

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**



“Metales traza relacionados a actividades antropogénicas en sedimentos marinos superficiales y aguas residuales tratadas de la frontera Tijuana (B.C.) - California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México.”

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

BRIANDA JANNYN VALENZUELA SUÁREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. AGOSTO DE 2021

RESUMEN

El estudio de la contaminación por metales traza (MeT) es de gran interés debido a los efectos potencialmente tóxicos para los organismos que habitan en los cuerpos de agua. Su ingreso a los cuerpos de agua puede ocurrir por vía natural (intemperismo, erosión) o antropogénica (minería, agricultura, descarga de aguas residuales, etc.), llegando a los sedimentos que se depositan en el fondo. Los MeT de origen natural en los sedimentos marinos se encuentran en diferentes concentraciones dependiendo de las características geológicas del área. Generalmente, su presencia en los sistemas marinos está asociada a las partículas en suspensión y sedimentos. Entre estos MeT se encuentra el Cromo, Zinc y Mercurio; ampliamente usados en la fabricación de pigmentos, cemento, conservadores textiles, agentes anticorrosivos y baterías, para el caso del Cr, actividades industriales como extracción, combustión de carbón y rechazos, elaboración del acero, galvanizado del hierro, producción de latón, fabricación de pinturas e insumo farmacéutico, para el caso del Zn y en la industria minera, industria cloro-álcali, uso como fungicida o en pinturas, catalizadores, relleno dental, aparatos eléctricos como lo son lámparas, pilas y rectificadores de corriente, para el caso del Hg. El Cr, Zn y Hg son metales particularmente importantes debido a que son potencialmente tóxicos para los organismos acuáticos y carcinogénico para los mamíferos incluyendo al ser humano. El objetivo de este trabajo es determinar la concentración de Cr, Zn, Hg y Fe (normalizador) en sedimentos marinos superficiales y en los efluentes de las aguas residuales tratadas (EART) de las cuatro principales plantas de tratamiento de la región fronteriza Tijuana (B.C)-California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C, México. Así mismo, determinar su distribución espacial en la zona, e identificar sitios enriquecidos por estos metales. Para ello, en 2018 se colectaron muestras de sedimentos marinos superficiales (n = 97) y, en 2020, se colectaron muestras de aguas residuales (n = 5). Para su análisis, se realizaron digestiones con HNO₃:HCl (1:3 v/v). Para su cuantificación se utilizó un espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES 4100). Adicionalmente, se midió la granulometría y contenido de carbono orgánico del sedimento para determinar el efecto de dichos parámetros en la distribución del Cr, Zn y Hg en el área de estudio. Aunque diversos estudios consideran a los EART como una de sus principales fuentes de MeT a la zona de estudio, hasta nuestro conocimiento no

existen reportes de las concentraciones descargadas por los efluentes que confirmen dicha afirmación. En este estudio, el rango promedio de concentración de Cr en los diferentes EART fue de 0.01 a 0.08 mg/L, de 0.09 a 0.21 mg/L y de 0.001 a 0.003 mg/L para Cr, Zn y Hg respectivamente. Esto se traduce en un aporte de Cr de 0.05, 0.14, 0.12, 8.11 y 5.37 kg/d, para Zn de 0.47, 1.72, 4.14, 22.02 y 21.81 kg/d, Hg de 0.00, 0.01, 0.11, 0.10 y 0.07 kg/d provenientes de las plantas de El Sauzal, El Gallo, El Naranja y Punta Bandera (efluente tratado) y el punto de descarga del arroyo San Antonio de los Buenos, respectivamente. En tanto, el óxido de hierro (Fe_2O_3) se eligió como normalizador en los sedimentos ya que presentó una alta correlación con el Cr y Zn tanto en la cuenca ($R^2 = 0.85$ y 0.93) como en el Estero de Punta Banda ($R^2 = 0.91$), en este caso el Zn no presentó una buena correlación. El porcentaje de carbono orgánico se eligió como normalizador del Hg ya que presentó una buena correlación en la cuenca ($R^2 = 0.92$) y en el Estero ($R^2 = 0.91$). Se observó enriquecimiento por Cr en 35 estaciones, siendo localizadas 19 en la zona norte, 8 en la zona centro, 4 en la zona sur y 4 en el estero, para el Zn en 27 estaciones, siendo localizadas 17 en la zona norte, 3 en la zona centro y 7 en la zona sur, para el Hg en 12 estaciones, siendo localizadas 7 en la zona norte, 4 en la zona sur y 1 en el Estero. En general, se esperaba observar mayores concentraciones y sitios enriquecidos por Cr, Zn y Hg en la zona norte, debido a la mayor presión antropogénica existente en esta zona.

Palabras clave: Sedimentos, Aguas Residuales, Metales Traza.

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

**Metales traza relacionados a actividades antropogénicas en
sedimentos marinos superficiales y aguas residuales tratadas de la
frontera Tijuana (B.C.) – California (E.U.A.) a la Bahía Todos Santos,
B.C., México**

T E S I S

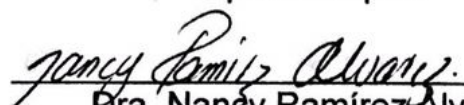
**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

BRIANDA JANNYN VALENZUELA SUÁREZ


Aprobada por:



Dra. Naney Ramírez-Alvarez
Directora de tesis



Dr. José Vinicio Macías Zamora
Sinodal



Dr. Félix Augusto Hernández Guzmán
Sinodal

DEDICATORIA

A **mis padres**: gracias por todo su amor, esfuerzo y apoyo incondicional. Es por ustedes que he logrado llegar hasta aquí y convertirme en la mujer que soy hoy en día. Los amo mis chatones.

A **mi hermano**: gracias por ser mi cómplice y compañero de aventuras. Espero servirte de aliento para realizar tus metas y perseguir tus sueños. Te quiero con todo mi corazón mi luchador favorito.

A **mi Pablito**: gracias por darme ánimos cuando más los necesito, por formar parte de mi vida y darle aún más felicidad. Te amo mi gordi.

A **mi abuelo Gustavo**: porque una vez más sigo esforzándome y dando lo mejor de mi para seguir cumpliendo mi promesa. Por siempre en mi corazón Tata.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por el apoyo otorgado a través de la beca de manutención asignada durante mi estancia en el programa de Maestría.

A la Facultad de Ciencias Marinas y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

A la Dra. Nancy Ramírez por confiar en mí y permitirme trabajar con ella durante estos años. Gracias por sus consejos, esfuerzo, comentarios, valiosa guía, amistad, por todo el apoyo que me ha dado y sobre todo por haber formado en gran medida en mi formación académica.

Al Dr. Félix Augusto Hernández Guzmán por todos los consejos, asesoramiento, comentarios y el gran apoyo que me brindo durante el trabajo de laboratorio y la realización de este trabajo.

Al Dr. Vinicio Macías Zamora por sus comentarios, consejos y apoyo durante la realización de este trabajo.

A Cristina y Claudia por brindarme su apoyo en laboratorio y sus platicas motivacionales.

A mi mamá porque aunque hemos estado lejos durante los últimos meses nunca dejo de apoyarme y darme ánimos.

A mi papá porque a su modo siempre estuvo apoyándome y animándome durante la realización de este trabajo.

A mi Pablito por aguantarme todos los días, apoyarme en mis momentos de crisis y obligarme a levantarme todas las mañanas para seguir trabajando.

