herramienta el software Google Earth plus, para identificar las zonas de distribución preliminar de los 8 puntos con sus respectivas coordenadas en unidades UTM.

Tabla 5

Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo, bahía Callao

CODIGO DE PUNTOS DE MUESTREO	COORDENADAS UTM (WGS84)	
SED-G1	E: 262041	N: 8668173
SED-G2	E: 265125	N: 8671056
SED-G3	E: 263060	N: 8672322
SED-G4	E: 266204	N: 8674897
SED-G5	E: 263444	N: 8676452
SED-G6	E: 265555	N: 8678625
SED-G7	E: 262819	N: 8680238
SED-G8	E: 264639	N: 8683528

Considerando que el lecho marino no es uniforme en toda su dimensión, se tuvo en cuenta dos líneas paralelas a 2 km y 5 km alejados de la costa en toda la bahía. Consideramos que a estas distancias el rango de profundidad corresponde a las isobatas de 20 m y 30 m según la carta batimétrica de la DIHIDRONAV y aportaciones del “Estudio oceanográfico de la bahía Callao – Ventanilla y zonas de influencia”.

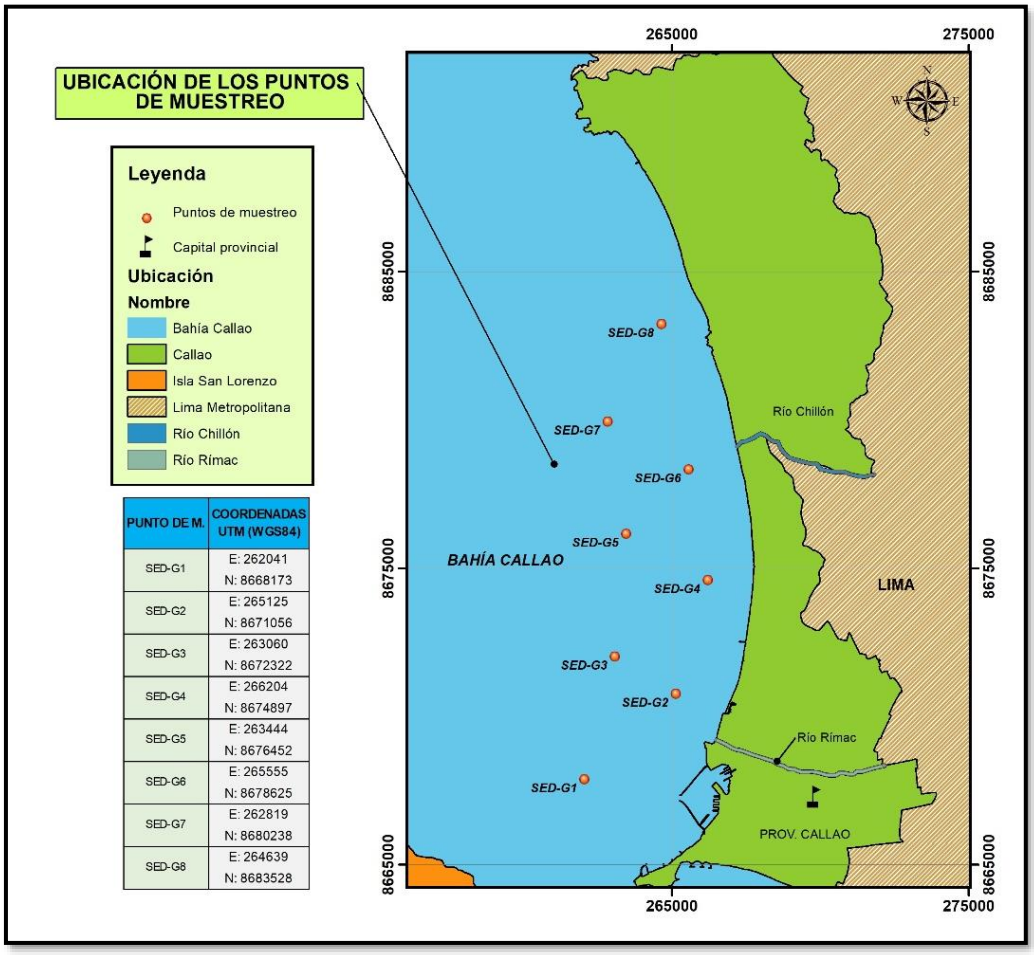
Durante el primer muestreo se reubicaron los puntos de extracción de las muestras establecidas en gabinete mediante un GPS, ajustándose a los

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

criterios de campo el cual, también fueron usados para la segunda época de muestreo (**tabla 5**).

Figura 7

Mapa de puntos de muestreo



PUNTO DE M.	COORDENADAS UTM (WGS84)
SED-G1	E: 262041 N: 8668173
SED-G2	E: 265125 N: 8671056
SED-G3	E: 263060 N: 8672322
SED-G4	E: 266204 N: 8674897
SED-G5	E: 263444 N: 8676452
SED-G6	E: 265555 N: 8678625
SED-G7	E: 262819 N: 8680238
SED-G8	E: 264639 N: 8683528

Nota: representación de los 8 puntos de muestreo usando el método sistemático de acuerdo a EPA-823-B-01-002, 2001. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

b) Etapa de campo

Esta etapa consistió principalmente en la ejecución del muestreo de sedimentos en los ocho puntos establecidos para el estudio, junto con la toma de datos complementarios requeridos para los ensayos de laboratorio. Durante todo el proceso de muestreo se utilizó como guía de trabajo el protocolo otorgado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA-823-B-01-002). Los trabajos de campo fueron gestionados bajo un itinerario especifico (Anexo 1) el cual, consistió desde las coordinaciones con las partes involucradas. El traslado a la zona de estudio con los materiales y equipos necesarios, seguido de la recogida de datos de campo y muestreo en los puntos asignados para la evaluación y finalmente, el transporte de las muestras al laboratorio.

- Consideraciones técnicas en el muestreo

Se realizaron 2 muestreos en fechas diferentes para cada punto establecido. Los intervalos fueron de 4 meses entre cada fecha de muestreo. La recolección de las muestras se realizó durante las estaciones de invierno y primavera, correspondientes a los meses de junio a noviembre de 2019. Para nuestra investigación se acudió a un itinerario planteado en gabinete como guía para facilitar el desarrollo del trabajo en campo, el cual se adjunta en el anexo 6. Para ello se contrató una embarcación de tipo mediano debidamente certificada para la actividad de navegación y contratada localmente.

Se tomaron las muestras de todos los puntos seleccionados de la zona de estudio (100 g. de muestra por cada punto) en un solo día y en las fechas correspondientes 23/07/2019 y 05/11/2019. Se extrajo como muestra de sedimentos una cantidad de 100 gramos por cada punto de monitoreo, haciendo un total de 800 gramos para los 8 puntos establecidos en cada fecha de muestreo.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Existen varios tipos de muestreadores, el cual son usados dependiendo de diversos factores que influyen a la hora de tomar la muestra; sin embargo, lo más comúnmente usado en esta actividad son los muestreadores manuales de agarre y los extractores. Para la extracción de las muestras se utilizó una draga de tipo van veen, que posteriormente fueron almacenados en bolsas ziplock debidamente identificados, rotulados y conservados.

Figura 8

Draga Van veen

Nota: tomado de “The Environment Management”, (www.tem.com.pe)

Todo el procedimiento del muestreo se realizó de acuerdo a los lineamientos otorgados por la Agencia de protección ambiental “EPA-823-B-01-002”, que a su vez fueron complementados con los requerimientos del Laboratorio contratado y el formato de itinerario de trabajo adjuntado en el anexo 1, lo que permitió el aseguramiento y control de calidad de la información y de las muestras de campo.

c) Ensayos de laboratorio

Se desarrolló en un laboratorio ambiental con certificación ambiental INACAL, donde las muestras provenientes de los dos muestreos (23/07/2019

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

y 05/11/2019) fueron ingresados con su cadena de custodia, debidamente refrigeradas y rotuladas para su posterior tratamiento y proceso de análisis fisicoquímico para determinar las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu. Cabe resaltar que los análisis y demás procesos en laboratorio se siguieron bajo los propios procedimientos del laboratorio contratado. Finalmente, los resultados fueron reportados mediante un informe de ensayo, con valores que fueron usados para la investigación.

Todos los análisis de muestras para la determinación de metales fueron ejecutados en el laboratorio ambiental ALAB E.I.R.L, siendo este una entidad privada que cuenta con certificación INACAL para los análisis de los parámetros requeridos en la investigación, y por ende nuestros resultados poseen mayor fiabilidad.

1. Tratamiento de las muestras: los sedimentos fueron tamizados en húmedo, pasándolos por un set de tamices desde 1 a 0,063 mm, para secarlos a temperatura ambiente. Posteriormente, fueron disgregados, pulverizados y almacenados, en bolsas plásticas apropiadamente rotuladas, en un desecador para su análisis químico.

2. Análisis químico de metales: para la determinación de contenido total de metales en sedimentos se partió del material seco y tamizado, siguiendo el procedimiento EPA: 3050B/3051: Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Seguida de las siguientes técnicas instrumentales: Para multi-elementos – ICP-OES (EPA 6010B), para Cd – absorción atómica con método de vapor frío (EPA 7000), para Hg – absorción atómica con método de vapor frío (EPA 7000, 245.7).

- Límites de detección

Los límites de detección son parámetros que determinan la capacidad de análisis de un método analítico en unas condiciones de mayor

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

sensibilidad que permite el sistema informático. Es decir, el límite de detección es la mínima concentración de analito en una muestra que se puede detectar en un proceso de análisis con un nivel aceptable de confianza, pero no necesariamente cuantificada (Rosas, 2003).

Para los elementos estudiados los límites de detección fueron los siguientes:

Tabla 6

Límites de detección de metales

	Hg	Cd	Pb	Cu
LMD (mg/kg)	0.4	0.1	1	0.3

Nota: Valores tomados del informe de ensayo ALAB E.I.R.L, Anexo 2

3.3. Métodos o técnicas

3.3.1. Determinación del índice de geoacumulación

Para determinar el índice de geoacumulación, se aplicó la siguiente fórmula matemática:

$$\mathbf{Igeo} = Log_2\left(\frac{Cn}{1.5Bn}\right)$$

Donde:

Cn es la concentración promedio del elemento examinado (Pb, Cu, Cd, Hg),

Bn la concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre), extraído de reportes Turekian y Wedepohl, 1961, **Tabla 4**

y **1.5** es el factor de corrección de efectos litogénicos.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Todas las operaciones se desarrollaron y almacenaron en una hoja de cálculo Excel para su posterior análisis, edición e interpretación de los resultados mediante una comparación con la escala de valores (**tabla 2**) propuesta por Müller (1981), para categorizar así el grado de contaminación por cada metal en estudio.

3.3.2. Determinación del factor de enriquecimiento

Se determinó aplicando la siguiente fórmula matemática:

$$FE = \left[\frac{\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{sedimento}}{\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{corteza}} \right]$$

Donde:

$(Me/Fe)_{sed}$: razón entre el metal X y el hierro presente en la muestra.

$(Me/Fe)_{corteza}$: razón entre el metal X y el hierro presente en la corteza terrestre, extraído de reportes Turekian y Wedepohl, 1961, **Tabla 4**.

Se consideró al hierro (Fe) como elemento normalizador conservativo por ser uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre de acuerdo a reportes de Turekian y Wedepohl.

De igual manera que el Igeo, todas las operaciones se desarrollaron y almacenaron en una hoja de cálculo Excel para su posterior análisis, edición e interpretación de los resultados mediante una comparación con la escala de valores (**Tabla 3**) propuesta por Sutherland, (2000), para categorizar así el grado de enriquecimiento por cada metal en estudio.

3.3.3. Valores estándares de referencia CEQG

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Debido a que no hay normativa nacional reguladora con respecto al tema de estudio se optó por acudir a la norma internacional canadiense, el cual es usado ampliamente por los investigadores como valores de referencia. Es así que los resultados obtenidos (concentraciones de Pb, Cu, Cd, Hg) fueron comparados con "**Canadian Environmental Quality Guidelines – CEQG"** (**Tabla 1**) para poder determinar qué metales superaron los valores guía.

3.3.4. Distribución espacial del Igeo y FE

Para tal propósito se acudió a la elaboración de mapas cartográficos debido a su eficacia para la proyección y entendimiento de los resultados en el mismo escenario. Para ello se empleó como insumo principal archivos cartográficos en formato shapefiles que fueron descargados de internet, procedentes de GEOGPSPERU E.I.R.L. (www.geogpsperu.com). A partir de ello, se procesaron las imágenes en conjunto con los reportes del Igeo y FE, usando como herramienta el software ArcGis 10.5.

Cabe recalcar que los mapas de distribución de Igeo y FE son el producto de la interpolación de valores de cada uno de los ocho puntos muestreados en la bahía para cada metal en específico, lo cual ello permitió determinar las zonas de mayor vulnerabilidad existentes.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Estuvo compuesto por todo el material sedimentario que se encuentra depositado en el fondo marino de la bahía el Callao. Cabe resaltar que considerando el dimensionamiento y precisión del estudio se tuvo en cuenta las isobatas 20m y 30m, el cual se ubican a 2 y 5 km de la costa aproximadamente y abarcan prácticamente el centro de la bahía, ello

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

permitió tener una población más representativa a la hora de seleccionar los puntos de muestreo.

3.4.2. Muestra

Para el estudio se consideró 800 gramos de sedimentos marinos de la bahía Callao, extraídos de 8 puntos de muestreo a una profundidad promedio de 20m y tomados en 2 periodos correspondientes a un mismo año.

3.5. Instrumentos validados de recolección de datos

Dentro de las actividades de gabinete, el recabado de la información documentaria se desarrolló mediante la revisión bibliográfica de fuentes primarias y secundarias (tesis, artículos científicos, libros electrónicos, etc.), aplicando los diferentes tipos de fichaje y formatos. Finalmente, el procesamiento de la información final se desarrolló teniendo en consideración las normas APA 7ma edición.

Para el caso de los trabajos de campo (muestreo) la técnica aplicada fue la observación sistematizada durante los dos muestreos, en donde se empleó diferentes instrumentos de trabajo, los cuales estuvieron conformados por la cadena de custodia de las muestras, etiquetas de identificación, libreta de campo, manual de muestreo de sedimentos “EPA-823-B-01-002”, hoja check list de herramientas (**Anexo 07**), hoja de itinerario de trabajo (**Anexo 06**). Cabe mencionar, además, que dentro de proceso se utilizaron equipos y herramientas como son; cámara fotográfica, GPS, y una draga tipo Van Veen, para la recolección de las muestras.

La etapa de laboratorio se desarrolló mediante la observación y el análisis, empleando como instrumentos a los protocolos y procedimientos para los análisis, mientras que para el reporte de resultados fueron las fichas y formatos propios del laboratorio.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

3.6. Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información

En la presente tesis se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) para la comparación múltiple de medias mediante el estadístico de Tukey, para así detectar si existen diferencias estadísticamente significativas en los valores reportados del Igeo y FE en ambas fechas de muestreo. Cabe recalcar que previamente se aplicó la prueba de Shipiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos obtenidos.

En la prueba estadística se usó un nivel de confianza del 95% para probar la hipótesis planteados de la siguiente manera:

Hipótesis nula: todas las medias del “Igeo” o “FE” son iguales
Hipótesis alterna: por lo menos una media del “Igeo” o “FE” es diferente

Sí, P > 0.05: se acepta la Hipótesis nula (todas las medias de “Igeo” o “FE” son iguales)

sí, P < 0.05: se rechaza la Hipótesis nula (hay diferencias entre las medias del “Igeo” o “FE”)

Finalmente, para el desarrollo de todos los cálculos estadísticos se empleó como herramienta el software “Minitab V17” y “Excel 2020”, el cual permitió presentar los resultados mediante tablas y gráficos estadísticos para su mejor interpretación.

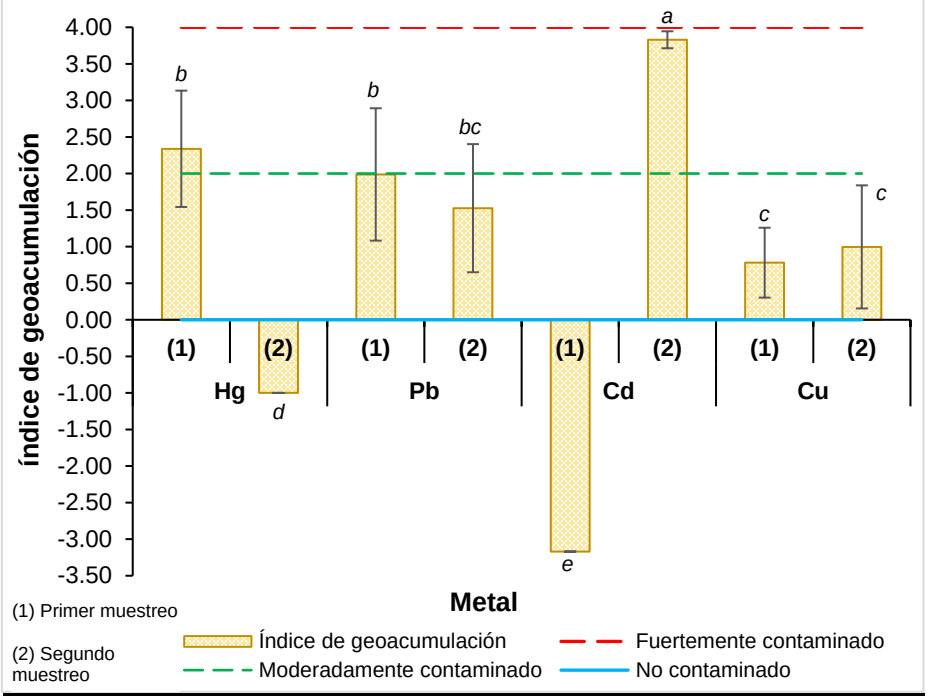
Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

4.1. Índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu

Figura 9

Índice de geoacumulación de mercurio, plomo, cadmio y cobre en el primer y segundo muestreo en la Bahía Callao.