A mis abuelos por todo el cariño que me han dado, los quiero.

A la Gomis por apoyarme en todo momento y darme ánimos, te quiero prima.

A Alicia Uribe por formar parte de esta loca aventura llamada "Maestría", por siempre estarme apoyando en mis crisis existenciales y aventarse mis 30 audios diarios de 5 minutos.

A Jennifer Smith por ser mi compañera de aventuras, por su gran amistad y apoyo incondicional.

A Cindy Romero por todos estos años de amistad y su apoyo en todo momento. Una vez mas formas parte de un gran momento en mi vida.

A Mariana Sáenz (mi argentina favorita) por siempre apoyarme y darme ánimos para seguir luchando.

A Jair Ceja por su gran amistad y apoyo durante clases.

A Ramiro Guillen por ser un gran amigo y siempre estar ahí para mi.

A mi nueva familia petanquera de Querétaro gracias por todas esas tardes que pasamos jugando juntos, de verdad hicieron que mis días de estrés durante la redacción de este trabajo fueran más agradables.

A todos los integrantes de Big Brother Perú (en Querétaro) muchas gracias por su gran amistad y apoyo.

A todas las personas que directa o indirectamente estuvieron conmigo, apoyándome y dándome ánimos. Gracias a todos.

“El hombre es dueño de su destino y su destino es la tierra y el mismo la está destruyendo hasta quedarse sin destino”

Frida Kahlo

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	METALES TRAZA.....	2
1.1.1.	CROMO (Cr)	4
1.1.2.	ZINC (Zn).....	5
1.1.3.	MERCURIO (Hg).....	6
1.2.	SEDIMENTOS.....	8
1.3.	AGUAS RESIDUALES.....	9
2.	ANTECEDENTES	11
3.	HIPOTÉISIS	16
4.	OBJETIVOS	17
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
5.	ÁREA DE ESTUDIO.....	19
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
6.1.	LIMPIEZA DE MATERIAL Y SECADO DE MUESTRAS.....	23
6.2.	PROTOCOLO DE MUESTREO	23
6.2.1.	SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES	24
6.2.2.	AGUAS RESIDUALES.....	25
6.3.	TRABAJO DE LABORATORIO	27
6.3.1.	TAMAÑO DE GRANO	27
6.3.2.	CARBONO ORGÁNICO.....	27
6.3.3.	CUANTIFICACIÓN DE Cr, Zn y Fe EN SEDIMENTOS.....	28
6.3.4.	CONTROL DE CALIDAD	29
6.3.5.	CUANTIFICACIÓN DE Hg EN SEDIMENTOS.....	29
6.3.6.	CUANTIFICACIÓN DE Cr, Zn y Hg EN AGUAS RESIDUALES	30
6.4.	ANÁLISIS DE DATOS	30
6.4.1.	ENRIQUECIMIENTO POR METALES TRAZA (Cr, Zn y Hg) EN SEDIMENTOS.....	30
6.4.2.	POSIBLES EFECTOS TÓXICOS EN ORGANISMOS	31
6.4.3.	DIFERENCIAS LATITUDINALES	32
7.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	33
7.1.	TAMAÑO DE GRANO	33
7.2.	CARBONO ORGÁNICO.....	37
7.3.	CONCENTRACIONES DE METALES TRAZA EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES 41	
7.3.1.	CROMO (Cr)	41
7.3.2.	ZINC (Zn).....	43
7.3.3.	MERCURIO (Hg).....	44
7.4.	DIFERENCIAS POR LATITUD Y PROFUNDIDAD	46
7.5.	NORMALIZACIÓN DE METALES TRAZA	47
7.6.	ENRIQUECIMIENTOS POR METALES TRAZA	49
7.6.1.	ENRIQUECIMIENTO POR CROMO (Cr).....	50
7.6.2.	ENRIQUECIMIENTO POR ZINC (Zn).....	52
7.6.3.	ENRIQUECIMIENTO POR MERCURIO (Hg).....	55
7.7.	POSIBLES EFECTOS TÓXICOS EN ORGANISMOS.....	57

7.8.	AGUAS RESIDUALES TRATADAS	58
7.9.	INVENTARIO DE MASAS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES	59
7.10.	FUENTES POTENCIALES DE METALES TRAZA	62
7.10.1.	MODELO CONCEPTUAL	62
8.	CONCLUSIÓN	66
9.	REFERENCIAS	68

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS FRACCIONES (4, 16, 40 Y 63 μm) DE TAMAÑO DE GRANO (% ACUMULADO) DE LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES PARA LOS ESTRATOS POR PROFUNDIDAD (SOMERO, INTERMEDIO Y PROFUNDO) Y POR LATITUD (NORTE, CENTRO Y SUR).	35
TABLA 2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DEL PORCENTAJE DE CARBONO ORGÁNICO DE LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES PARA LOS ESTRATOS POR PROFUNDIDAD (SOMERO, INTERMEDIO Y PROFUNDO) Y POR LATITUD (NORTE, CENTRO Y SUR).	38
TABLA 3. MÍNIMA, MÁXIMA, PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS CONCENTRACIONES DE CROMO (CR) EN LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES PARA LOS ESTRATOS POR PROFUNDIDAD (SOMERO, INTERMEDIO Y PROFUNDO) Y POR LATITUD (NORTE, CENTRO Y SUR).	41
TABLA 4. MÍNIMA, MÁXIMA, PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS CONCENTRACIONES DE ZINC (ZN) EN LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES PARA LOS ESTRATOS POR PROFUNDIDAD (SOMERO, INTERMEDIO Y PROFUNDO) Y POR LATITUD (NORTE, CENTRO Y SUR).	43
TABLA 5. MÍNIMA, MÁXIMA, PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS CONCENTRACIONES DE MERCURIO (HG) EN LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES PARA LOS ESTRATOS POR PROFUNDIDAD (SOMERO, INTERMEDIO Y PROFUNDO) Y POR LATITUD (NORTE, CENTRO Y SUR).	45
TABLA 6. NÚMERO DE ESTACIONES EVALUADAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SQG. VALORES DE REFERENCIA ERL Y ERM OBTENIDOS DE LONG ET AL., (1995).	57
TABLA 7. CONCENTRACIONES TOTALES DE METALES TRAZA (MG/L) ENCONTRADAS EN LOS DIFERENTES EFLUENTES DE PTAR.	58
TABLA 8. INVENTARIO DE MASAS EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES.	61

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDIO.....	19
FIGURA 2. ESTACIONES DE MUESTREO DE SEDIMENTOS Y PLANTAS DE TRATAMIENTO (A. PUNTA BANDERA, B. PLANTA Y, C. EL SAUZAL, D. EL GALLO Y E. EL NARANJO).	26
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GRANO <math><63 \mu\text{M}</math>.	37
FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE %CO EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.	39
FIGURA 5. CORRELACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO DEL SEDIMENTO Y CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO PARA SEDIMENTOS SUPERFICIALES COLECTADOS PARA EL BIGHT.	40
FIGURA 6. CORRELACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO DEL SEDIMENTO Y CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO PARA SEDIMENTOS SUPERFICIALES COLECTADOS PARA EL ESTERO.	40
FIGURA 7. DIAGRAMA DE CAJAS DE LAS CONCENTRACIONES DE CR EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DEL BIGHT.	42
FIGURA 8. DIAGRAMA DE CAJAS DE LAS CONCENTRACIONES DE ZN EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DEL BIGHT.	44
FIGURA 9. NORMALIZACIÓN DEL CR Y ZN PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS ENRIQUECIDOS.	48
FIGURA 10. NORMALIZACIÓN DEL HG PARA LA DETERMINACIÓN DE SITIOS ENRIQUECIDOS.....	49
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE CROMO (CR) EN SEDIMENTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL CÍRCULO ROJO INDICA LA ESTACIÓN QUE PRESENTO UN ENRIQUECIMIENTO POR CR.	51
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE ZINC (ZN) EN SEDIMENTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL CÍRCULO ROJO INDICA LA ESTACIÓN QUE PRESENTO UN ENRIQUECIMIENTO POR ZN.	53
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN DE MERCURIO (HG) EN SEDIMENTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL CÍRCULO ROJO INDICA LA ESTACIÓN QUE PRESENTO UN ENRIQUECIMIENTO POR HG.	56
FIGURA 14. CONTRIBUCIÓN AL INVENTARIO DE MASA (%) DE LOS METALES TRAZA ANALIZADOS EN LOS SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES.	61
FIGURA 15. FUENTES POTENCIALES DE METALES TRAZA AL ÁREA DE ESTUDIO	65

1. INTRODUCCIÓN

La Política Ambiental Nacional de Océanos y Costas de México define a la zona costera como el espacio geográfico de interacción mutua entre el medio marino, terrestre y la atmósfera comprendida por una porción mexicana continental definida por 253 municipios costeros, 150 con frente de playa y 113 municipios internos adyacentes a estos con influencia costera alta y media (SEMARNAT, 2011). La zona costera es una región altamente productiva con gran importancia económica por sus recursos pesqueros, energéticos, industriales, turísticos y urbanos. Esta constituye una amplia región heterogénea con interacciones físicas, químicas y biológicas, donde se llevan a cabo intercambios dinámicos de energía y materiales entre los ecosistemas terrestres, marinos y la atmósfera.

La UNEP (2021) define a la contaminación marina como la introducción directa o indirecta de sustancias o energía en el medio marino (incluidos los estuarios) por parte de los seres humanos, lo que da como resultado daños a los recursos vivos, peligros en la salud humana, obstáculos para las actividades marinas, incluidas la pesca, deterioro de la calidad del agua de mar y reducción de las comodidades. Las poblaciones humanas, concentradas en regiones costeras puede movilizar materiales al medio marino en cantidades similares, o incluso superiores, a las introducidas a través de procesos de meteorización (Bruland *et al.*, 1974). El crecimiento poblacional en estas zonas presiona al ambiente marino, debido a que los asentamientos humanos y las actividades producidas en estas zonas generan residuos, basura y contaminantes tóxicos a través de los

procesos de construcción de infraestructura, la sobreexplotación de sus recursos, actividades portuarias y por la disposición de residuos municipales sin tratamiento en sus aguas ya sea por fuentes lejanas o locales.

El medio marino es el depósito final de la mayoría de las sustancias desechadas por el hombre. Con el tiempo la actividad biológica favorece la descomposición de los compuestos orgánicos (Martínez, 2002). Sin embargo, muchos de los compuestos inorgánicos no son biológicamente degradables y se acumulan en los sedimentos del medio marino.

1.1. METALES TRAZA

Los metales traza son cationes que tienen peso molecular entre 63.55 a 200.6 uma y se encuentran naturalmente en concentraciones basales bastante bajas (Pérez *et al.*, 2006). Se pueden encontrar como componentes naturales en la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos (Rooney *et al.*, 2006). Estos compuestos se pueden clasificar en esenciales y no esenciales. Los esenciales (p. ej. Cu, Mn, Mg) aunque son benéficos, pueden llegar a ser tóxicos para el hombre o la biota cuando se encuentran por arriba de las concentraciones naturales. Los no esenciales (p. ej. Hg, Cr, Zn, Ag) son tóxicos a concentraciones mucho más pequeñas que los esenciales.

Estos elementos metálicos se interrelacionan con el medio ambiente mediante un balance conocido como ciclos biogeoquímicos naturales (Gerrels *et al.*, 1975). Sin embargo, estos ciclos biogeoquímicos se pueden ver afectados con el aumento de las actividades de la población o industria, lo que ocasiona un

incremento en la descarga de metales traza al medio marino a niveles importantes.

La liberación de los metales traza en el medio ambiente puede ser a través de procesos naturales como lo son las erupciones volcánicas, transporte eólico, meteorización de rocas y minerales, etc., o por actividades antropogénicas como la minería, agricultura, actividades de la población, descarga de aguas residuales, etc. La exploración, explotación y beneficio de estos metales ha provocado daños al ambiente principalmente por el manejo inadecuado y la disposición de residuos mineros (UNEP 2000). No obstante, los metales traza son uno de los contaminantes que más interés han despertado en los últimos años, debido a que a altas concentraciones pueden ser altamente tóxicos para los organismos expuestos (Cañizares-Villanueva, 2000) y no pueden ser eliminados del medio a través de procesos naturales.

En la mayoría de las ocasiones, el principal aporte de los metales traza de origen antropogénico en un área costera es de origen terrestre, tales como los desarrollos mineros, industriales y urbanos, así como otras prácticas humanas realizadas cerca de ríos y estuarios (Morton y Blackmore, 2001) o bien, por descargas de aguas residuales. Estos aportes pueden afectar la calidad del agua, así como favorecer la bioasimilación y bioacumulación de metales traza en organismos marinos, lo que podría tener implicaciones potenciales a largo plazo en la salud humana y en el ecosistema (Carman *et al.*, 2007).

1.1.1. CROMO (Cr)

El cromo es un elemento metálico de transición, color gris acerado, duro, quebradizo, muy resistente a la corrosión y poco alterable. El cromo elemental (Cr) no se encuentra como tal en la naturaleza, si no, distribuido ampliamente en la cromita (FeOCr_2O_3) o piedra de cromo férrico, se puede encontrar como terrones, gránulos, polvo o cristales y es soluble en ácido sulfúrico.

El Cr^{+3} se comporta como un microelemento esencial para la vida, al intervenir en procesos bioquímicos y fisiológicos indispensables, siendo poco soluble y muy estable, sin embargo, en presencia de materia orgánica y condiciones ligeramente ácidas el Cr^{+3} suele transformarse a Cr^{+6} , siendo menos estable, pero más soluble y con una alta movilidad entre los sustratos. Los estados de oxidación del Cromo son varios, desde -2 hasta +6, sin embargo, los que presentan cierta estabilidad son el 0, +2, +3 y +6. Los últimos tres siendo los más comunes en condiciones naturales.

Con el crecimiento de las actividades industriales, las fuentes de contaminación por cromo han aumentado considerablemente. Las principales fuentes de contaminación por cromo son aquellas relacionadas con la manufactura y uso de sus compuestos, por los beneficios que brinda en la elaboración de múltiples productos (Téllez *et al.*, 2004). Entre ellos se encuentra su uso en la fabricación de pigmentos y conservantes textiles, en la fabricación de cemento, en aleaciones, pinturas, anti-incrustantes, catalizadores, agentes anticorrosivos, baterías, fungicidas, conservantes de madera, recubrimientos

metálicos, electrogalvanizados (Benítez, 2011) y en la industria de curtiembres de cuero. Dentro de estas industrias la de curtiembres contribuye especialmente a la contaminación por cromo, al consumir aproximadamente el 32% del cromo total mundial, que al ser vertido al ambiente suele acumularse en los sedimentos y o transformarse en el ambiente (Benítez, 2011).