Hg (1)	Hg (2)	Pb (1)	Pb (2)	Cd (1)	Cd (2)	Cu (1)	Cu (2)
2.34	-1	1.99	1.53	-3.17	3.83	0.78	1

En la figura anterior los valores representan el promedio de los ocho puntos de muestreo ± desviación estándar (Prueba Tukey, a= 0.05). Esto indica que

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

existen diferencias estadísticamente significativas entre el índice de geoacumulación de mercurio. Se produce entre el primer y segundo muestreo, cuando el índice pasa de la categoría de "moderado a fuertemente contaminado" a "no contaminado", respectivamente.

Para el caso del plomo, no se evidencia diferencias del índice de geoacumulación entre los muestreos, encontrándose en la categoría de "moderadamente contaminado".

En tanto, el cadmio tiene una diferencia significativa considerable cuando pasa de la categoría "no contaminado" en el primer muestreo a "fuertemente contaminado" en el segundo muestreo; siendo este último, el mayor el índice de geoacumulación comparado con la de otros metales.

En el caso del cobre, no se evidencian diferencias entre las temporadas de muestreo, pero indican una categoría de "no contaminado a moderadamente contaminado".

Para el caso del factor de enriquecimiento, la **Figura 10** representa los valores el promedio de FE de los ocho puntos de muestreo ± desviación estándar (Prueba Tukey, a= 0.05). Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre el factor de enriquecimiento de mercurio, entre el primer y segundo muestreo, cuando pasa de la categoría "enriquecimiento significativo" a "enriquecimiento mínimo", respectivamente.

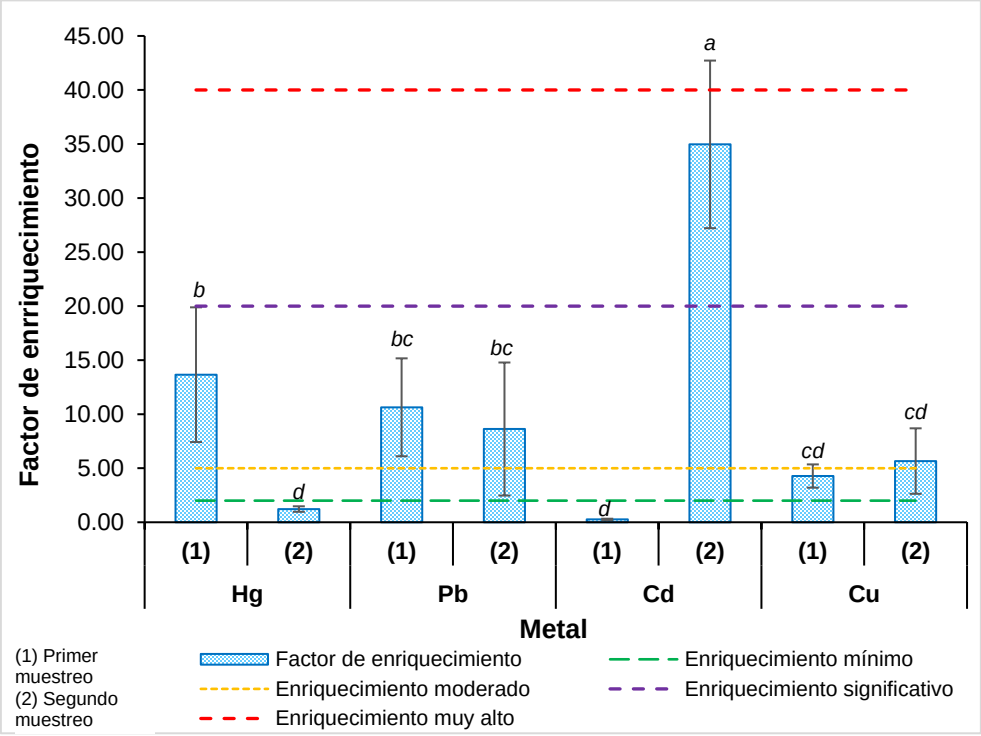
Para el caso del plomo, no se evidencias diferencias entre los muestreos y se mantiene la categoría "enriquecimiento significativo".

En tanto, el cadmio tiene una diferencia significativa considerable entre el primer y segundo muestreo; cuando pasa de "enriquecimiento mínimo" a "enriquecimiento muy alto", siendo este último el mayor factor de enriquecimiento comparado con el de otros metales.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 10

Factor de enriquecimiento de mercurio, plomo, cadmio y cobre en el primer y segundo muestreo en la bahía Callao.



Hg (1)	Hg (2)	Pb (1)	Pb (2)	Cd (1)	Cd (2)	Cu (1)	Cu (2)
13.65	1.22	10.64	8.63	0.27	34.97	4.28	5.66

En el caso de cobre, no se evidencia diferencia entre los muestreos y la categoría: se mantiene en "enriquecimiento moderado".

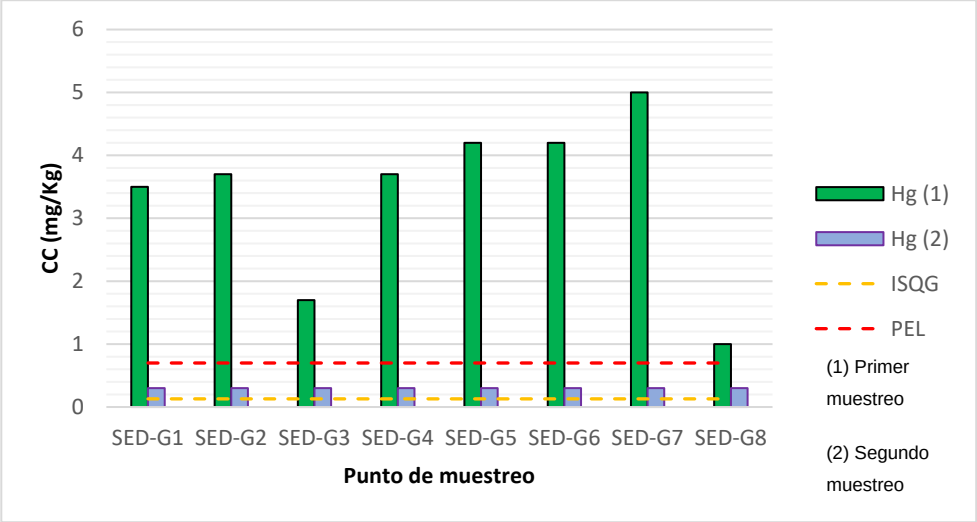
4.2. Las directrices CEQG en las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu reportadas

De acuerdo a la siguiente figura, se observa que las concentraciones de mercurio reportaron una reducción en el segundo muestreo, con valores cercanos a cero, mientras que en el primer muestreo se nota un pico máximo en el punto SED-G7 con 5mg/kg.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 11

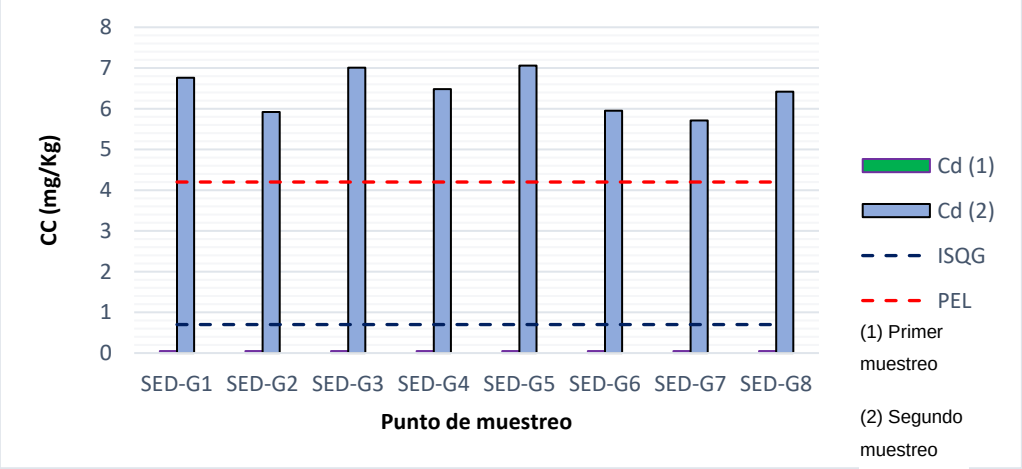
Concentraciones de Hg en la bahía Callao y la norma CEQG



Por otro lado, de acuerdo a la norma CEQG, se observa que los resultados de ambos muestreos superaron ISGQ. Para el caso del segundo muestreo únicamente el PEL no fue superado. Se aprecia, además, que el punto SED-G7 resultó con mayor contenido de mercurio, superando en un 614.3% el valor de PEL.

Figura 12

Concentraciones de Cd en la bahía Callao y la norma CEQG



Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

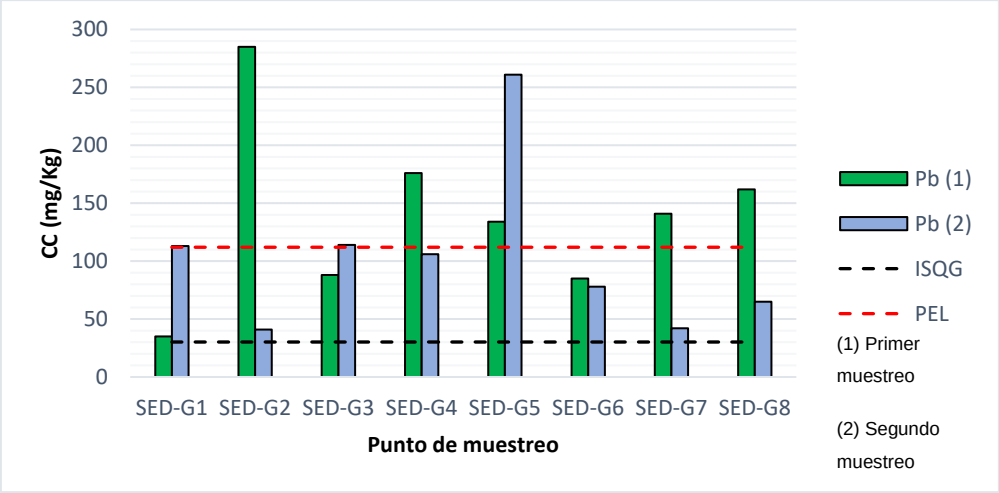
De acuerdo a la figura anterior, se aprecia que las concentraciones del primer muestreo tienden a cero en todos los puntos; por otro lado, los valores del segundo muestreo son claramente superiores. Esto hace inferir que se produjo alguna alteración en el medio como el aumento de carga contaminante, por ejemplo.

El reporte del primer muestreo indica que ninguno de los puntos de muestreo superó los valores de referencia establecidos por la norma CEQG.

Para el caso del segundo muestreo sí se aprecia que los 8 puntos de muestreo superaron los valores ISQG y PEL establecidos por la CEQG.

Figura 13

Concentraciones de Pb en la bahía Callao y la norma CEQG



De la figura anterior, las concentraciones de plomo en los dos muestreos presentaron ligera similitud con excepción de los puntos SED-G2 y SED-G5 que representan los picos máximos.

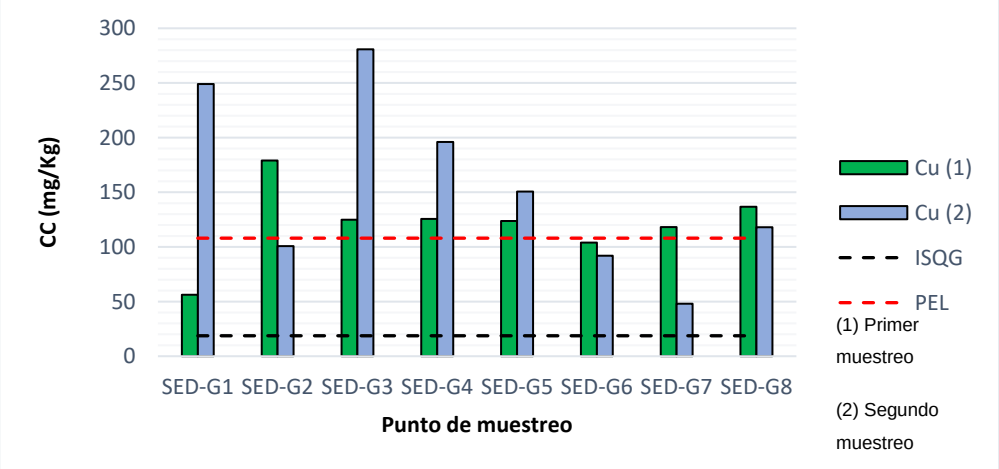
En el primer y segundo muestreo, se aprecia la superación de los niveles ISQG en todos los puntos, con excepción del punto SED-G1. Para el caso de los

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

niveles PEL, en el primer muestreo, se aprecia que los puntos SED-G1, SED-G3, SED-G6, se mantuvieron por debajo mientras que los demás puntos superaron estos niveles. En tanto, para el caso del segundo muestreo se aprecia que 4 puntos se mantuvieron por debajo de los niveles PEL.

Figura 14

Concentraciones de Cu en la bahía Callao y la norma CEQG



En la figura anterior se aprecian valores máximos en las concentraciones del segundo muestreo y en los puntos SED-G1, SED-G3. Por otro lado, los demás puntos mantienen mayor semejanza para ambas fechas de muestreo.

Del primer muestreo, se aprecia que para el caso ISQG todos los puntos muestreados superaron los niveles; por otro lado, para el caso del PEL únicamente los puntos SED-G1 y SEG-G6 se reportaron por debajo de sus valores.

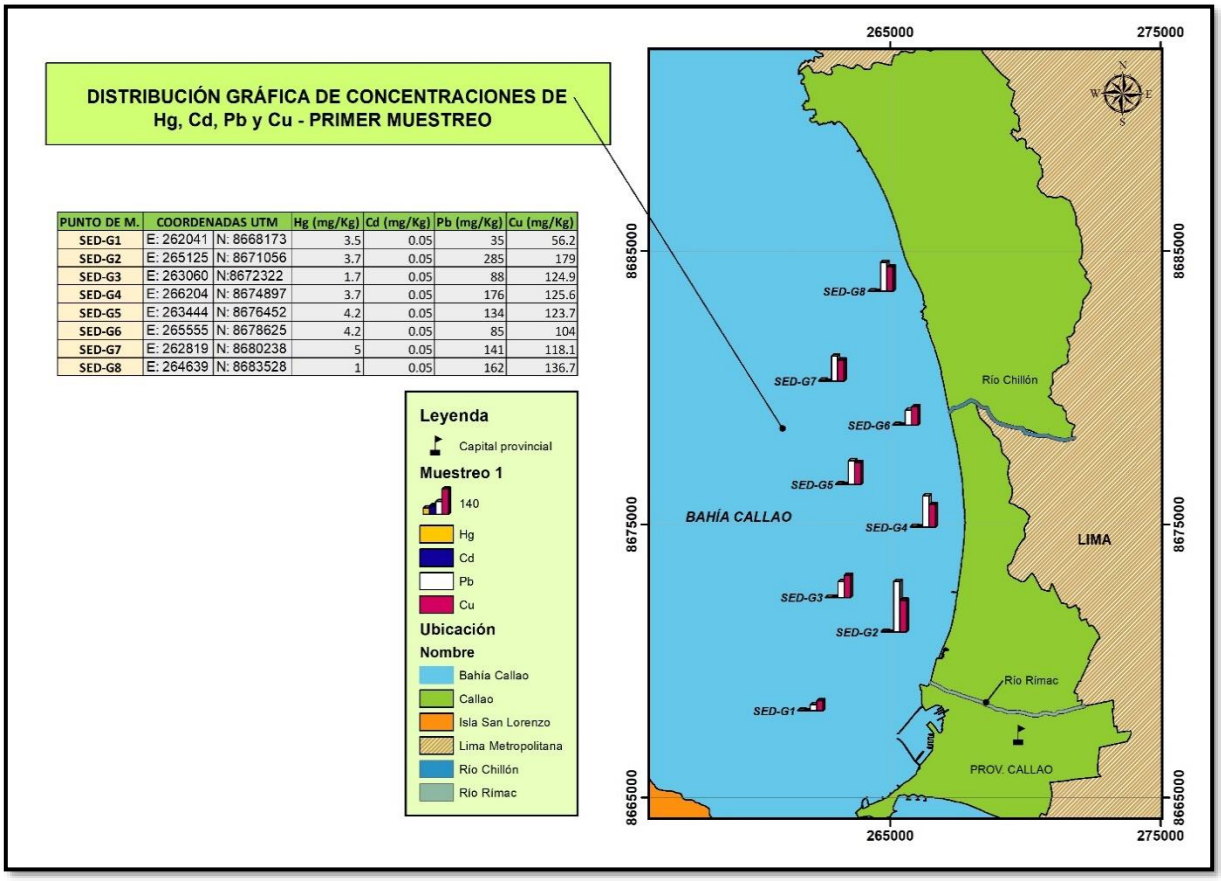
En el caso del segundo muestreo, se aprecia que todos los puntos superaron los niveles ISQG, mientras que para el PEL únicamente los puntos SED-G2, SED-G6, y SEGD-G7 se reportaron por debajo de sus valores.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

4.3. Distribución espacial del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu y vulnerabilidad en la bahía Callao.