La forma tóxica del cromo es el Cr^{+6} , sus compuestos son corrosivos y la exposición a ellos provoca reacciones alérgicas en la piel, en las vías respiratorias e irritación gastrointestinal, así como lesiones renales y hepáticas (Cuberos *et al.*, 2009). También es mutagénico y carcinogénico en humanos, puede alterar seriamente el equilibrio biológico causando efectos tóxicos, ya que es rápidamente absorbido por las membranas biológicas (Téllez *et al.*, 2004).

1.1.2. ZINC (Zn)

El zinc (Zn) es un metal maleable, dúctil y de color gris, se presenta naturalmente en aire, agua y en el suelo. Este metal es indispensable para mantener la estructura y la configuración de las moléculas proteínicas; en muchos casos es fundamental para su funcionamiento como enzimas o proteínas estructurales (Nestlé, 2013). Constituye más de 300 metaloproteínas catalíticamente activas y de más de 2000 factores de transcripción, y su participación en el metabolismo abarca una amplia variedad de reacciones (Guardia *et al.*, 2011).

La mayor parte del zinc en el ambiente es añadida por actividades realizadas por el hombre como lo son las actividades industriales como extracción,

combustión de carbón y rechazos y elaboración del acero. Si bien, la contaminación ambiental por zinc, y sus efectos sobre la población, no son tan conocidos como en el caso del producido por otros elementos (Blanco, 1998). Cada vez existen más estudios que muestran su elevada concentración, por lo general también acompañando de concentraciones elevadas de elementos como el cadmio, plomo y mercurio. Así como sus posibles efectos, entre ellos se ha encontrado que puede aumentar la acidez del agua, la movilidad de este metal aumenta considerablemente al descender el pH, ya que aumenta su solubilidad y el grado de disociación de los complejos orgánicos (Durán, 2011).

En el medio marino algunos peces pueden acumular el zinc en sus cuerpos, cuando viven en canales navegables contaminados por zinc. Cuando el metal entra en los cuerpos de estos es capaz de bioampliarse sobre el ciclo alimenticio (Duran, 2011). En los humanos puede causar úlceras de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas, anemia, pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, causar arterioesclerosis y desordenes respiratorios.

1.1.3. MERCURIO (Hg)

El mercurio es un elemento natural, en su forma pura es un metal blanco-plateado, líquido a temperatura y presión estándar (Weinberg, 2007). Como propiedades físicas presenta una elevada volatilidad y solubilidad en todos los tipos de solventes, incluyendo el agua. Sus propiedades químicas más características son su fácil reducción de iones, su afinidad por el azufre, la

formación de amalgamas y la formación de compuestos organomercuriales (Blesa y Castro, 2015). El mercurio de origen natural proviene esencialmente de las liberaciones ocasionadas por la movilización natural del mercurio tal como se encuentra en la corteza terrestre, la actividad volcánica o la erosión de las rocas (Blesa y Castro, 2015).

Actualmente, la disponibilidad del mercurio se encuentra en aumento por las actividades del hombre, como lo es el uso del mercurio y las sustancias que los contienen. La concentración de mercurio se ha elevado de 2 a 5 veces más desde el inicio de la era industrial (Casas *et al.*, 2015). Los usos del mercurio pueden variar mucho dependiendo del país en el que nos encontremos, sin embargo, algunos de los más comunes son en la industria minera, industria cloro-álcali, su uso como fungicida, o en pinturas, catalizadores, relleno dental, termómetros, barómetros, aparatos eléctricos como lo son lámparas, pilas y rectificadores de corriente.

Una vez emitido, el mercurio se dispersa por el aire y se almacena en el agua, el suelo y la atmósfera, y se redistribuye entre estos depósitos dependiendo de los parámetros ambientales, la fuente de emisión y el sitio de vertimiento (Casas *et al.*, 2015)

Las aguas costeras están potencialmente afectadas en mayor grado por especies reactivas de Hg y mercurio particular liberados a la atmósfera por fuentes antropogénicas cercanas (Martínez, 2004). Para algunas zonas costeras contaminadas por Hg, la principal fuente de este elemento puede llegar a ser su descarga directa al medio marino. El mercurio (y en particular el metilmercurio)

presenta una clara acumulación en las cadenas alimenticias costeras, es por esto que el mercurio y sus compuestos son tóxicos para los organismos marinos y los humanos, especialmente para el sistema nervioso.

1.2. SEDIMENTOS

Los metales traza pueden ingresar a un cuerpo de agua superficial, por vía natural o antropogénica, quedando retenidos en los sedimentos que se depositan en el fondo (Herrera, *et al.*, 2013). Los metales traza de origen natural en los sedimentos marinos se encuentran en diferentes concentraciones dependiendo de la geología del área (Windom *et al.*, 1989). Más del 90% de la presencia de metales traza en los sistemas marinos está relacionada a las partículas en suspensión y sedimentos del medio (Calmano *et al.*, 1993).

Los metales traza presentan concentraciones relativamente elevadas en los sedimentos superficiales de las zonas costeras alteradas por el hombre y generalmente guardan una relación de su concentración con el tamaño de las partículas y la cantidad de materia orgánica sedimentarias (Sadiq, 1992). Por ejemplo, las actividades de dragado necesarias para poder mantener un calado adecuado en el canal de navegación provocan modificaciones de los patrones locales de circulación, transporte de material suspendido y cambios en las condiciones ambientales del agua y sedimentos (IMP, 1994). Por lo anterior, es de gran importancia conocer su distribución en los sedimentos marinos debido a que estos depósitos guardan un registro del tipo de contaminación que ha tenido lugar en las zonas próximas a su recorrido. En general, se considera que la

movilidad de los metales traza es muy baja, permaneciendo acumulados en los primeros centímetros del sedimento (Cervantes-Guerra *et al.*, 2011).

1.3. AGUAS RESIDUALES

Las aguas que contienen los residuos de las actividades humanas se pueden clasificar según su composición y origen de contaminantes, en aguas municipales e industriales (Peña *et al.*, 2014). Actualmente cada país tiene la obligación de dar un buen tratamiento a sus aguas residuales; esto con la finalidad de evitar posibles efectos negativos en el medio ambiente por contaminantes que contengan estas aguas (p. ej. metales traza).

La presencia de metales traza en aguas residuales industriales y municipales exige un tratamiento efectivo de las mismas para su uso posterior o bien para un confiable desecho en corrientes o cuerpos de agua, todos ellos acorde con las normativas establecidas en cada país (Proal, 1997). El tratamiento de las aguas residuales consiste en una serie de procesos que permiten el saneamiento de las aguas después de su uso, ya sea con fines domésticos, industriales o comerciales, para posteriormente ser vertidas a cuerpos de agua. Los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales que contienen metales traza incluyen: la precipitación, la oxidación, la reducción, el intercambio iónico, la filtración, el tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por evaporación. Es importante destacar que estos métodos pueden resultar costosos e ineficientes, especialmente cuando las concentraciones de metales son muy bajas (Cañizares-Villanueva, 2000).

Debido a la poca movilidad de los metales traza en los ecosistemas marinos y a su potencial toxicidad, los iones de metales presentes en los abastecimientos de agua (superficiales y subterráneos), aguas residuales y en sedimentos, han ocasionado que se les dé prioridad como los contaminantes inorgánicos más importantes en el ambiente (Cañizares-Villanueva, 2000). Por lo tanto, es importante comprender los mecanismos de acumulación, distribución biogeoquímica y la relación que existe entre las concentraciones de metales traza en sedimentos y aguas residuales descargadas, para desarrollar estrategias de control de contaminación y enfoques para la gestión de la calidad del agua y sedimentos en un área costera (Calmano *et al.*, 1993).

2. ANTECEDENTES

Con el aumento de la población que reside en el área comprendida desde la frontera Tijuana (B.C.) – California (E.U.A.) a la Bahía Todos Santos, B.C., se han comenzado a presentar problemáticas ambientales, sociales, económicas y políticas. En esta zona, además de ser el hogar de muchas comunidades acuáticas, se llevan a cabo actividades urbanas e industriales, como descargas de desechos municipales, escorrentía de ríos, precipitaciones atmosféricas, descargas del puerto, descargas térmicas y transporte marítimo (Kennish, 1998), que pueden generar contaminación en el medio y, por ende, ocasionar problemas para la salud humana y para los organismos expuestos que se encuentran en el medio marino.

Las descargas de aguas residuales son consideradas como una de las principales fuentes potenciales de metales traza en el medio marino (Villaescusa-Celaya *et al.*, 1997). En esta área se vierten los desechos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de San Diego, E.U.A., Tijuana y Ensenada, México, además de descargas clandestinas (Bascom, 1982). Se estima que alrededor del 75% de la población de California vierte sus aguas residuales en esta cuenca. Dicha descarga de aguas residuales ha estado ocurriendo durante mucho tiempo, siendo el primer registro documentado a mediados de la década de 1930 en la ciudad de Los Ángeles (Bakus, 1989).

En el área de estudio existen diferentes plantas de tratamiento, sin embargo, en este estudio se consideraron las cinco principales plantas de tratamiento

dentro del Estado de Baja California, esto en base a su alto volumen de descarga hacia la zona costera: Punta Bandera y Planta Y (denominada así para este estudio, la cual comprende el punto de descarga del arroyo San Antonio de los Buenos), ambas ubicadas en la ciudad de Tijuana, así como las plantas de tratamiento de El Sauzal, El Gallo y El Naranja ubicadas en la ciudad de Ensenada.

El conocimiento de la distribución de los metales traza en los sedimentos marinos es importante debido a que estos son sumideros de sustancias de origen natural y antropogénicas, mismas que se preservan en las partículas de los sedimentos o son recicladas hacia la columna de agua (Fergusson, 1990). A pesar de la gran importancia ambiental de los metales traza en sedimentos y la relación que tienen con los aportes de estos mismos a través de descargas de aguas residuales por las plantas de tratamiento que se encuentran en la zona (Tijuana-California a Bahía Todos Santos), existen pocos estudios en relación a esto. La mayoría de los estudios que se han realizado en aguas costeras (Sañudo-Wilhelmy y Russell-Flegar, 1991), organismos (Reynoso y Jorajuria, 1988; Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1999) y sedimentos superficiales (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1994, 2007, 2008, 2010; Villaescusa-Celaya *et al.*, 1997, 2000; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2004, 2012; Huerta-Díaz *et al.*, 2008; Álvarez-Aguilar *et al.*, 2017) consideran que las descargas de aguas residuales de las plantas de tratamiento representan una fuente importante de metales traza en la región. Sin embargo, a la fecha no se encontraron estudios en los que se reporten

concentraciones de metales traza en aguas residuales tratadas descargadas en la franja costera mexicana de la Cuenca de las Californias.

Estudios como los realizados por Gutiérrez-Galindo *et al.* (1994) y Villaescusa-Celaya *et al.* (1997, 2000) mencionan que las mayores concentraciones de Cr y Zn en sedimentos superficiales se localizan mayormente alrededor de la isobata de 60 m y en la Isla Coronado. Gutiérrez-Galindo *et al.*, (1994) reportaron un gradiente de concentraciones de costa a mar en ambos metales, siendo la asociación de los elementos de tamaño de grano (Zn), contenido de silicoaluminatos (Zn) y los contenidos de materia orgánica de origen marina, terrestre y antropogénica (Cr) los principales factores que explicaban la distribución de estos metales. Por otra parte, Villaescusa-Celaya *et al.* (1997) reportaron que el Cr residual presentaba un enriquecimiento relativo en las cercanías de los efluentes de aguas residuales de la zona.

Por otra parte, Muñoz-Barbosa *et al.* (2004) determinó las concentraciones de Cr y Zn en sedimentos superficiales. Estos autores observaron un enriquecimiento de Cr en Ensenada, B.C. y cercano a la Isla Todos Santos lo cual fue atribuido a las actividades portuarias y a las actividades de dragado realizadas en el puerto de Ensenada. Para el caso del Zn, los autores no observaron sitios enriquecidos, sin embargo, el área de estudio presentó una media de concentración de 24.5 µg/g, reportando que su distribución espacial mostraba valores altos en la frontera México-E.U.A. y al norte de Ensenada B.C.,

atribuyendo dichos niveles a las descargas de aguas residuales de la planta de tratamiento de Punta Bandera ubicada en Tijuana B.C.

Gutiérrez-Galindo *et al.*, (2007) reportaron concentraciones de Hg en la costa noroccidental de Baja California, México, con un rango de concentración de 30.4 - 96.5 ng/g. Donde el 10% de las estaciones presentaron enriquecimiento por este metal. Adicionalmente, estos autores encontraron que la distribución de los sitios enriquecidos no se observaba de manera homogénea en el área, sino que la distribución estaba restringida a ciertas áreas que clasificaron como posibles centros temporales de depositación natural.

Gutiérrez-Galindo *et al.* (2008) determinaron Hg en sedimentos superficiales de la Bahía Todos Santos. Se reportó un rango de concentración de 10.8 – 63.5 ng/g, donde los sitios con valores más altos se encontraron en la zona norte del área de estudio y cercanos a las islas. Sin embargo, no se encontraron sitios enriquecidos por Hg.

Alvarez-Aguilar *et al.*, (2017) determinaron Cr y Zn en los sedimentos superficiales colectados en el noroeste de la costa de Baja California para los años 1998, 2003 y 2013. Estos autores, no encontraron sitios enriquecidos por Cr en ninguno de los periodos evaluados. Por otra parte, en los sedimentos colectados en 1998 encontraron que, en la zona norte, dos sitios cercanos a la costa que presentaban enriquecimiento por Zn ubicados entre los puntos de descarga de las plantas de tratamiento (Binacional y Punta Bandera) y la planta de Pemex en Rosarito (sobre la isobata de los 30 m). Por otra parte, en la zona

centro solo reportaron un sitio enriquecido cerca de la línea de costa al sur de Punta Descanso. En 2003, estos autores reportaron un sitio enriquecido en la zona sur del área de estudio, el cual estaba ubicado en el cañón submarino localizado en el interior de la Bahía Todos Santos. Es importante señalar que en 2013 no encontraron sitios enriquecidos por Cr y Zn. Los autores reportan que las concentraciones promedio en el área de estudio para Cr y Zn fueron de $15.9 \pm 7.4 \mu\text{g/g}$ y $26.63 \pm 16.37 \mu\text{g/g}$ en 1998, $29.4 \pm 11.9 \mu\text{g/g}$ y $37.85 \pm 23.5 \mu\text{g/g}$ en 2003 y más baja $10.8 \pm 6.1 \mu\text{g/g}$ y $18.00 \pm 13.40 \mu\text{g/g}$ en 2013, respectivamente. Los factores a los que se atribuyen estos cambios en la distribución de los metales se presumen están asociados a las condiciones climáticas regionales (El Niño-Oscilación Sur y condiciones de sequía reciente en la región) y de tipo antropogénico como las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran en la zona, ya que algunos metales pueden ser sensibles a estas condiciones.