Figura 15

Mapa de distribución de metales – muestreo 1

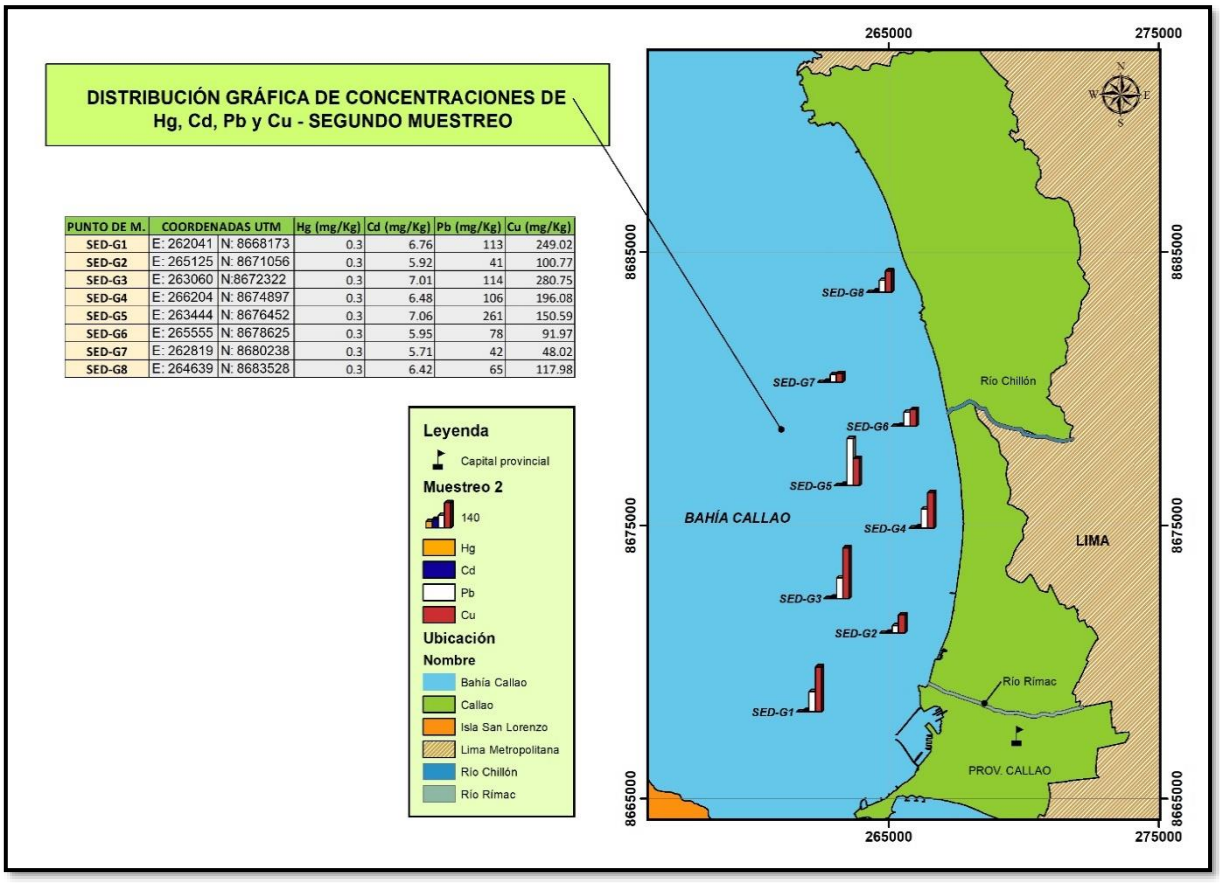


Nota: de acuerdo al mapa se puede apreciar que en el primer muestreo los metales Pb y Cu reportaron concentraciones mayores en relación al Hg y Cd en los 8 puntos de muestreo. Aquí se observa que en el punto SED-G2 se obtuvo mayores valores en relación a los demás puntos de muestreo. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 16

Mapa de distribución de metales – muestreo 2

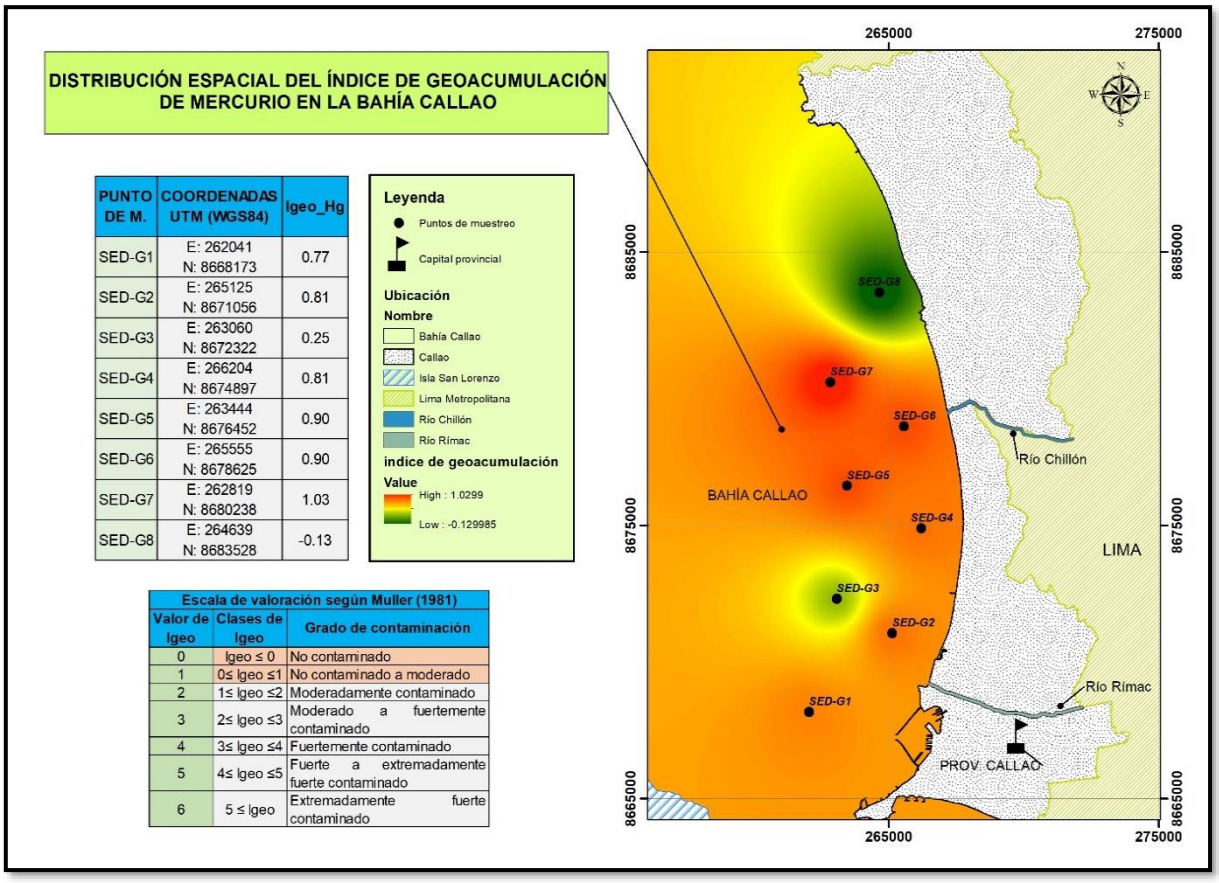


Nota: para el caso del segundo muestreo las mayores concentraciones se reportaron en el Pb y Cu, con valores máximos en los puntos SED-G3 y SED-G5. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 17

Mapa de distribución espacial del Igeo de mercurio

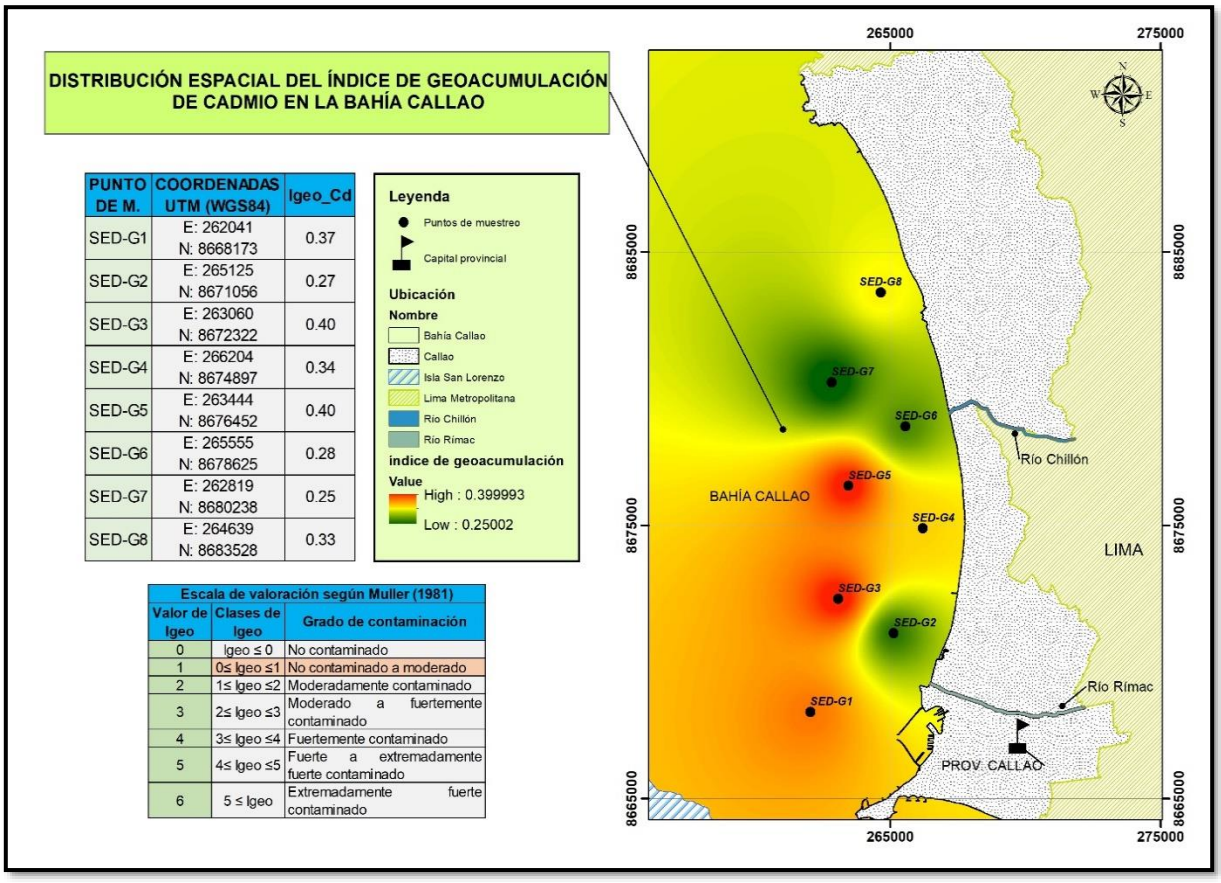


Nota: de acuerdo al mapa, las zonas que presentan mayor acumulación de Hg en los sedimentos se encuentran en la desembocadura del río Chillón definidos con sobras de color rojo intenso. Sin embargo, la escala de Muller indica que son zonas moderadamente contaminadas. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 18

Mapa de distribución espacial del Igeo de cadmio

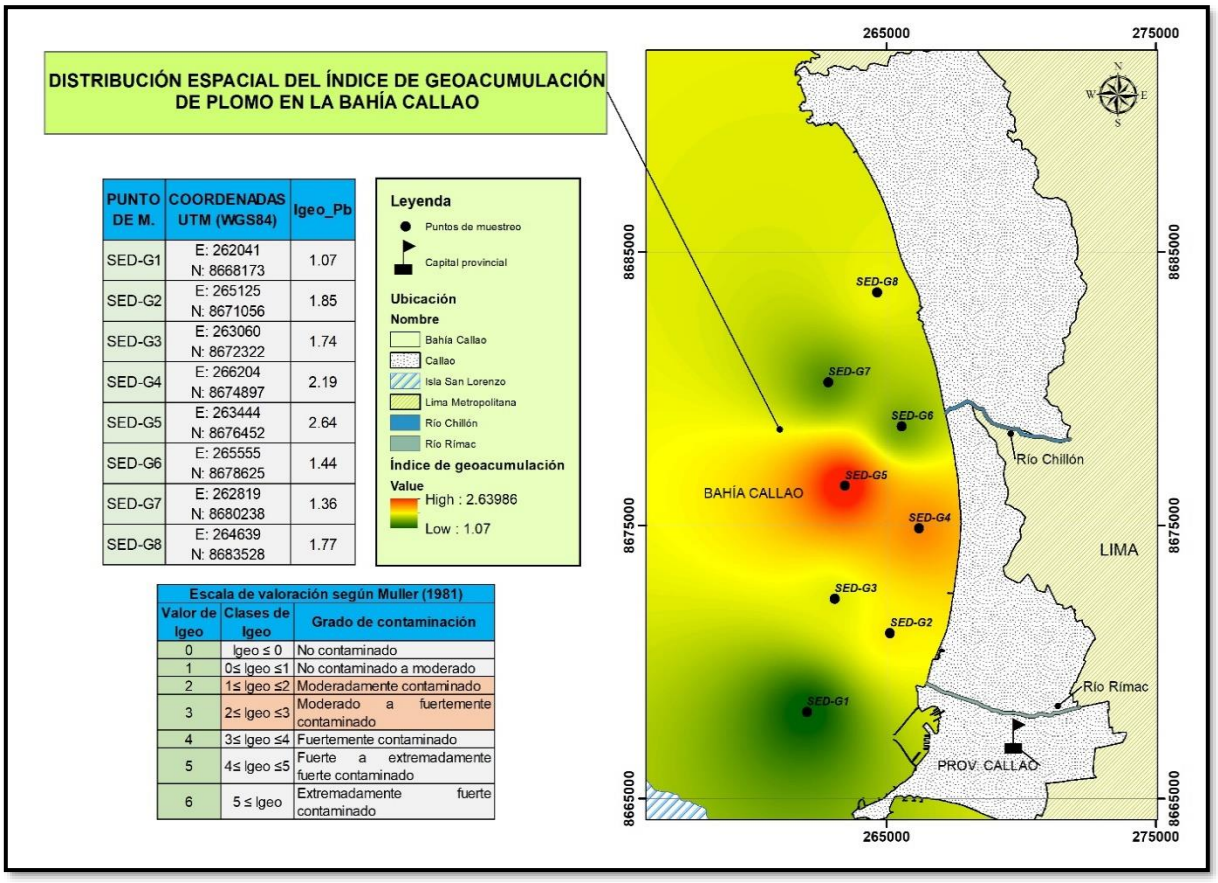


Nota: el Igeo del cadmio reportó mayor acumulación en la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas representados por áreas sombreadas de color rojo, y de acuerdo a la escala propuesta por Muller, (1981) se encuentran moderadamente contaminados por cadmio. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 19