A pesar de que existen pocos estudios sobre la presencia de metales traza en el área, en la mayoría de casos esta presencia lo asocian con la descarga aguas residuales por plantas de tratamiento, no se encontraron estudios recientes en los que se realice el análisis de dichos elementos en aguas residuales y sedimentos marinos superficiales en el área comprendida desde la frontera Tijuana (B.C.) – California (E.U.A.) a la Bahía Todos Santos, B.C., México.

3. HIPOTÉISIS

Se espera que la distribución de los metales traza en el área comprendida de la frontera Tijuana (B.C) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C se encuentre dominada por el patrón de circulación, siendo en las zonas de menor energía donde se acumulen sedimentos más finos (zona de mayor depositación) y en donde se encuentren las mayores concentraciones de metales traza.

Así mismo, debido a que el Cr, Zn y Hg son metales relacionados a actividades antropogénicas, se espera que las mayores concentraciones se presenten en las zonas cercanas a los centros urbanos con mayor densidad poblacional, efluentes de descargas de aguas residuales por plantas de tratamiento y/o actividades portuarias, siendo la zona norte del área de estudio donde se espera observar una mayor concentración de dichos elementos, debido a la mayor presión antropogénica existente.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar las concentraciones de metales traza (Cr, Zn, Hg) y Fe en sedimentos marinos superficiales y de los efluentes de las aguas residuales tratadas por las cinco principales plantas de tratamiento de la región fronteriza Tijuana (B.C)-California (E.U.A) a Bahía Todos Santos, B.C, México, con la finalidad de determinar su distribución espacial e identificar la posible existencia de sitios enriquecidos por estos metales a lo largo de la zona de estudio.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar las concentraciones de los metales traza Cr, Zn, Hg y el elemento Fe como normalizante en sedimentos marinos superficiales.
- Cuantificar las concentraciones de los metales traza (Cr, Zn y Hg) en las aguas de los efluentes de las cinco principales plantas de tratamiento en la zona de estudio.
- Determinar la distribución de los metales traza (Cr, Zn y Hg) en los sedimentos marinos superficiales en el área de estudio e identificar los sitios donde existe mayor acumulación (enriquecimiento) de ellos.
- Determinar si existe diferencia en las concentraciones de metales traza (Cr, Zn y Hg) por estratos y entre la zona norte, centro y sur del área de estudio.
- Determinar si existen sitios enriquecidos por alguno de los metales traza (Cr, Zn y Hg) en los sedimentos marinos superficiales del área de estudio.

- Determinar si existen sitios donde las concentraciones de metales traza (Cr, Zn y Hg) en sedimentos marinos superficiales pudieran representar un riesgo para los organismos expuestos.

5. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra dentro de la conocida Cuenca de las California, esta cuenca la comparte México y Estados Unidos (E.U.A), la cual posee una extensión total de 100 km y un área de 1700 km². El área de estudio se encuentra delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México (Figura 1).

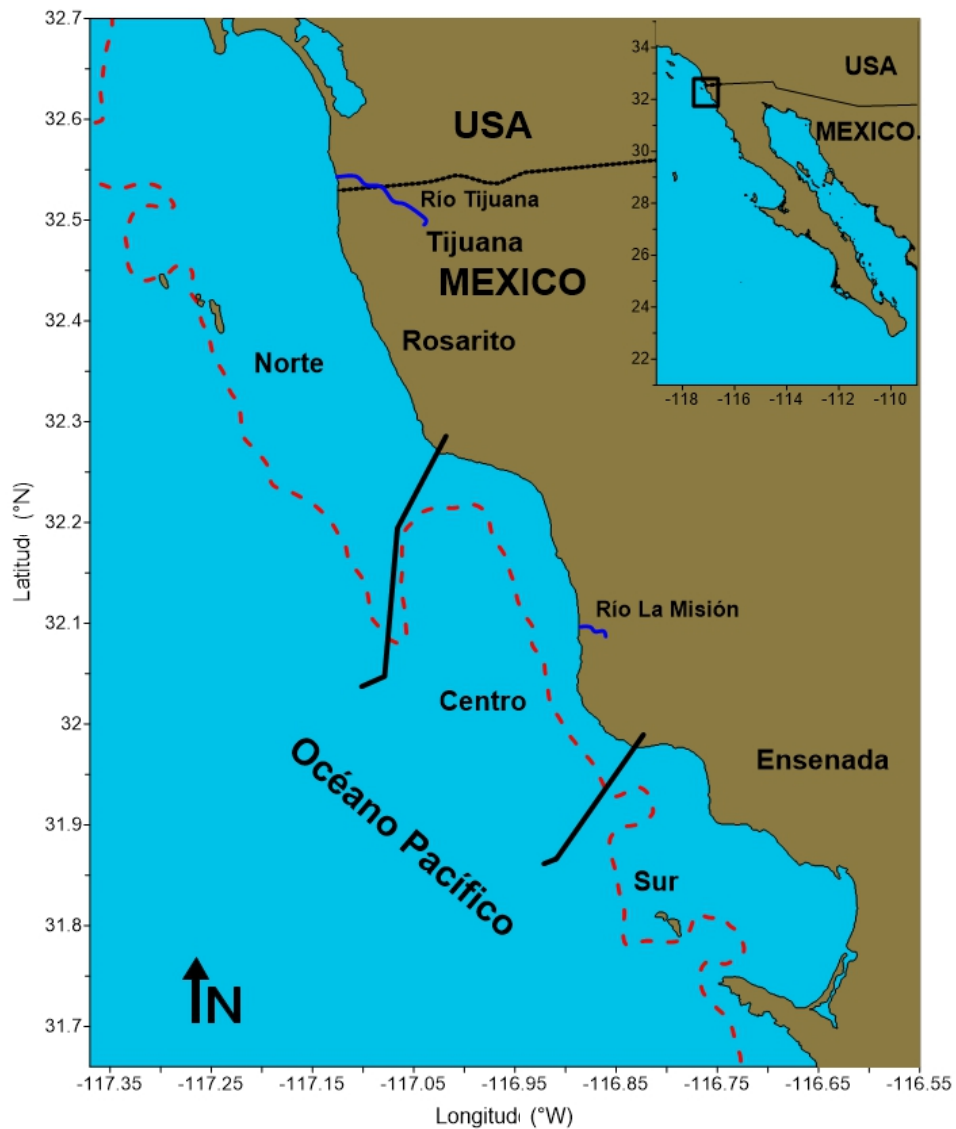


Figura 1. Área de estudio.

Su topografía es accidentada, presentando cuencas y cañones submarinos que actúan como trampas de sedimentos finos y de materia particulado proveniente de aguas de escurrimientos, de descargas o de actividades de dragado (Partida-Gutiérrez *et al.*, 2003) y sobre la plataforma continental predominan los sedimentos arenosos (Dailey *et al.*, 1993). El clima de la región es de tipo mediterráneo con veranos secos y cálidos e inviernos húmedos y fríos y precipitación pluvial escasa (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2007), presentando una media anual de aproximadamente 125.3 mm para el 2018 (SEMARNAT, 2020).

Esta zona se encuentra limitada al oeste con la Corriente de California que presenta una circulación de norte a sur. En la superficie del mar, la amplia y lenta corriente de California hacia el ecuador transporta agua fresca y fría del Pacífico norte hacia el sur de la cuenca de las Californias (Dong *et al.*, 2009). Al este hay un giro ciclónico permanente, el Remolino del Sur de California, que rompe la Corriente de California (Partida-Gutiérrez *et al.*, 2003) que transporta aguas de norte a sur (Lynn *et al.*, 1982). Debajo de la superficie (a profundidades de 100 a 300 m), el flujo costero está dominado por una corriente subterránea de California hacia los polos (Dong *et al.*, 2009). El flujo hacia los polos se encuentra a lo largo de la costa durante todas las estaciones excepto la primavera, cuando aumenta el viento cercano a la costa y la corriente de superficie es impulsada por el viento fluye hacia el ecuador.

Durante El Niño y La Niña se producen grandes variaciones de temperatura media interanual del océano, que oscilan >10 °C en aguas superficiales (Schiff *et*

al., 2019). Así mismo, los patrones de circulación oceánica cambian con las oscilaciones climáticas, con los eventos de El Niño y La Niña (Lynn y Bograd 2002).

La hidrodinámica de la zona de estudio es compleja (Villaescusa-Celaya *et al.*, 1997), las corrientes son variables, con inversiones estacionales en la dirección del flujo, pero orientadas principalmente a lo largo de la costa y con velocidad promedio anual de 19 cm/s (Hendricks y Eganhouse, 1992). Las surgencias a lo largo de la costa de Baja California han sido reconocidas como un proceso importante que transporta agua profunda y rica en nutrientes a la superficie (Gómez-Valdez, 1983). Los eventos de surgencias cercanos a la costa producen fuertes gradientes cruzados en temperatura, nutrientes (Peterson *et al.*, 1986) y patrones de distribución de metales (Bruland *et al.*, 1978)

El área se encuentra expuesta a la contaminación potencial a través de tráfico marítimo y pesquero, contaminantes asociados de la escorrentía agrícola de varias fuentes puntuales y efluentes domésticos e industriales (Romero-Vargas 1995).

Dentro del área de estudio del lado mexicano se encuentra el Estado de Baja California, el cual comprende a tres municipios Tijuana, Rosarito y Ensenada. En la sección mexicana se encuentran cinco principales plantas de tratamiento de aguas residuales, los efluentes de aguas residuales (EAR) con descarga al mar son: la Planta Y (denominada así para este estudio, el cual comprende al punto de descarga del arroyo San Antonio de los Buenos) y Punta Bandera (efluente

tratado y excedente), ubicadas en Tijuana, así como los EAR de El Sauzal, El Naranja y El Gallo, ubicadas en Ensenada. Por otra parte, en la región estadounidense se encuentra la planta de tratamiento Point Loma y South Bay Reclamation Plant, ubicadas en San Diego, así como también la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales Binacional que comparte México y Estados Unidos. Se estima que, para el caso de Baja California, el volumen de aguas residuales generadas y tratadas en el año 2011 fue de 160,750,179 m³. No obstante, casi la totalidad del agua residual tratada en estas ciudades fue vertida a la zona costera, ya que una mínima proporción fue reutilizada (Hernández-Guzmán, 2017).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. LIMPIEZA DE MATERIAL Y SECADO DE MUESTRAS

El material utilizado para el análisis de metales traza se sometió a un proceso de limpieza con la finalidad de eliminar la posibilidad de contaminación. El material de cristal y plástico se sumergió durante 24 horas en jabón micro al 2% (v/v), posteriormente se transfiere la cristalería a una solución de HNO₃ al 30% (v/v), y el material de plástico a una solución de HCl al 5% (v/v). Para ambos casos, el material se dejó reposar durante todo un día, finalmente se enjuagó con agua desionizada y se dejó secar a la intemperie. Una vez completamente seco, todo el material se guardó en bolsas plásticas cerradas hasta su uso. Las muestras de sedimentos marinos superficiales fueron las muestras fueron liofilizadas y homogenizadas en morteros de agata.

La limpieza de los filtros de membrana Tuffryn® HT-450 de 47mm (Gelman Sciences) se realizó en una solución de HCl al 5% (v/v), donde fueron sumergidos durante 24 horas. Posteriormente, fueron colocados en cajas de petri de plástico y puestos a secar en una estufa hasta obtener peso constante.

6.2. PROTOCOLO DE MUESTREO

A continuación, se detalla los diferentes protocolos de muestreo utilizados en la colecta de las muestras de sedimentos y aguas residuales en los muestreos realizados para este trabajo, los sitios de muestreo se presentan la Figura 2 y en la sección de Anexos (Tabla A1).

6.2.1. SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES

Como parte del proyecto “Bight 18” se colectaron muestras de sedimentos para el análisis de metales traza, así como también para la determinación del contenido de carbono orgánico (CO) y la caracterización del tamaño de grano (TG).

En el área de estudio, se colectaron un total de 97 muestras de sedimentos superficiales. El muestreo se realizó entre el 11 de septiembre y 12 de octubre de 2018 (Figura 2 y Anexos, Tabla A1). El muestreo de la zona sur de la Cuenca de las Californias se realizó en la embarcación ORV Alguita donde se colectaron 77 muestras de sedimentos marinos superficiales utilizando una draga Ponar de 0.1 m². Por otra parte, el muestreo del Estero de Punta Banda se realizó a bordo de una lancha, el cual consistió en la colecta de 19 muestras de sedimentos marinos superficiales utilizando una draga Petite Ponar de 0.023 m² (Figura 2 y Anexos, Tabla A1).

En ambos muestreos se colectaron los primeros dos centímetros de sedimentos marinos superficiales, evitando colectar sedimentos cercanos a las paredes de la draga metálica, esto con la finalidad de evitar la contaminación de las muestras por metales provenientes de la draga. Las muestras de metales traza, TG y CO fueron colectadas en tubos de Falcon[®] de polipropileno de 50 mL y almacenadas en congelación hasta su análisis.

6.2.2. AGUAS RESIDUALES

Se colectaron muestras de las 5 principales plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la región: Punta Bandera (efluente tratado y excedente) y la Planta Y (denominada así para este estudio, el cual comprende al punto de descarga del arroyo San Antonio de los Buenos), ubicadas en Tijuana, así como los EAR de El Sauzal, El Naranjo y El Gallo, ubicadas en Ensenada (Figura 2. Anexos, Tabla A2). Se colectó una muestra simple cada 4 horas en cada efluente de aguas tratadas, obteniendo así un total de 4 muestras por planta de tratamiento (las muestras fueron colectadas por triplicado). Las muestras obtenidas de cada planta de tratamiento fueron almacenadas en botellas de plástico, preservadas con ácido nítrico con el propósito de evitar la pérdida de los compuestos metálicos y refrigeradas hasta su análisis.