Mapa de distribución espacial del Igeo de plomo

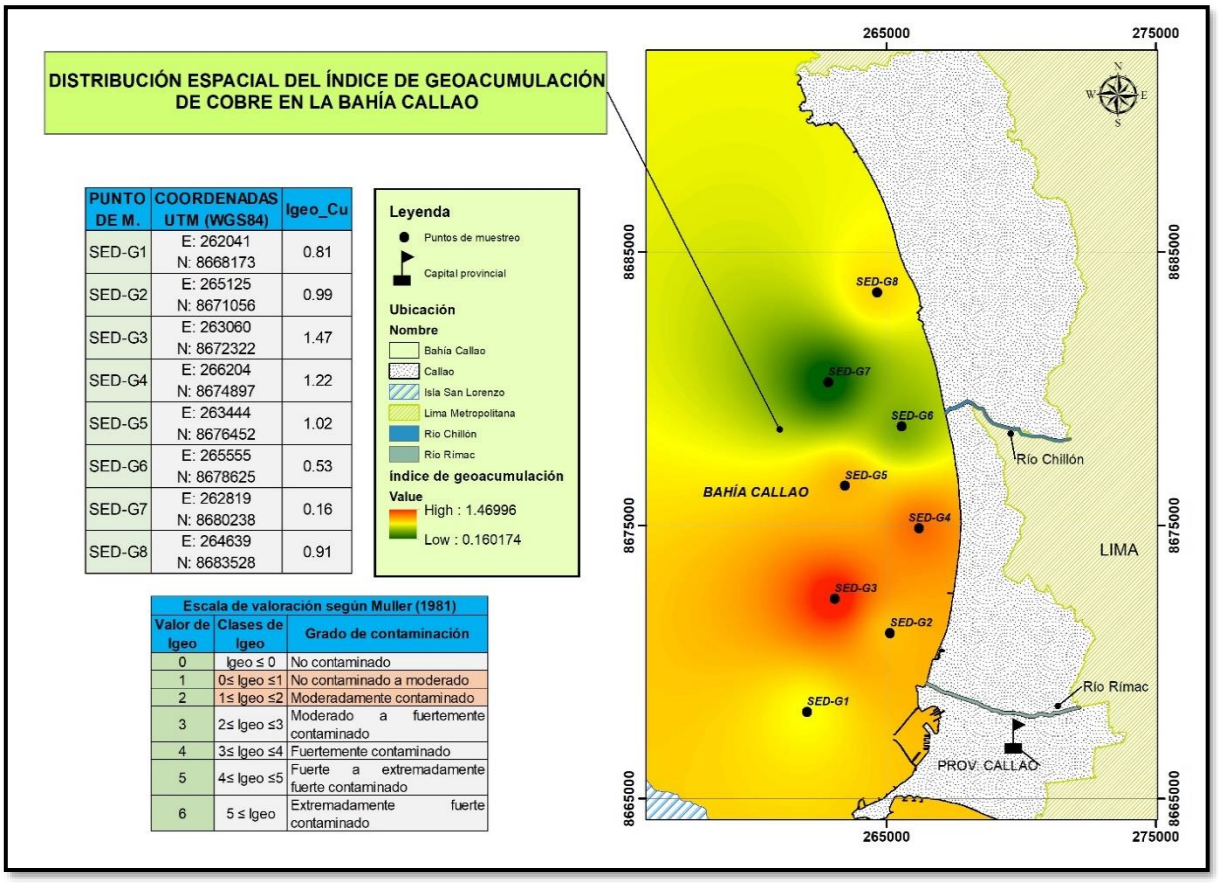


Nota: en el caso del Igeo del plomo, se muestra mayor acumulación en la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas, correspondiente a las áreas sombreadas de color rojo. De acuerdo a la escala propuesta por Muller, (1981), los sedimentos de la bahía se encuentran: de moderadamente contaminado a fuertemente contaminado por el plomo. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 20

Mapa de distribución espacial del Igeo de cobre

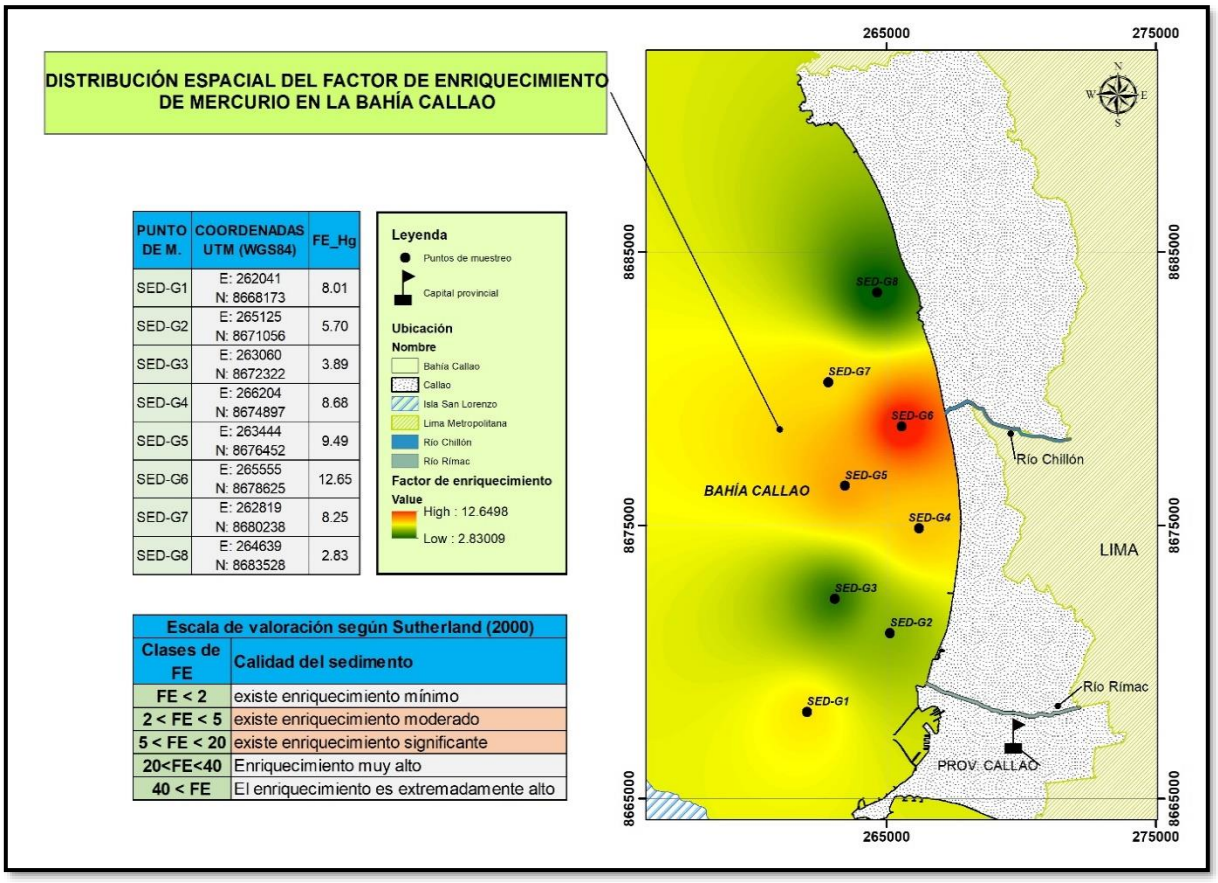


Nota: de acuerdo al mapa del Igeo del cobre, se muestra que hay mayor acumulación entre la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas y la desembocadura del río Rímac. Esto corresponde, al área sombreada de color rojo y al punto SED-G3 en relación a otras áreas de la bahía. De acuerdo a la escala propuesta por Muller (1981), las zonas con mayor acumulación indican contaminación moderada por cobre. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 21

Mapa de distribución espacial del FE de mercurio

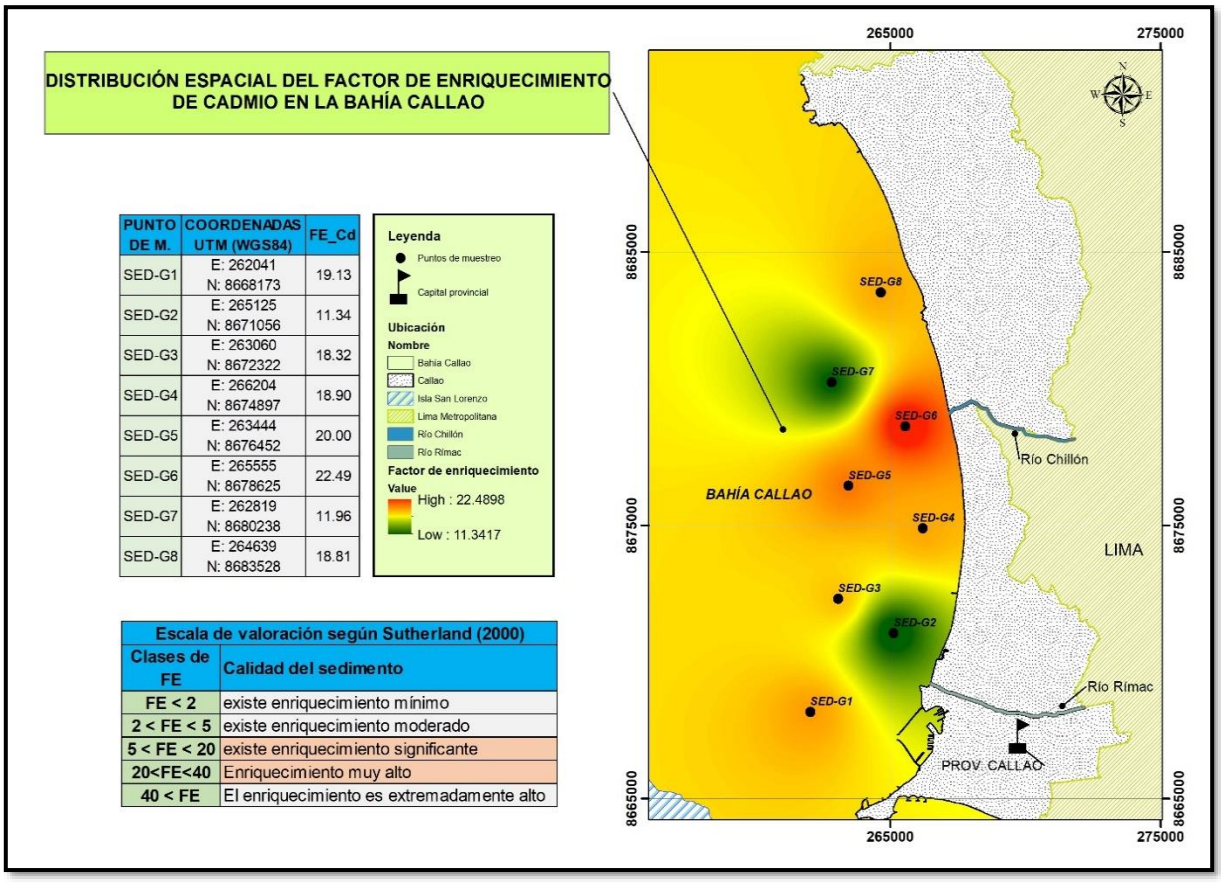


Nota: de acuerdo al mapa del FE, se observa mayor enriquecimiento en la zona de desembocadura del río Chillón, resaltado por áreas de color rojo. De acuerdo a la escala propuesta por Sutherland (2000), esta zona presenta enriquecimiento significativo por mercurio. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 22

Mapa de distribución espacial del FE de cadmio

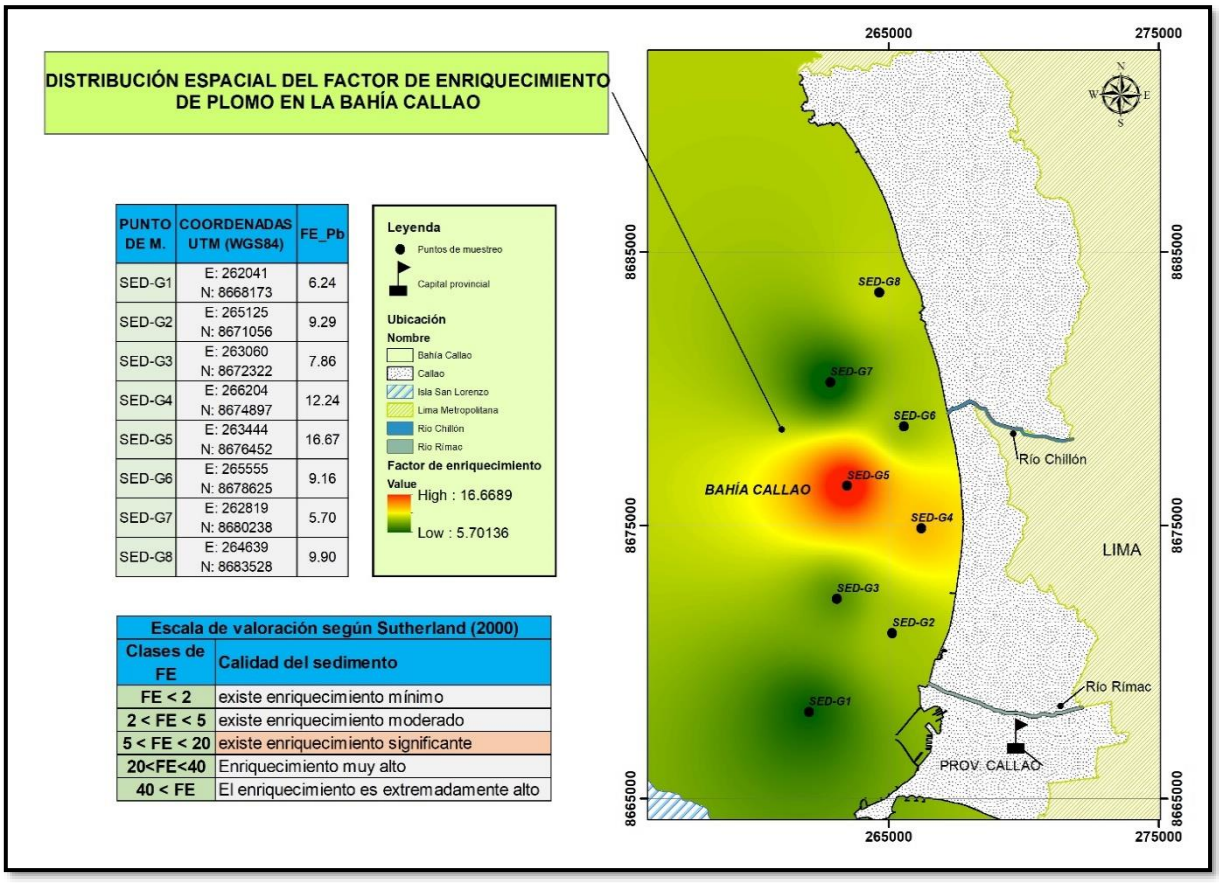


Nota: de acuerdo al mapa del FE del cadmio, las zonas con mayor enriquecimiento corresponden a la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas y la desembocadura del río Chillón. La escala propuesta por Sutherland, (2000), indica que estas zonas de la bahía presentan enriquecimiento significante y extremadamente alto. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 23

Mapa de distribución espacial del FE de plomo

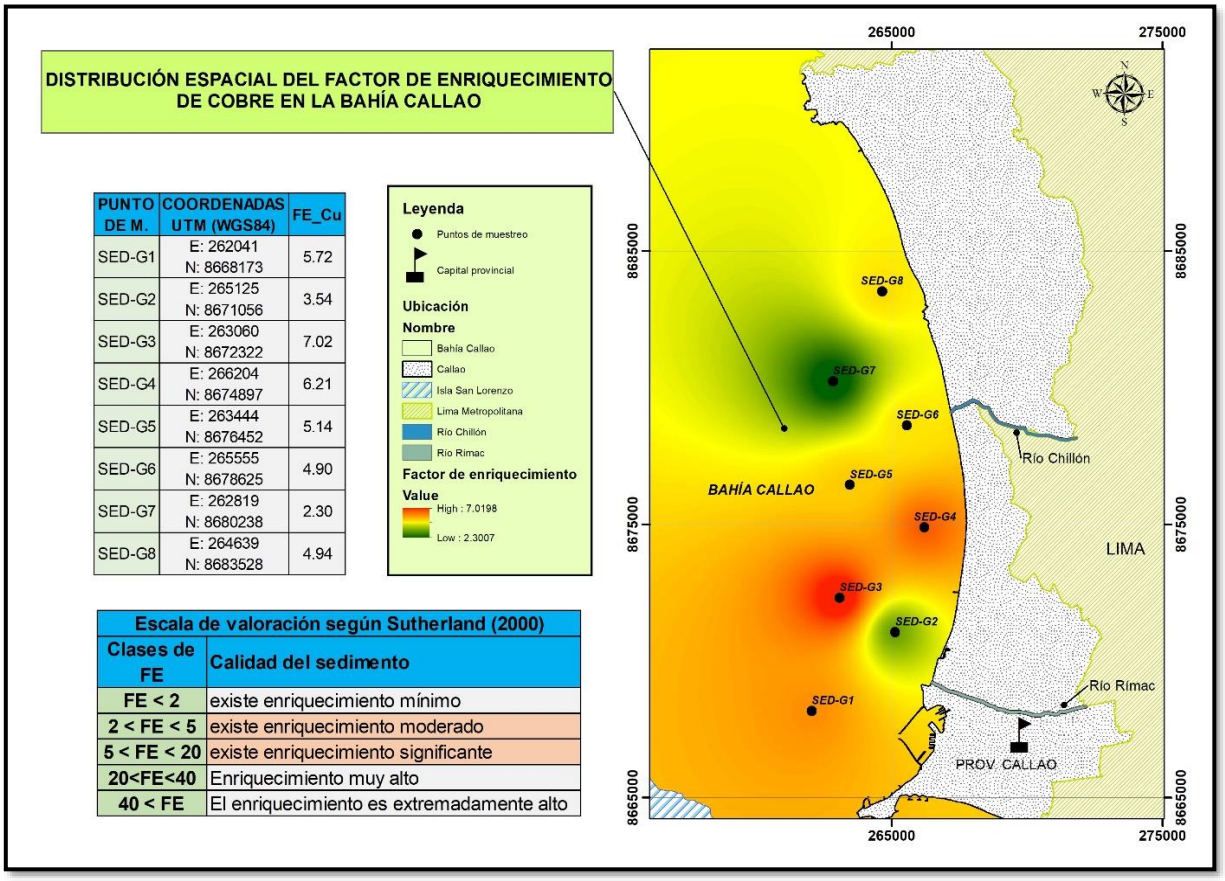


Nota: el mapa del FE del plomo muestra que hay mayor enriquecimiento la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas. Esto indica que, de acuerdo a Sutherland, (2000) existe enriquecimiento significativo. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 24

Mapa de distribución espacial del FE de cobre



Nota: el mapa del FE del cobre, muestra mayor enriquecimiento en la zona cercana a la desembocadura del río Rímac que corresponde al punto SED-G3 y la zona de mezcla de aguas entre los ríos Chillón y Rímac con aguas marinas comparados con otras áreas de la bahía. De acuerdo a la escala propuesta por Sutherland (2000), estas zonas presentan enriquecimiento significante. Mapa adaptado de GEO GPS PERÚ E.I.R.L. (www.geogpsperu.com).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO V
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. De las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu reportadas

Las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu, obtenidas en los dos muestreos, presentan variabilidad temporal heterogénea, así como entre los 8 puntos de muestreo. Además, los máximos valores se reportaron en el plomo y el cobre: un incremento del primer al segundo muestreo en los puntos muestreados. En el caso del mercurio, se reportaron menores valores en el segundo muestreo para todos los puntos; por otro lado, el cadmio en un movimiento inverso, reportó un incremento en sus valores en los 8 puntos muestreados tal como se muestra en la **Figura 25**.

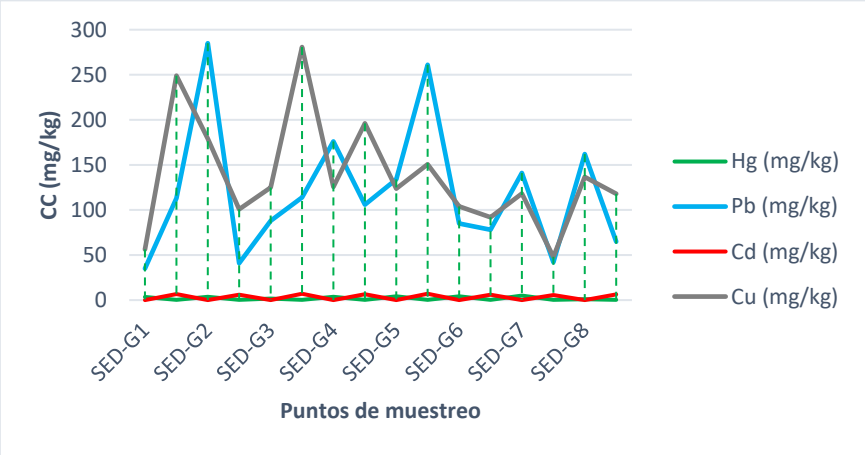
Los resultados muestran que el mayor contenido de metales (Hg, Cd, Pb, y Cu) se concentran en los puntos **SED-G2, SED-G3, SED-G4 y SED-G5**. Estos puntos se ubican en la zona de mezcla de aguas marinas con los ríos Chillón y Rímac. Lo mencionado lo podemos apreciar en las **Figuras 15 y 16** (mapas de distribución).

Cabe mencionar que en estos puntos convergen factores que impulsan la mayor actividad sedimentaria. Uno de ellos es el vertimiento de aguas residuales industriales autorizados por el ANA (**Figura 2**), proceso físico de mezcla y sedimentación como producto de la colisión de todas las masas de agua, incluidos los aportes de los ríos Rímac y Chillón (**Figura 1**)**.**

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 25

Variación espacial y temporal de concentraciones de Hg, Cd, Pb, Cu en el primer y segundo muestreo



Además, es oportuno considerar que el reporte de los cuatro metales en estudio supera en su mayoría los valores ISQG presentados por la CEQG, y en algunos otros casos los valores PEL, así como en los estudios realizados por el OEFA en el mismo ambiente marino en el año 2015. Esto indica la gravedad del problema de contaminación por metales pesados.

Las variaciones y no variaciones de los metales en estudio pueden estar ligados a su especiación química (Cabrera, 2018) como factor esencial. En algunos metales pueden encontrarse libres en mayor proporción. Esto depende de su estado y de las fases o formas químicas que se encuentren y así tener mayor biodisponibilidad, movilidad y toxicidad. También es importante considerar las condiciones ambientales de dinámica marina (Torres & Trinidad, 2003), el sistema de corrientes (Sánchez, s.f) junto con el aporte de los afluentes industriales, ríos y el tráfico de embarcaciones juegan un papel medular para que se reflejen cambios importantes, así como sucedió en la bahía Blanca, Argentina (Baggio, 2019).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Un punto a considerar es que ambos muestreos fueron extraídos en época de estiaje. Esto implica que el volumen de aporte de aguas de los ríos Rímac y Chillón se mantuvieron constantes y que no podrían ser considerados como causantes de la variación; sin embargo, sí podría atribuirse a otros procesos fisicoquímicos y oceanográficos ocurridos en la bahía. Aunque, por otro lado, no se descarta que hayan ocurrido cambios fisicoquímicos en el agua (pH, potencial redox, salinidad, etc.) provocando, de esta manera, una mayor deposición de sedimentos proveniente de los efluentes, permitiendo así una mayor interacción de los metales con la columna de agua (Rosas, 2005).

Tomando referencia a las playas la Guajira, Colombia no presentaron variabilidad significativa a pesar que si se consideró el muestreo en época de lluvia y sequía que con excepción de algunos puntos si se dio un incremento en época de lluvia. En este punto Doria (2018) argumenta que el incremento en época de lluvia se da por el incremento en los aportes de material particulado a los cuerpos de agua por escorrentías, pero en caso de encontrarse mayores concentraciones de metales, en época de sequía que en época de lluvia, se atribuiría a una reducción del pH en el mar por generarse H_2S y CO_2 mediante la actividad microbiológica en los sedimentos.

Se ha podido apreciar, además, como señala Rovira (2016), la variabilidad temporal y espacial del contenido de estos metales en la bahía depende principalmente de la geodinámica marina. A esta afirmación, no podemos dejar de mencionar a las reacciones que se dan como consecuencia en la columna de agua por variaciones de pH, temperatura, oxígeno disuelto, afloramiento marino y otros factores físico-químico ambientales. Por otro lado, las remociones de los sedimentos marinos tienden a correlacionarse de manera positiva con la variabilidad de los vientos, debido a que estos condicionan a un mayor afloramiento marino y con ello los sedimentos tienden a removerse para mezclarse con la columna de agua (**Figura 1**) (Velazco, 2000).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

5.2. Del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu.

Los resultados obtenidos del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb, y Cu en la bahía Callao (**Figuras 9 y 10**) (**Tabla 8 y 9**) indican que existe niveles considerables de contaminación y de origen antrópico. Esto es apreciable en la mayoría de los puntos muestreados, además se detecta que el cadmio es el metal que reporta los valores más altos entre los demás (3.83 de Igeo y 33.5 de FE), manifestando un grado de contaminación fuerte y enriquecimiento muy alto. Cabe resaltar que los valores obtenidos tienen mucha similitud con los del sistema de bahías de Calera, Chile estudiados por Valdés & Castillo (2014). Esto se debe a que en la bahía Callao, la creciente industrialización aledaña provoca que los ecosistemas presenten indicios de contaminación por los vertidos de aguas residuales hacia estos cuerpos de agua.

Considerando los resultados del FE, el mayor aporte de contaminantes podría deberse mayormente a origen industrial y municipal que de origen natural. Esto se sustenta en los altos niveles de concentración reportados en los 4 metales y ausencia de otros fenómenos naturales fortuitos, tal como también menciona el OEFA, en sus estudios de calidad ambiental en la bahía Callao, 2015. Otros de los sustentos son los estudios realizados en los ríos Rímac (Aliaga, Quevedo y Alfaro, 2019) y Chillón (Aliaga, 2010) donde reportan niveles importantes de contaminación por metales, así como también, los vertimientos residuales industriales autorizados por el ANA (**Figura 2**) y de las actividades dentro del puerto Callao, como tráfico naviero**.**

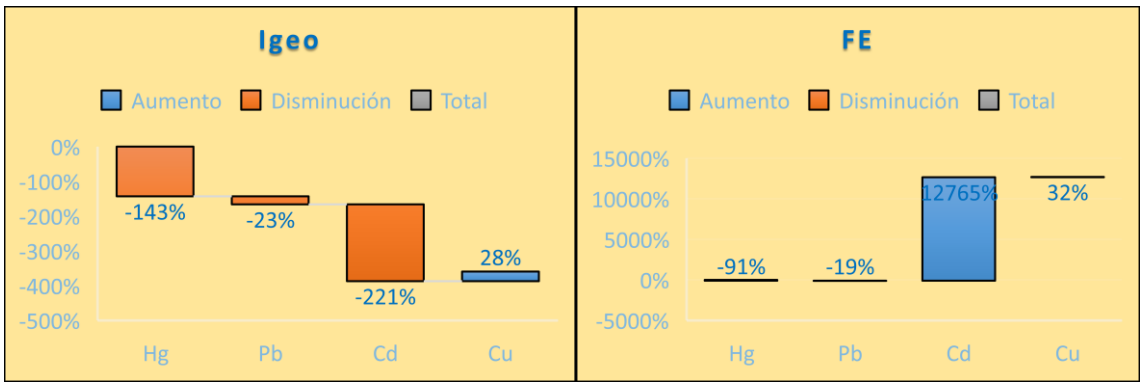
Cabe señalar que el Igeo y FE son indicadores de evaluación de calidad ambiental que, además, pueden reportar variaciones en el tiempo y espacio de acuerdo al comportamiento de los metales y del ambiente marino. Esto significa que las variaciones de estos indicadores son el reflejo de las variaciones que ocurren en las concentraciones de los metales por ser dos magnitudes directamente proporcionales. Esto indica que el Igeo y FE dependen estrictamente

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

de cualquier cambio en las concentraciones las que pueden surgirse bajo diversos factores como se menciona líneas arriba, confirmando con ello la hipótesis del estudio.

Figura 26

Variación porcentual del Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu



De acuerdo a la figura anterior, se observa que el Hg y Cd son los metales que reportaron mayor variación porcentual en el Igeo y FE entre un muestreo y otro, el cual es constatado con la prueba estadística de Tukey aplicada a un 95% de confianza. Con respecto al plomo y cobre, el estadístico de Tukey demostró que no existen variaciones significativas entre los muestreos. Por otra parte, los resultados (**Figura 27**) reportan que los metales Hg y Pb sufrieron una reducción en sus valores Igeo y FE. Por otro lado, el caso de los metales Cd y Cu se notó un incremento de los mismos. Además, se aprecia mayor estabilidad en el Cu y Pb debido a su corta variación.

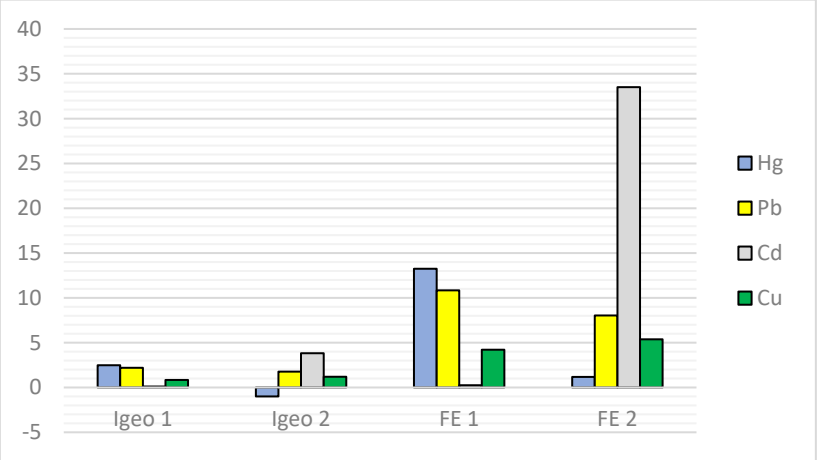
Los reportes del Igeo como del FE son de preocupación; en la bahía se desarrollan actividades extracción y cultivo de especies marinas, así como las de recreación en los balnearios (RESOLUCIÓN JEFATURAL Nº030 – 2016 – ANA) (**Figura 3**). Cabe precisar que, de acuerdo a los reportes de vulnerabilidad mediante mapas de distribución, se detectó que la mayor acumulación de metales se da en la zona de mezcla de aguas marinas con los ríos Rímac y Chillón, considerándose más vulnerables y contaminados. Esto podría deberse

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

principalmente a que es una zona céntrica de la bahía y es aquí donde existe mayor confluencia de diversos factores: como la dinámica marina, que generan remolinos en el centro, vertimientos de los ríos cercanos, vientos que permiten mayor concentración de sedimentos en la zona central de la bahía (Velazco, 2000).

Figura 27

Valores de Igeo y FE de Hg, Cd, Pb y Cu en la bahía Callao



Eso implica que los niveles altos de Hg, Cd, Pb, y Cu reportados en el estudio ponen en un estado de alta vulnerabilidad el desarrollo de actividades que encierran a ambas categorías. Esto es importante porque involucra la vida de especies marinas y del hombre debido a que mediante diferentes procesos fisicoquímicos y biológicos podrían incorporarse en la cadena alimenticia poniendo en riesgo el ecosistema (Pérez, 2015).

5.2.1. Mercurio (Hg)

El valor mínimo de concentración en el primer muestreo se registró en la estación SED-G8 (1mg/kg) y el máximo fue en la estación SED-G7 (5mg/kg). Estos valores son muy superiores en comparación a los que se reportaron en las playas turísticas de la Guajira, Colombia, 2018. Los valores reportados en el segundo muestreo fueron menores al límite de detección (<0.4 mg/kg) usado por el laboratorio, por ello se consideró valores de 0.3

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

mg/kg para todos los puntos de manera uniforme para determinar los valores del Igeo y FE.

Con respecto a la norma comparativa CEQG (Canadian Environmental Quality Guidelines, 2003), los resultados del primer muestreo superaron con exceso el valor de ISQG (>0.13 mg/kg) y PEL (>0.7 mg/kg) en todos los puntos, siendo la estación SED-G7 con mayor contenido de mercurio, superando en un 614.3% el valor de PEL. Para el caso del segundo muestreo; todos los valores reportados de los 8 puntos superaron los valores ISQG, mientras que para PEL se mantuvieron por debajo. Estos resultados son semejantes a los estudios realizados por el OEFA (2015) donde se reportaron zonas de la bahía con valores que superaron el ISQG y PEL de la norma de referencia.

El índice de geoacumulación (Igeo) de acuerdo a la expresión planteada por Müller (1981), reportó valores de 2.34 y -1 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**Tabla 10 y Figura 9**). Aquí se observa una reducción porcentual de un 143% en esta última fecha. Los valores indican que los sedimentos se encuentran de moderado a fuertemente contaminados.

El factor de enriquecimiento (FE) reportó valores de 13.65 y 1.22 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**tabla 10 y figura 10**), con una reducción porcentual de un 91% de su valor inicial, y que de acuerdo a la escala propuesta por Sutherland (2000). Se observa que en el primer muestreo existe enriquecimiento significante de mercurio en los sedimentos de la bahía Callao, mientras que el Segundo valor obtenido indica que existe mínimo enriquecimiento.

Los resultados del Igeo y FE obtenidos en ambos muestreos son de preocupación ya que la bahía Callao, es el ecosistema que presenta mayor contaminación y enriquecimiento por Hg teniendo como referencia a otras

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

bahías dentro de Latinoamérica, tales como la bahía San Julián (Pereyra et al., 2019), así como en la zona de playas la Guajira (Doria, 2018). Considerando el caso de la Bahía Blanca, Argentina (Baggio, 2019) los resultados tienen mayor semejanza al estudio, teniendo un factor en común que es la proximidad y el incremento de las diferentes actividades industriales que se desarrollan en ambos escenarios.

Por otro lado, de acuerdo a las **Figuras 17 y 21** (mapas de distribución) se aprecia que las zonas de mayor vulnerabilidad se encuentran en la descarga del río Chillón y en la zona de mezcla de aguas marinas: ríos Rímac y Chillón, comparándolas con las otras áreas de la bahía. Estos resultados se atribuyen a que el río Chillón es fuente importante de contaminación con aportes de mercurio como se mencionó líneas arriba.

5.2.2. Cadmio (Cd)

Los valores de cadmio obtenidos en el primer muestreo se dieron de manera uniforme en todos los puntos por debajo de los límites de detección del método (0.1 mg/kg). Consideramos el valor de 0.05 mg/kg para cálculos de Igeo y FE en los 8 puntos de muestreo. En el caso del segundo muestreo, el valor máximo de cadmio se dio en la estación SED-G5 (7.06 mg/kg) y el mínimo en la estación SED-G7 (5.71 mg/kg). Estos valores fueron menores a los reportados por el OEFA en el 2015, donde obtuvimos valores de 11.1 mg/kg. Además, la mayoría de los puntos muestreados superaron los niveles de la norma de referencia. Cabe mencionar que los reportes de ambos estudios resultaron superiores. Se tuvo como referencia comparativa a los reportes de los estudios en la bahía San Julián (Pereyra et al., 2019), al igual que a los reportes de las playas la Guajira (Doria, 2018).

Además, los resultados en el primer muestreo, ninguno de los puntos superó los valores de referencia de la CEQG. En el caso del segundo muestreo se aprecia que los 8 puntos superaron significativamente los

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

valores ISQG (0.7 mg/kg) y PEL (4.2 mg/kg), siendo la estación SED-05 con mayor superación porcentual de un 68.1% del valor PEL, lo que puede considerarse tóxico para el ecosistema.

El Igeo del cadmio reportó valores de -3.17 y 3.83 (**Tabla 11 y Figura 9**) para el primer y segundo muestreo respectivamente. Se observó una variación porcentual de un 221%. Los valores indican que no hay contaminación para el primer muestreo; mientras que, en la segunda fecha, se reporta una fuerte contaminación (Muller, 1981), a raíz del incremento de concentración de cadmio en el segundo muestreo.

El cálculo del factor de enriquecimiento (FE) reportó valores de 0.27 y 34.97 (**Tabla 11 y Figura 10**) para el primer y segundo muestreo respectivamente, con una variación porcentual de un 12765 %. Esto indica que en el primer valor existe enriquecimiento mínimo de cadmio; mientras que, el segundo valor, un enriquecimiento muy alto (Sutherland, 2000).

Tanto el Igeo como el FE incrementaron bruscamente sus valores en el segundo muestreo. Ambos índices resultaron ser superiores a los valores reportados en bahía Blanca (Baggio, 2019) y las playas la Guajira (Doria, 2018). Por otro lado, en la bahía san Julián (Pereyra et al., 2019) no se encontró presencia de Cd. Estas variaciones ocurridas en el estudio llevan a inferir que la incorporación de cadmio en los sedimentos es de origen antrópico de tipo industrial. Esto se debe al cambio abrupto en los resultados y la ausencia de eventos naturales fortuitos que puedan alterar la composición del fondo marino en tiempos relativamente cortos.

Es importante añadir que, como menciona Rosas (2005), dentro de la industria textil y curtido de pieles se generan residuos líquidos con contenido de cadmio y valores que fluctúan entre 30-115 mg/l. Estos son significativos desde el punto de vista ambiental (D.S N°004-2017-MINAM). Además, nos permite interpretar que las industrias de este rubro tendrían mayor

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

responsabilidad en el incremento del cadmio de la bahía, dentro del conjunto de vertederos de aguas residuales existentes.

Por otra parte, de acuerdo a los mapas de distribución espacial de Igeo y FE de cadmio, en la bahía Callao (**Figuras 18 y 22**) se detectó mayor vulnerabilidad por acumulación y enriquecimiento de cadmio. Estas zonas se ubican principalmente en la mezcla de los ríos Chillón y Rímac, sin minimizar otras zonas de la bahía, ya que presentan valores cercanos a los máximos reportados. Además, es en esta zona donde se ubican la mayor cantidad de descarga de efluentes (**Figura 2**).

5.3.3. Plomo (Pb)

Los resultados obtenidos en el primer muestreo tuvieron un valor mínimo de 35 mg/kg en la estación SED-G1 y un valor máximo de 285 mg/kg en la estación SED-G2. En el caso del segundo muestreo los valores mínimos y máximos resultaron 41 mg/kg en SED-G2 y 261 mg/kg en SED-G5 respectivamente. Con ello se puede apreciar que en ambos muestreos los valores tienen parecidos con los reportes presentados por el OEFA (2015); sin embargo, son superiores a los reportados en el sistema de bahías la Caldera de Chile (Valdés & Castillo, 2014), la bahía San Julián de Argentina (Pereyra et al., 2019) y a la zona de playas la Guajira en Colombia (Doria, 2018). Así mismo, cabe mencionar que en contraste con bahía Blanca (Baggio, 2019) no se hallaron concentraciones de plomo.

Cabe señalar que los resultados del primer muestreo superaron los valores ISQG (30.2 mg/kg) en los 8 puntos, mientras que para el PEL (112 mg/kg), únicamente los puntos SED-G1, SED-G3 y SED-G6 no lo superaron; siendo el punto SED-G2 el de mayor superación con un 154.5 % el PEL. En el caso del segundo muestreo de igual manera, superaron los valores ISQG en todos los puntos. Con respecto al PEL los puntos SED-G1, SED-G3 y

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

SED-G5 superaron sus valores con un pico máximo en la estación SED-5 superando un 133% el PEL (**Figura 13**).

El Igeo del plomo reportó valores de 1.99 y 1.53 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**Tabla 12 y Figura 9**). Esto significa que en ambos casos se detectó contaminación moderada (Muller, 1981). Se reportó, además una ligera reducción en los valores de un 23% con respecto al primer muestreo.

El factor de enriquecimiento (FE) reportó valores de 10.64 y 8.63 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**Tabla 12 y Figura 10**). Esto indica que en ambos casos existe enriquecimiento significante de plomo (Sutherland, 2000), con una ligera reducción en el segundo muestreo de un 19%.

Los resultados del Igeo y FE demuestran, en líneas generales, que la bahía Callao presenta niveles considerables de contaminación y enriquecimiento por plomo. Sin embargo, a diferencia de los demás escenarios mencionados, estos se encuentran en escalas menores de contaminación como el caso de bahía Blanca (Baggio, 2019). Ante esto, se prevé, de acuerdo con los argumentos dados por el OEFA (2015), que las fuentes más importantes de aporte: los Ríos Rímac y Chillón, así como las actividades portuarias, estas últimas manejan deficientemente los residuos de minerales durante el embarque.

Por otro lado, los mapas de distribución espacial de Igeo y FE de plomo en la bahía Callao (**Figuras 19 y 23**), muestran las zonas de mayor concentración de plomo y, por ende, las consideramos vulnerables las que se ubican en la zona de mezcla de los ríos Chillón y Rímac con el cuerpo marino.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

5.3.4. Cobre (Cu)

Los resultados del primer muestreo reportaron un valor mínimo de 56.2 mg/kg en la estación SED-G1 y un valor máximo de 179 mg/kg en la estación SED-G2. Mientras que en el segundo muestreo reportó un valor mínimo de 48.02 mg/kg en la estación SED-G7 y un valor máximo de 280.75 mg/kg en la estación SED-G3. Estos valores obtenidos resultaron ser ligeramente menores a los reportados por el OEFA (2015), pues en sus estudios se midieron niveles máximos de hasta 362 mg/kg. Estos reportes son mayores a los del sistema de Bahías la Caldera (Valdés & Castillo, 2014), al igual que al de bahía Blanca (Baggio, 2019), el sector de playas la Guajira (Doria, 2018) y la bahía San Julián (Pereyra et al., 2019). La razón de los resultados indica que el Cu es un metal ampliamente utilizado en diversas industrias, y así como mencionan Valdés & Castillo (2014), provienen del uso de combustibles, uso de estructuras metálicas y más.

Con respecto a la norma CEQG se aprecia que en el primer muestreo (**Figura 14**), los 8 puntos superaron excesivamente los valores ISQG (18.7 mg/kg) y PEL (108 mg/kg) con excepción de los puntos SED-G1 y SED-G6 que no superan valores de PEL, siendo además la estación SED-G2 con mayor superación porcentual de un 65.7% del PEL. Por otro lado, en el segundo muestreo, se observa que los valores de los 8 puntos superaron a los valores ISQG y el PEL, con un pico máximo en el punto SED-G3, que superó hasta en un160% del valor PEL. Hay que tener en cuenta que, para el caso del PEL, los puntos SED-G2, SED-G6 y SED-G7 no superaron sus valores.

El Igeo del cobre reportó valores de 0.78 y 1 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**Tabla 13 y Figura 9**), mostrando un incremento porcentual de un 28% en la última fecha de muestreo. Esto indica que los

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

sedimentos presentan baja contaminación por cobre (No contaminado a moderado) (Muller, 1981).

Por su parte, el factor de enriquecimiento (FE) reportó valores de 4.28 y 5.66 para el primer y segundo muestreo respectivamente (**Tabla 13 y Figura 10**), arrojando un incremento porcentual de un 32%, lo que indica que el nivel de enriquecimiento también se incrementó de moderado a enriquecimiento significante (Sutherland, 2000).

Es importante indicar que, a pesar que los valores reportados del contenido de Cu, en ambos muestreos superan los valores PEL. Los resultados del Igeo y FE indican que los niveles de contaminación y enriquecimiento por cobre aún son incipientes y pueden ser controlados con facilidad.

Por otra parte, de acuerdo a los mapas de distribución Igeo y FE del cobre **(Figuras 20 y 24**), se aprecia que las zonas de mayor acumulación de cobre y de mayor vulnerabilidad, pertenece a la zona donde se mezcla los ríos Chillón y Rímac, con el cuerpo marino.

De todas maneras, en la bahía Callao, los niveles de contaminación y enriquecimiento por cobre se encuentran muy por encima en contraste con los escenarios de las referencias mencionadas anteriormente. Algunas razones del incremento de Cu en los sedimentos marinos son atribuibles a focos de emisión de diversas actividades dentro del puerto marítimo (traslado de mercaderías y materias prima), tráfico naviero, así como los vertimientos industriales (**Figura 2**).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En Los resultados del Igeo y FE, en la bahía Callao, se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre el primer y segundo muestreo en el Hg y Cd, al cambiar de una categoría por otra. De acuerdo con las escalas de valoración, el Pb y Cu se mantuvieron estables y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambas fechas de muestreo.

- Las concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu, en los sedimentos marinos de la bahía Callao, reportaron valores superiores a los niveles ISQG y PEL de la norma de referencia CEQG, al menos en un punto o fecha de muestreo. Esto es apreciable directamente en el índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

- De acuerdo a los mapas de distribución espacial del índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu en sedimentos marinos de la bahía Callao, se detectó que las zonas de mayor vulnerabilidad, por acumulación, se encuentran ubicados con mayor intensidad en la zona central de la bahía donde se produce la mezcla de los Ríos Chillón y Rímac con aguas marinas.

- Los resultados del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento de Hg, Cd, Pb y Cu, en sedimentos marinos de la bahía Callao, alcanzan niveles de

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

enriquecimiento significativo de una fuerte contaminación; por tanto, se considera al cadmio con los valores más críticos, lo que representa mayor riesgo para el ecosistema marino.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

6.2. Recomendaciones

- El estudio de metales en sedimentos marinos amerita un análisis profundo. Para ello se recomienda aplicar el método de fraccionamiento mediante Tessier o el BCR, para identificar la distribución de los metales en sus distintas fases, formas o estados y determinar de esta manera su movilidad y disponibilidad.

- Se recomienda estudiar los procesos bioquímicos de Pb, Cu, Cd y Hg y sus interacciones en el cuerpo marino, para tener claro la ruta y el comportamiento de los metales estudiados en la presente tesis.

- Se recomienda ampliar la cantidad de puntos de muestreo dentro del área de estudio. La razón es la siguiente: la bahía Callao es un escenario extenso, por tanto, exige mayor cantidad de puntos de muestreo para recabar mayor información precisa de la zona.

- Se recomienda, de igual modo, incrementar el número de muestreos anuales a fin de recabar mayor información; se debe considerar una cantidad mayor o igual a 4 muestreos.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D. (1986). *Trace Elenients in the Terrestrial Environnent*. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1907-9
- Aliaga, M. (2010). *Situación ambiental del recurso hídrico en la cuenca baja del río Chillón y su factibilidad de recuperación para el desarrollo sostenible* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de: http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/645
- Aliaga, A., Queedo, G., & Alfaro, K. (2019). *Descontaminación del río Rímac* (Tesis de postgrado). Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú. Disponible en: http://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/UNFV/3301/SANCHEZ%20SANCHEZ%20MIGUEL%20ANGEL-%20MAESTRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Álvarez et al., (2011). Estudio biogeoquímico del embalse Suata, Venezuela, de acuerdo al contenido metálico de sus sedimentos de fondo, aguas y peces (revista científica). *Avances en ciencias e ingeniería, 3*(1), 103 – 114. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627685010
- ANA. (2016). RESOLUCIÓN JEFATURAL Nº030-2016-ANA. Recuperado de: http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/per158276anx.pdf
- Baggio, B., (2019). *Metales en sedimentos de fondo marino en el área El Rincón: concentración y distribución* (Tesis de grado). Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. Disponible en: http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4652
- Cabrera, J. (2018). *Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos y suelos de la Reserva Biológica Limoncocha – Ecuador mediante índices de polución* (Tesis de postgrado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España. Recuperado de:

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14196/409479.pdf?sequence=1

- Canadian Council of Ministers (CCME 1995). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Disponible en: http://ceqg-rcqe.ccme.ca/en/index.html#void
- Colaboradores de Wikipedia. (2021, 18 agosto). *Puerto del Callao*. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Puerto_del_Callao
- D´Itri, F. (1992). El ciclo de metilmercurio y otros metales pesados en ambientes lacustres. Institute of Water Research and Department of Fisheries and Wildlife. Michigan State University. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7357760
- DECRETO SUPREMO N°004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias (2017). Disponible en: file:///C:/Users/Marx/Downloads/ds-004-2017-minam.pdf
- Doria, C. (2018). Niveles de metales pesados en los sedimentos superficiales de las zonas de playas turísticas de la Guajira, norte de Colombia (revista de investigación). *Fundación Universidad de América*, 11(2), 49-66. Disponible en: https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/226/202
- Estival, J. R. (2019, 1 mayo). *¿Qué es la biomagnificación?* Azeral Environmental Sciences. Disponible en: http://www.azeral.es/divulgazeral/que-es-la-biomagnificacion
- El clima típico de cualquier lugar del mundo. El clima promedio en el Callao. Weather Spark. Disponible en: https://es.weatherspark.com/y/20442/Clima-promedio-en-El-Callao-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- EPA de EE. UU. (1996). “Método 3050B: Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos”, Revisión 2. Washington, DC. Disponible en: https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils
- García M., Maza J. (1998). Origen y propiedades de los sedimentos, capítulo 7 del manual de ingeniería de ríos. Manual de ingeniería de ríos (versión electrónica). México. Disponible en: http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/origen_y_propiedades_de_los_sedimentos.pdf
- GEF-ONUDI-IMARPE-IFOP. (2002). Manejo Integrado Gran Ecosistema Marino De La Corriente De Humboldt. Recuperado de: http://humboldt.iwlearn.org/es/informacion-y-publicacion/GEFMODULOIProductividadVol1.pdf
- Geogpsperu. Línea base ambiental. Disponible en: https://www.geogpsperu.com/
- Guzmán, J. (2014). Cobre total en organismos bentónicos y su relación con acciones antrópicas y naturales (tesis de post grado). Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. Disponible en: http://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/2292
- Hlavay J., Prohaska T., Weisz M., Wenzel W.W. y Stingeder G.J. (2004). Determination of trace elements bound to soil and sediment fractions. Pure Appl. Chem.76, 415–442. Disponible en: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac200476020415/html
- Instituto español de oceanografía, (s.f). Medio ambiente marino. Oceanografía. Disponible en: http://www.ieo-santander.net/investigacion_oceanografia.php

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- Morales, L., (2019). evaluación de la concentración del PM10 y determinación de su composición química por ICP –MS en cuatro estaciones de muestreo de la ciudad de Arequipa (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. Disponible en: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11235
- Müller, G., (1986). Schadstoffe in Sedimenten - Sedimente als Schadstoffe. Institut für Sedimentforschung der Universität Heidelberg,107-126. Recuperado de: https://www.zobodat.at/pdf/MittGeolGes_79_0107-0126.pdf
- Oceanografía, (2020). Wikipedia, La enciclopedia libre. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Oceanograf%C3%ADa
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2016). Evaluación Ambiental de la bahía Callao durante el año 2016 (N°102-2016-0EFA/DE-SDLB-CEAI). Recuperado de: http://visorsig.oefa.gob.pe/datos_DE/PM0203/PM020302/02/IF/IF_0102-2016-OEFA-DE-SDLB-CEAI.pdf
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014). Fiscalización ambiental en aguas residuales. Disponible en: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Pereyra, B., Scavuzzo, V., Collm, N., Baudino, M., & Moscardi, C. (2020). Estado del ambiente de la Bahía San Julián, departamento Magallanes, Santa Cruz, Argentina. Informes Científicos Técnicos - UNPA, 12(1), 96-121. doi: https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n1.705
- Pérez, I. (2015). Evaluación De La Concentración De Metales En Sedimentos De La Laguna De Chimaliapan, Lerma Estado De México (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Del Valle De Toluca, México. Disponible en: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?search-option=everywhere&orig_q=Evaluaci%C3%B3n%20De%20La%20Concentraci

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

%C3%B3n%20De%20Metales%20En%20Sedimentos%20De%20La%20Laguna%20De%20Chimaliapan%2C%20Lerma%20Estado%20De%20M%C3%A9xico

- Rosas, H. (2003). Validación de la metodología para la determinación de Sb, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn en sedimentos por ICO-MS (Revista de investigación). UPB - INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, 3(1), 48 – 53. doi: 10.23881/idupbo.003.1-5i
- Rosas, H. (2005). Contaminación de sedimentos del río anoia por metales pesados (Revista de investigación). UPB - INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, 5, 75 – 89. Disponible en: http://www.upb.edu/sites/default/files/7RosasN5.pdf
- Rovira, J., (2016). Contaminación por metales pesados en los sedimentos del río Jarama y su bioasimilación por Tubificidos (Tesis doctoral). Universidad Complutense De Madrid, Madrid, España. Disponible en: https://eprints.ucm.es/35034/
- Sánchez, C. (08 de febrero 2019). Normas APA – 7ma (séptima) edición. Normas APA (7ma edición). Disponible en: https://normas-apa.org/
- Sánchez, M. (s.f.). La corriente de Humboldt. Disponible en: https://www.meteorologiaenred.com/la-corriente-humboldt.html
- Sutherland, R. (2000). Lecho de metales traza asociados a sedimentos en un arroyo urbano, Oahu, Hawaii. Environmental Geology, 39, 611–627 doi: https://doi.org/10.1007/s002540050473
- Tovar, A., (2000). Diccionario ecológico, forestal, ambiental, recursos naturales, conservación. Lima, Perú: Córdoba sistem S.A.
- Torres, H., & Trinidad, J., (2003). La dinámica marina. "Industria y Minería" (n. 351); pp. 46-51. Recuperado de: http://oa.upm.es/3428/

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

- Turekian, K., Wedepohl, K. (1961). Distribución de los elementos en algunas unidades importantes de la corteza terrestre. Boletín GSA; 72 (2): 175-192. doi: https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2
- United States Environmental Protection Agency (EPA, 2001). EPA-823-B-01-002: Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual. Washington, DC, EE.UU. disponible en: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20003PLT.txt
- Valdés, J. (s.f.). Geoquímica marina. Sedimentos marinos. Universidad de Antofagasta, Chile. https://www.yumpu.com/es/document/view/14575396/capitulo-6-sedimentos-marinos-comite-oceanografico-nacional
- 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. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-560X2014000300010&lng=es&tlng=es
- Valdés, J., Guiñez, M., Castillo, A., & Vega, S., (2014). Contenido de Cu, Pb y Zn en sedimentos y organismos bentónicos de la bahía San Jorge (norte de Chile): Acumulación y biotransferencia en sistemas costeros submareales. Ciencias marinas, 40(1), 45-58. Doi: https://doi.org/10.7773/cm.v40i1.2318
- Velazco, F., (2001). Geología marina y ambiental del área entre la bahía Callao y ventanilla (Tesis de pregrado). Universidad Nacional De Ingeniería, Lima, Perú. Disponible en: http://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/2095

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXOS

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 1. Panel fotográfico

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 28

Vistas panorámicas del proceso de dragado

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 29

Vistas panorámicas del proceso de muestreo

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 30

Vista de las muestras tomadas de los 8 puntos en el primer y segundo muestreo

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 2. Informes de ensayo del laboratorio

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-4620

I.- DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: MARX PANTOJA MEJÍA
2.-DIRECCIÓN	: URB. PREVI - MZ. 43 LTE. 5 - EL NARANJAL - LOS OLIVOS - LIMA
3.-PROYECTO	: EVALUACION DE SEDIMENTOS MARINOS-CALLAO
4.-PROCEDENCIA	: BAHIA DEL CALLAO
5.-SOLICITANTE	: MARX PANTOJA MEJÍA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: OS-19-1607
7.-PLAN DE MONITOREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2019-08-07

II.-DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-MATRIZ	: SEDIMENTOS
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 8
3.-FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	: 2019-07-23
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2019-07-23 al 2019-08-07

José Luis Chipana Chipana
Director Técnico
CQP 1104

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-4620

III.-METODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Mercurio[1]	EPA Method 7471 B Rev.2 2007	Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique)
Metales Totales[2]	EPA Method 3050B - Rev.2 / EPA Method 200.7 - Rev. 4.4	Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

"EPA" : U. S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemicals Analysis

[1] Parámetro acreditado por INACAL-DA

[2] Parámetro acreditado por IAS

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-4620

IV. RESULTADOS

ITEM			1	2	3
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-12462	M-12463	M-12464
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G1	SED-G2	SED-G3
COORDENADAS:			E: 0262041	E: 0265125	E: 0263060
UTM WGS 84:			N: 8668173	N: 8671056	N: 8672322
MATRIZ:			SEDIMENTOS		
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA		
FECHA DE MUESTREO		FECHA:	2019-07-23	2019-07-23	2019-07-23
		HORA:	09:40	10:30	11:10
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.D.M**	**RESULTADOS**		
Mercurio[1]	mg/Kg MS	0.40	3.50	3.70	1.70
Metales totales [2]					
Cadmio	mg/kg MS	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cobre	mg/kg MS	0.3	56.2	179.0	124.9
Plomo	mg/kg MS	1	35	285	88

[1] Parámetro acreditado por INACAL-DA

[2] Parámetro acreditado por IAS

L.D.M.: Límite de detección de método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-4620

IV. RESULTADOS

ITEM			4	5	6
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-12465	M-12466	M-12467
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G4	SED-G5	SED-G6
COORDENADAS:			E: 0266204	E: 0263444	E: 0265555
UTM WGS 84:			N: 8674897	N: 8676452	N: 8678625
MATRIZ:			SEDIMENTOS		
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA		
FECHA DE MUESTREO		FECHA:	2019-07-23	2019-07-23	2019-07-23
		HORA:	11:50	12:45	13:30
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.D.M**	**RESULTADOS**		
Mercurio[1]	mg/Kg MS	0.40	3.70	4.20	4.20
Metales totales [2]					
Cadmio	mg/kg MS	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cobre	mg/kg MS	0.3	125.6	123.7	104.0
Plomo	mg/kg MS	1	176	134	85

[1] Parámetro acreditado por INACAL-DA

[2] Parámetro acreditado por IAS

L.D.M.: Límite de detección de método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-4620

IV. RESULTADOS

ITEM			7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-12468	M-12469
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G7	SED-G8
COORDENADAS:			E: 0262819	E: 0264639
UTM WGS 84:			N: 8680238	N: 8683528
MATRIZ:			SEDIMENTOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA	
FECHA DE MUESTREO		FECHA:	2019-07-23	2019-07-23
		HORA:	14:50	15:45
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.D.M**	**RESULTADOS**	
Mercurio[1]	mg/Kg MS	0.40	5.00	1.00
Metales totales [2]				
Cadmio	mg/kg MS	0.1	<0.1	<0.1
Cobre	mg/kg MS	0.3	118.1	136.7
Plomo	mg/kg MS	1	141	162

[1] Parámetro acreditado por INACAL-DA

[2] Parámetro acreditado por IAS

L.D.M.: Límite de detección de método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

"FIN DE DOCUMENTO"

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-7209

I.- DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: ROOSEVELT MARX PANTOJA MEJÍA
2.-DIRECCIÓN	: MZ. 43 LTE. 5 URB.PREVI - LOS OLIVOS - LIMA
3.-PROYECTO	: EVALUACION DE SEDIMENTOS MARINOS - CALLAO
4.-PROCEDENCIA	: CALLAO
5.-SOLICITANTE	: MARX PANTOJA MEJÍA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: OS-19-2522
7.-PLAN DE MONITOREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2019-11-18

II.-DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: SEDIMENTOS
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 8
3.-FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	: 2019-11-05
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2019-11-05 al 2019-11-18

María Luisa Avila Zárate
Jefa de Laboratorio

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-7209

III.-METODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Mercurio [1]	EPA Method 7471 B Rev.2 2007	Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique)
Metales Totales [2]	EPA Method 3050B - Rev.2 / EPA Method 200.7 - Rev. 4.4	Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

"EPA" : U. S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemicals Analysis

[1] Ensayo acreditado por el INACAL - DA

[2] Ensayo acreditado por el IAS

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-19-7209

IV. RESULTADOS

ITEM			1	2	3	4	5	6
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-19586	M-19587	M-19588	M-19589	M-19590	M-19591
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G1	SED-G2	SED-G3	SED-G4	SED-G5	SED-G6
COORDENADAS:			E: 0262041	E: 0265125	E: 0263060	E: 0266204	E: 0263444	E: 0265555
UTM WGS 84:			N: 8668173	N: 8671056	N: 8672322	N: 8674897	N: 8676452	N: 8678625
PRODUCTO:			SEDIMENTOS					
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA					
INICIO DE MUESTREO	FECHA:		2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05
	HORA:		09:10	09:50	10:30	11:15	12:05	12:55
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.C.M.**	**RESULTADOS**					
Mercurio	mg/Kg MS	0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Metales Totales		**L.D.M.**						
Cadmio	mg/Kg MS	0.1	6.76	5.92	7.01	6.48	7.06	5.95
Cobre	mg/Kg MS	0.3	249.02	100.77	280.75	196.08	150.59	91.97
Plomo	mg/Kg MS	1	113	41	114	106	261	78

L.C.M.: Límite de cuantificación del método

L.D.M.: Límite de detección del método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO Nº: IE-19-7209

IV. RESULTADOS

ITEM			7	8
		CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-19592	M-19593
		CÓDIGO DEL CLIENTE:	SED-G7	SED-G8
		COORDENADAS:	E: 0262819	E: 0264639
		UTM WGS 84:	N: 8680238	N: 8683528
		PRODUCTO:	SEDIMENTOS	
		INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
INICIO DE MUESTREO		FECHA:	2019-11-05	2019-11-05
		HORA:	13:40	14:25
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.C.M.**	**RESULTADOS**	
Mercurio	mg/Kg MS	0.4	<0.4	<0.4
Metales Totales		**L.D.M.**		
Cadmio	mg/Kg MS	0.1	5.71	6.42
Cobre	mg/Kg MS	0.3	48.02	117.98
Plomo	mg/Kg MS	1	42	65

L.C.M.: Límite de cuantificación del método

L.D.M.: Límite de detección del método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

"FIN DE DOCUMENTO"

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ALAB
ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.

IAS ACCREDITED Testing Laboratory TL-833

INFORME DE ENSAYO N°: IE-20-1447

I.- DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: ROOSEVELT MARX PANTOJA MEJÍA
2.-DIRECCIÓN	: MZ. 43 LTE. 5 URB. PREVI - LOS OLIVOS - LIMA
3.-PROYECTO	: EVALUACION DE SEDIMENTOS MARINOS - CALLAO
4.-PROCEDENCIA	: CALLAO
5.-SOLICITANTE	: MARX PANTOJA MEJÍA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: OS-20-0507
7.-PLAN DE MONITOREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2020-03-02

II.-DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: SEDIMENTOS
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 8
3.-FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	: 2019-11-05
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2019-11-05 al 2020-03-02

María Luisa Avila Zárate
Jefa de Laboratorio

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-20-1447

III.-METODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Metales Totales [2]	EPA Method 3050B - Rev.2 / EPA Method 200.7 - Rev. 4.4	Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

"EPA" : U. S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemicals Analysis

[2] Ensayo acreditado por el IAS

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

INFORME DE ENSAYO N°: IE-20-1447

IV. RESULTADOS

ITEM			1	2	3	4	5	6
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-19586	M-19587	M-19588	M-19589	M-19590	M-19591
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G1	SED-G2	SED-G3	SED-G4	SED-G5	SED-G6
COORDENADAS:			E: 0262041	E: 0265125	E: 0263060	E: 0266204	E: 0263444	E: 0265555
UTM WGS 84:			N: 8668173	N: 8671056	N: 8672322	N: 8674897	N: 8676452	N: 8678625
PRODUCTO:			SEDIMENTOS					
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA					
MUESTREO	FECHA:		2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05	2019-11-05
	HORA:		09:10	09:50	10:30	11:15	12:05	12:55
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.D.M.**	**RESULTADOS**					
Metales Totales								
Hierro	mg/Kg MS	3.00	28 004.7	41 419.8	30 313.3	27 180.9	27 965.9	20 989.4

INFORME DE ENSAYO N°: IE-20-1447

IV. RESULTADOS

ITEM			7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO:			M-19592	M-19593
CÓDIGO DEL CLIENTE:			SED-G7	SED-G8
COORDENADAS:			E: 0262819	E: 0264639
UTM WGS 84:			N: 8680238	N: 8683528
PRODUCTO:			SEDIMENTOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:			NO APLICA	
MUESTREO	FECHA:		2019-11-05	2019-11-05
	HORA:		13:40	14:25
ENSAYO	**UNIDAD**	**L.D.M.**	**RESULTADOS**	
Metales Totales				
Hierro	mg/Kg MS	3.00	37 880.8	27 057.4

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

Los resultados contenidos en el presente documento sólo estan relacionados con los items ensayados.

No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.

Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

"FIN DE DOCUMENTO"

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 3. Tablas de resumen de los cálculos de la investigación

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 7

Concentraciones de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo

	Hg (1)	Hg (2)	Pb (1)	Pb (2)	Cd (1)	Cd (2)	Cu (1)	Cu (2)	
SED-G1	3.5	0.3	35	113	0.05	6.76	56.2	249.02	
SED-G2	3.7	0.3	285	41	0.05	5.92	179	100.77	
SED-G3	1.7	0.3	88	114	0.05	7.01	124.9	280.75	
SED-G4	3.7	0.3	176	106	0.05	6.48	125.6	196.08	
SED-G5	4.2	0.3	134	261	0.05	7.06	123.7	150.59	
SED-G6	4.2	0.3	85	78	0.05	5.95	104	91.97	
SED-G7	5	0.3	141	42	0.05	5.71	118.1	48.02	
SED-G8	1	0.3	162	65	0.05	6.42	136.7	117.98	
	3.38	**0.30**	**138.25**	**102.50**	**0.05**	**6.41**	**121.03**	**154.40**	Promedio

Nota: valores reportados del laboratorio en mg/kg.

Tabla 8

Valores de Igeo de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo

	Hg (1)	Hg (2)	Pb (1)	Pb (2)	Cd (1)	Cd (2)	Cu (1)	Cu (2)	
SED-G1	2.544	-1.000	0.222	1.913	-3.170	3.909	-0.264	1.883	
SED-G2	2.624	-1.000	3.248	0.451	-3.170	3.718	1.407	0.578	
SED-G3	1.503	-1.000	1.553	1.926	-3.170	3.961	0.888	2.056	
SED-G4	2.624	-1.000	2.553	1.821	-3.170	3.848	0.896	1.538	
SED-G5	2.807	-1.000	2.159	3.121	-3.170	3.972	0.874	1.158	
SED-G6	2.807	-1.000	1.503	1.379	-3.170	3.725	0.624	0.446	
SED-G7	3.059	-1.000	2.233	0.485	-3.170	3.665	0.807	-0.491	
SED-G8	0.737	-1.000	2.433	1.115	-3.170	3.835	1.018	0.806	
	2.34	**-1.00**	**1.99**	**1.53**	**-3.17**	**3.83**	**0.78**	**1.00**	Promedio
	0.80	**0.00**	**0.91**	**0.88**	**0.00**	**0.12**	**0.48**	**0.84**	Desv. Est.

Nota: los valores del Igeo no contienen unidades, su interpretación se basa en una escala de acuerdo a Muller (1981).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 9

Valores de FE de Hg, Cd, Pb y Cu en ambas fechas de muestreo

	Hg (1)	Hg (2)	Pb (1)	Pb (2)	Cd (1)	Cd (2)	Cu (1)	Cu (2)	
SED-G1	14.748	1.264	2.950	9.523	0.281	37.978	2.105	9.327	
SED-G2	10.541	0.855	16.239	2.336	0.190	22.487	4.533	2.552	
SED-G3	6.618	1.168	6.851	8.875	0.260	36.384	4.322	9.714	
SED-G4	16.063	1.302	15.281	9.204	0.289	37.509	4.847	7.567	
SED-G5	17.722	1.266	11.308	22.025	0.281	39.719	4.639	5.648	
SED-G6	23.612	1.687	9.557	8.770	0.375	44.600	5.197	4.596	
SED-G7	15.575	0.935	8.784	2.617	0.208	23.716	3.270	1.330	
SED-G8	4.361	1.308	14.130	5.669	0.291	37.331	5.299	4.574	
	13.65	**1.22**	**10.64**	**8.63**	**0.27**	**34.97**	**4.28**	**5.66**	Promedio
	6.23	**0.25**	**4.53**	**6.15**	**0.06**	**7.75**	**1.08**	**3.03**	Desv. Est.

Nota: los valores del FE no contienen unidades, su interpretación se basa en una escala de acuerdo a Sutherland (2000).

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 4. Tablas de clasificación de Igeo y FE de los reportes

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 10

Igeo y FE de Hg en la Bahía del Callao

	Igeo	Escala de valoración (Müller, 1981)	Grado de contaminación
Primer muestreo	2.34	2≤ Igeo ≤3	Moderado a fuertemente contaminado
Segundo muestreo	-1	Igeo ≤ 0	No contaminado
	FE	**Escala de valoración (sutherland, 2000)**	**Grado de enriquecimiento**
Primer muestreo	13.65	5 < FE<20	existe enriquecimiento significante
Segundo muestreo	1.22	FE < 2	existe enriquecimiento mínimo

Tabla 11

Igeo y FE de Cd en la Bahía del Callao

	Igeo	Escala de valoración (Müller, 1981)	Grado de contaminación
Primer muestreo	-3.17	Igeo ≤ 0	No contaminado
Segundo muestreo	3.83	3≤ Igeo ≤4	fuertemente contaminado
	FE	**Escala de valoración (sutherland, 2000)**	**Grado de enriquecimiento**
Primer muestreo	0.27	FE < 2	existe enriquecimiento mínimo
Segundo muestreo	34.97	20<FE<40	Enriquecimiento muy alto

Tabla 12

Igeo y FE de Pb en la Bahía del Callao

	Igeo	Escala de valoración (Müller, 1981)	Grado de contaminación
Primer muestreo	1.99	1≤ Igeo ≤2	Moderadamente contaminado
Segundo muestreo	1.53	1≤ Igeo ≤2	Moderadamente contaminado
	FE	**Escala de valoración (sutherland, 2000)**	**Grado de enriquecimiento**
Primer muestreo	10.64	5 < FE<20	existe enriquecimiento significante
Segundo muestreo	8.63	5 < FE<20	existe enriquecimiento significante

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Tabla 13

Igeo y FE de Cu en la Bahía del Callao

	Igeo	Escala de valoración (Müller, 1981)	Grado de contaminación
Primer muestreo	0.78	0≤ Igeo ≤1	No contaminado a moderado
Segundo muestreo	1	0≤ Igeo ≤1	No contaminado a moderado
	FE	**Escala de valoración (sutherland, 2000)**	**Grado de enriquecimiento**
Primer muestreo	4.28	2 < FE < 5	Existe enriquecimiento moderado
Segundo muestreo	5.66	5 < FE<20	existe enriquecimiento significante

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 5. Prueba Estadística Tukey

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Tabla 14

Información del factor (Igeo)

Factor	Niveles	Valores
Factor	8	Hg (1); Hg (2); Pb (1); Pb (2); Cd (1); Cd (2); Cu (1); Cu (2)

Tabla 15

Análisis de Varianza (Igeo)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	7	259.37	37.0524	93.52	0.000
Error	56	22.19	0.3962		
Total	63	281.55			

Tabla 16

Resumen del modelo (Igeo)

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.629427	92.12%	91.14%	89.71%

Tabla 17

Medias (Igeo)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Hg (1)	8	2.338	0.795	(1.893; 2.784)

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Hg (2)	8	-1.000	0.000	(-1.446; -0.554)
Pb (1)	8	1.988	0.905	(1.542; 2.434)
Pb (2)	8	1.526	0.876	(1.081; 1.972)
Cd (1)	8	-3.170	0.000	(-3.616; -2.724)
Cd (2)	8	3.8291	0.1163	(3.3833; 4.2749)
Cu (1)	8	0.781	0.478	(0.335; 1.227)
Cu (2)	8	0.997	0.842	(0.551; 1.443)

Desv.Est. agrupada = 0.629427

Tabla 18

Comparaciones en parejas de Tukey (Igeo)

Factor	N	Media	Agrupación			
Cd (2)	8	3.8291	A			
Hg (1)	8	2.338		B		
Pb (1)	8	1.988		B		
Pb (2)	8	1.526		B	C	
Cu (2)	8	0.997			C	
Cu (1)	8	0.781			C	
Hg (2)	8	-1.000				D
Cd (1)	8	-3.170				E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 19

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias (Igeo)

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Hg (2) - Hg (1)	**-3.338**	**0.315**	**(-4.329; -2.348)**	**-10.61**	**0.000**
Pb (1) - Hg (1)	-0.350	0.315	(-1.341; 0.640)	-1.11	0.951
Pb (2) - Hg (1)	-0.812	0.315	(-1.802; 0.178)	-2.58	0.185
Cd (1) - Hg (1)	-5.508	0.315	(-6.499; -4.518)	-17.50	0.000
Cd (2) - Hg (1)	1.491	0.315	(0.501; 2.481)	4.74	0.000
Cu (1) - Hg (1)	-1.557	0.315	(-2.547; -0.567)	-4.95	0.000
Cu (2) - Hg (1)	-1.341	0.315	(-2.332; -0.351)	-4.26	0.002

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Pb (1) - Hg (2)	2.988	0.315	(1.998; 3.978)	9.49	0.000
Pb (2) - Hg (2)	2.526	0.315	(1.536; 3.517)	8.03	0.000
Cd (1) - Hg (2)	-2.170	0.315	(-3.160; -1.180)	-6.89	0.000
Cd (2) - Hg (2)	4.829	0.315	(3.839; 5.819)	15.34	0.000
Cu (1) - Hg (2)	1.781	0.315	(0.791; 2.771)	5.66	0.000
Cu (2) - Hg (2)	1.997	0.315	(1.007; 2.987)	6.34	0.000
Pb (2) - Pb (1)	**-0.461**	**0.315**	**(-1.452; 0.529)**	**-1.47**	**0.822**
Cd (1) - Pb (1)	-5.158	0.315	(-6.148; -4.167)	-16.39	0.000
Cd (2) - Pb (1)	1.841	0.315	(0.851; 2.832)	5.85	0.000
Cu (1) - Pb (1)	-1.207	0.315	(-2.197; -0.216)	-3.83	0.007
Cu (2) - Pb (1)	-0.991	0.315	(-1.981; -0.001)	-3.15	0.050
Cd (1) - Pb (2)	-4.696	0.315	(-5.687; -3.706)	-14.92	0.000
Cd (2) - Pb (2)	2.303	0.315	(1.312; 3.293)	7.32	0.000
Cu (1) - Pb (2)	-0.745	0.315	(-1.736; 0.245)	-2.37	0.277
Cu (2) - Pb (2)	-0.530	0.315	(-1.520; 0.461)	-1.68	0.698
Cd (2) - Cd (1)	**6.999**	**0.315**	**(6.009; 7.989)**	**22.24**	**0.000**
Cu (1) - Cd (1)	3.951	0.315	(2.961; 4.941)	12.55	0.000
Cu (2) - Cd (1)	4.167	0.315	(3.176; 5.157)	13.24	0.000
Cu (1) - Cd (2)	-3.048	0.315	(-4.038; -2.058)	-9.68	0.000
Cu (2) - Cd (2)	-2.832	0.315	(-3.823; -1.842)	-9.00	0.000
Cu (2) - Cu (1)	**0.216**	**0.315**	**(-0.775; 1.206)**	**0.69**	**0.997**

Nivel de confianza individual = 99.74%

Como el *p-valor* <0.05 para Cadmio (1) - Cadmio (2) y Mercurio (1) - Mercurio (2) se puede afirmar que existen diferencias entre el primer y segundo muestreo, lo contrario sucede para Pb(1)-Pb(2) y Cu(1)-Cu(2) pues el *p-valor*>0.05.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Tabla 20

Información del factor (FE)

Factor	Niveles	Valores
Factor	8	Hg (1); Hg (2); Pb (1); Pb (2); Cd (1); Cd (2); Cu (1); Cu (2)

Tabla 21

Análisis de Varianza (FE)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	7	6897	985.26	46.98	0.000
Error	56	1174	20.97		
Total	63	8071			

Tabla 22

Resumen del modelo (FE)

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.57960	85.45%	83.63%	80.99%

Tabla 23

Medias (FE)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Hg (1)	8	13.65	6.23	(10.41; 16.90)

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Hg (2)	8	1.2230	0.2547	(-2.0205; 4.4665)
Pb (1)	8	10.64	4.53	(7.39; 13.88)
Pb (2)	8	8.63	6.15	(5.38; 11.87)
Cd (1)	8	0.2718	0.0566	(-2.9717; 3.5153)
Cd (2)	8	34.97	7.75	(31.72; 38.21)
Cu (1)	8	4.277	1.079	(1.033; 7.520)
Cu (2)	8	5.66	3.03	(2.42; 8.91)

Desv.Est. agrupada = 4.57960

Tabla 24

Comparaciones en parejas de Tukey (FE)

Factor	N	Media	Agrupación		
Cd (2)	8	34.97	A		
Hg (1)	8	13.65		B	
Pb (1)	8	10.64		B	C
Pb (2)	8	8.63		B	C
Cu (2)	8	5.66			C D
Cu (1)	8	4.277			C D
Hg (2)	8	1.2230			D
Cd (1)	8	0.2718			D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 25

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias (FE)

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Hg (2) - Hg (1)	**-12.43**	**2.29**	**(-19.64; -5.23)**	**-5.43**	**0.000**
Pb (1) - Hg (1)	-3.02	2.29	(-10.22; 4.19)	-1.32	0.888
Pb (2) - Hg (1)	-5.03	2.29	(-12.23; 2.18)	-2.20	0.370
Cd (1) - Hg (1)	-13.38	2.29	(-20.59; -6.18)	-5.84	0.000
Cd (2) - Hg (1)	21.31	2.29	(14.11; 28.52)	9.31	0.000
Cu (1) - Hg (1)	-9.38	2.29	(-16.58; -2.17)	-4.10	0.003
Cu (2) - Hg (1)	-7.99	2.29	(-15.20; -0.79)	-3.49	0.020

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Pb (1) - Hg (2)	9.41	2.29	(2.21; 16.62)	4.11	0.003
Pb (2) - Hg (2)	7.40	2.29	(0.20; 14.61)	3.23	0.040
Cd (1) - Hg (2)	-0.95	2.29	(-8.16; 6.25)	-0.42	1.000
Cd (2) - Hg (2)	33.74	2.29	(26.54; 40.95)	14.74	0.000
Cu (1) - Hg (2)	3.05	2.29	(-4.15; 10.26)	1.33	0.882
Cu (2) - Hg (2)	4.44	2.29	(-2.76; 11.65)	1.94	0.531
Pb (2) - Pb (1)	**-2.01**	**2.29**	**(-9.22; 5.20)**	**-0.88**	**0.987**
Cd (1) - Pb (1)	-10.37	2.29	(-17.57; -3.16)	-4.53	0.001
Cd (2) - Pb (1)	24.33	2.29	(17.12; 31.53)	10.62	0.000
Cu (1) - Pb (1)	-6.36	2.29	(-13.57; 0.84)	-2.78	0.122
Cu (2) - Pb (1)	-4.97	2.29	(-12.18; 2.23)	-2.17	0.384
Cd (1) - Pb (2)	-8.36	2.29	(-15.56; -1.15)	-3.65	0.013
Cd (2) - Pb (2)	26.34	2.29	(19.13; 33.54)	11.50	0.000
Cu (1) - Pb (2)	-4.35	2.29	(-11.56; 2.85)	-1.90	0.557
Cu (2) - Pb (2)	-2.96	2.29	(-10.17; 4.24)	-1.29	0.897
Cd (2) - Cd (1)	**34.69**	**2.29**	**(27.49; 41.90)**	**15.15**	**0.000**
Cu (1) - Cd (1)	4.00	2.29	(-3.20; 11.21)	1.75	0.656
Cu (2) - Cd (1)	5.39	2.29	(-1.81; 12.60)	2.35	0.284
Cu (1) - Cd (2)	-30.69	2.29	(-37.89; -23.48)	-13.40	0.000
Cu (2) - Cd (2)	-29.30	2.29	(-36.51; -22.10)	-12.80	0.000
Cu (2) - Cu (1)	**1.39**	**2.29**	**(-5.82; 8.59)**	**0.61**	**0.999**

Nivel de confianza individual = 99.74%

Como el *p-valor* <0.05 para Cadmio (1) - Cadmio (2) y Mercurio (1) - Mercurio (2) se puede afirmar que existen diferencias entre el primer y segundo muestreo, lo contrario sucede para Pb(1)-Pb(2) y Cu(1)-Cu(2) pues el *p-valor*>0.05.

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 6. Itinerario de trabajo para el muestreo de sedimentos en la Bahía el Callao

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Itinerario de trabajo de campo

6:00 am	• Coordinaciones con el laboratorio y traslado de materiales y equipos hacia el sitio de estudio (bahía el Callao).
7:00 am	• Arribo a la playa "la punta", Callao, desayuno y compra de refrigerio para el día. • Reunión y coordinaciones del plan de trabajo con el motorista de la embarcación.
8:00 am	• Embarque e inicio del recorrido de los puntos para el muestreo desde "La Punta" con dirección a "Ventanilla"
12:00 pm	• Retorno a "la punta" • Refrigerio • Acondicionamiento de las muestras • Verificación de datos, cadena de custodia, etiquetas, fechas, códigos, etc.
2:00 pm	• Traslado de las muestras al laboratorio • Entrega de muestras • Coordinaciones finales en laboratorio
4:00 pm	• Retorno a domicilio

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 7. Formato de check list de herramientas

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

CHECK LIST DE HERRAMIENTAS

RESPONSABLE			
FECHA		HORA	
LUGAR DE SALIDA		DESTINO	

NOMBRE DE HERRAMIENTO O EQUIPO	CANTIDAD	ESTADO

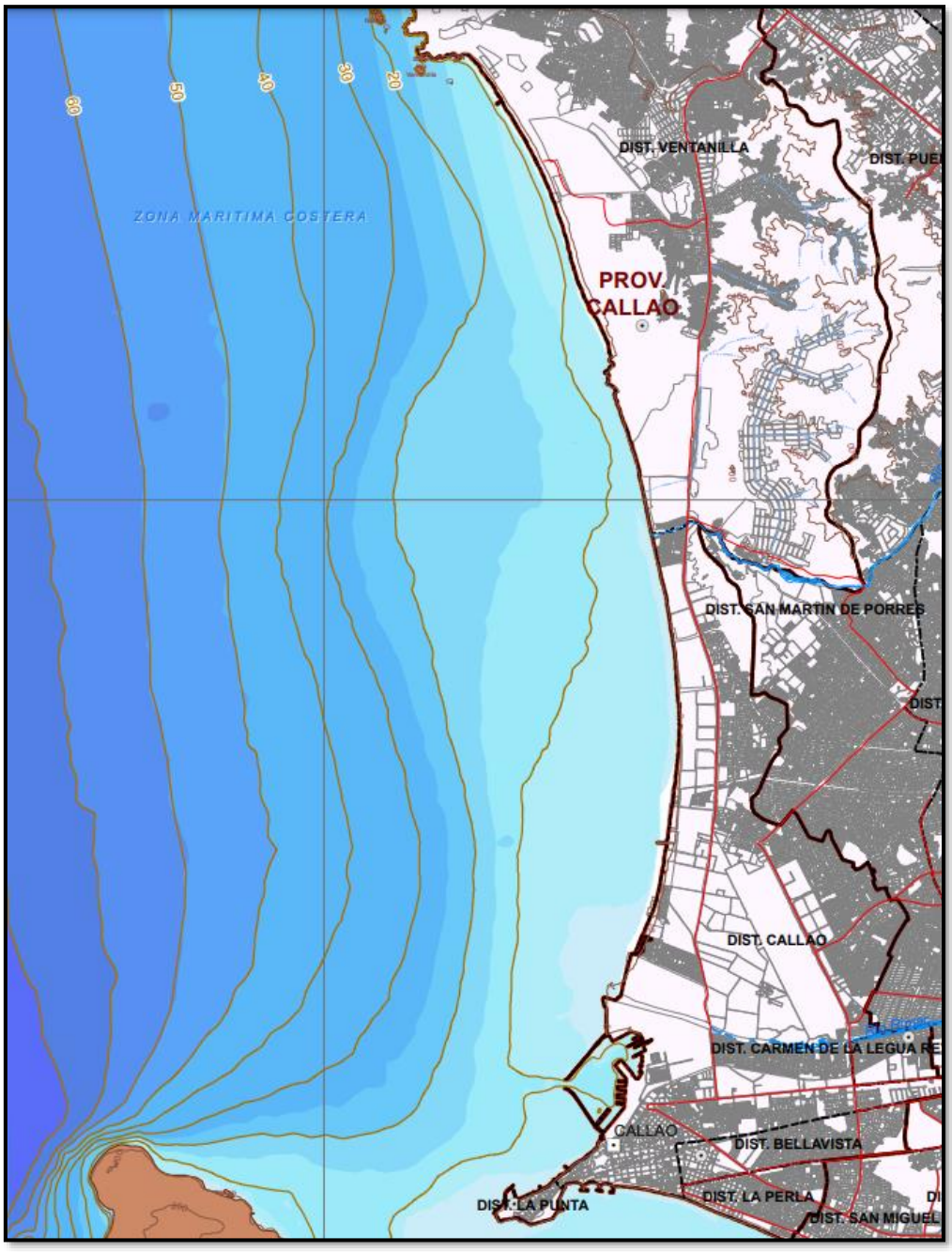
Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

ANEXO 7. Mapa de batimetría de la bahía Callao

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú

Figura 31

Mapa de batimetría de la bahía Callao



Nota: Adaptado de “ESTUDIO OCEANOGRAFICO DE LA BAHIA DEL CALLAO – VENTANILLA Y ZONAS DE INFLUENCIA – 2013”

Repositorio Institucional - UNASAM - Perú