Con la finalidad de recuperar el material particulado, las muestras fueron filtradas a través de filtros de membrana Tuffryn® HT-450 de 47mm (Gelman Sciences), a través de filtración al vacío. Una vez obtenido el material particulado, los filtros fueron secados y pesados hasta obtener un peso constante.

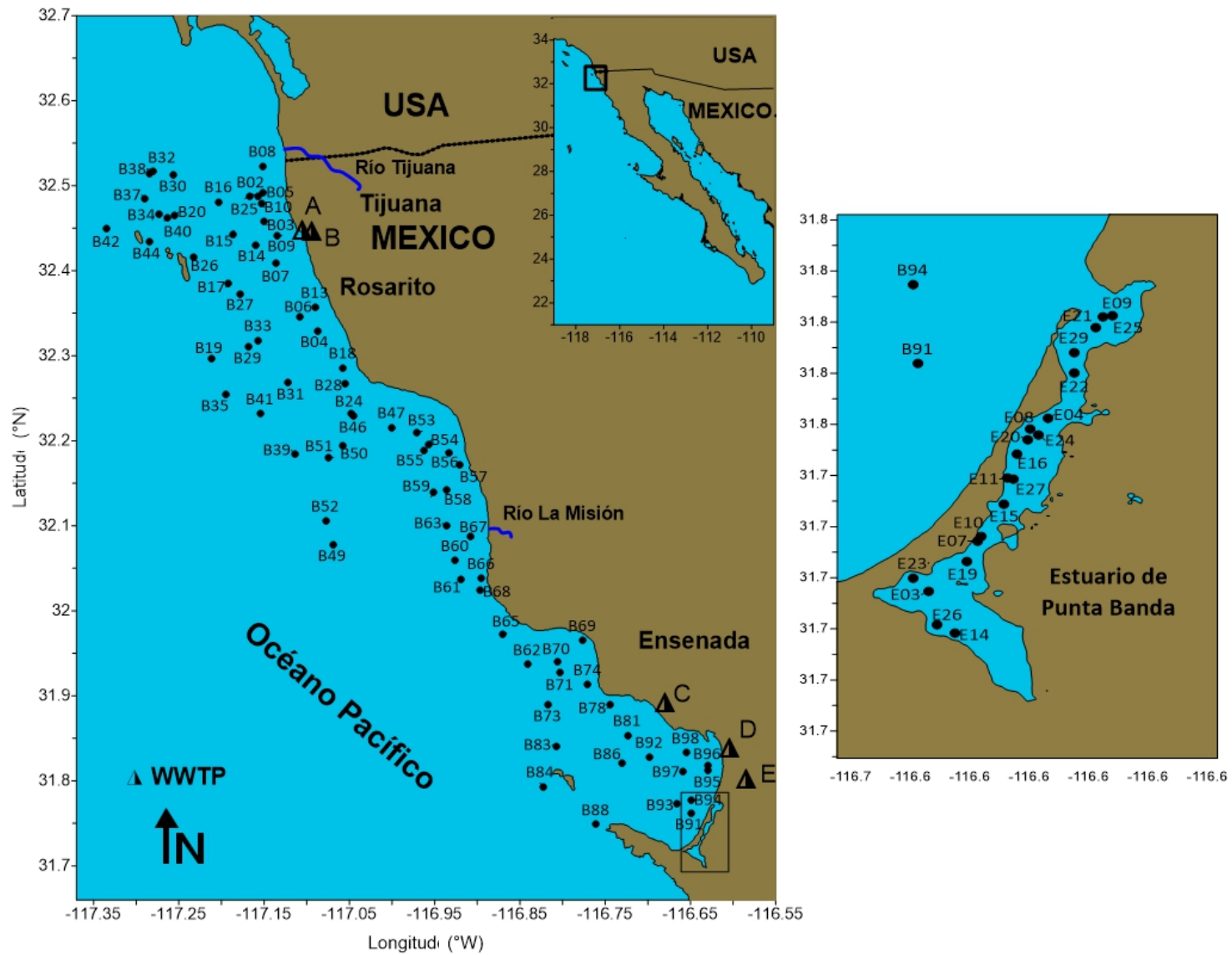


Figura 2. Estaciones de muestreo de sedimentos y plantas de tratamiento (A. Punta Bandera, B. Planta Y, C. El Sauzal, D. El Gallo y E. El Naranjo).

6.3. TRABAJO DE LABORATORIO

6.3.1. TAMAÑO DE GRANO

Para determinar las fracciones de tamaño de grano (TG), se trabajaron con submuestras del sedimento colectado de aproximadamente 10 g en peso seco (d.w., por sus siglas en inglés) para cada una de las muestras. Previo a su análisis, las muestras de sedimentos fueron tamizadas para remover las partículas mayores a 1000 μm , debido a los límites operacionales del equipo utilizado. El dato obtenido fue registrado para realizar la corrección de los tamaños de partículas reportados por el equipo.

El análisis del tamaño de partícula se realizó mediante un analizador de distribución de tamaño de partículas por difracción láser marca HORIBA LA-910, siguiendo el método descrito por Daesslé *et al.*, (2002), el cual utiliza ortofosfato de sodio como agente dispersante. En este trabajo, se determinaron las fracciones finas de tamaño de grano de 4, 16, 40 y 63 μm .

6.3.2. CARBONO ORGÁNICO

Para el análisis de carbono orgánico (CO) se utilizó el método de Loss on ignition (LOI), el cual consistió en pesar aproximadamente 5.0 g de sedimento marino, al cual se le adicionaron 10 mL de HCl 0.1 M para remover el carbono inorgánico (p. ej. Carbonatos) presentes en las muestras. Posteriormente, se realizaron una serie de lavados con agua desionizada para remover completamente el ácido de las muestras. Las muestras fueron secadas en estufa a 40 ± 5 °C y homogenizadas previo a su análisis.

Posteriormente, se pesaron recipientes de vidrio hasta obtener un peso constante. Las muestras fueron transferidas a los recipientes de vidrio pesando aproximadamente 2 g de sedimentos marinos superficiales. Finalmente, los recipientes con las muestras fueron colocados en la mufla a 350 °C durante 4 horas y fueron pesados hasta obtener un peso constante (todas las muestras fueron analizadas por duplicado).

6.3.3. CUANTIFICACIÓN DE Cr, Zn y Fe EN SEDIMENTOS

Para el análisis de los metales traza se pesó aproximadamente 1.0 g de cada muestra en vasos de precipitados de 30 mL. Se agregaron 9 mL de HNO₃ y 3 mL de HCl concentrado. Los vasos permanecieron cubiertos con vidrios de reloj y a temperatura ambiente durante toda la noche (“overnight”) como procedimiento de predigestión.

Para llevar a cabo la digestión, las muestras fueron colocadas en planchas de calentamiento a una temperatura de 95 ± 5°C durante 5 horas, posteriormente se retiró el vidrio de reloj y las muestras se evaporaron casi hasta sequedad. Finalmente, las muestras se transfirieron a tubos de polipropileno mediante enjuagues de HNO₃ al 5% (v/v) hasta un volumen final de 20 mL.

El análisis de los metales traza Cr, Zn y Fe se realizó a través de un Espectrómetro de Emisión Atómica de Plasma por Microondas (Agilent MP-AES 4100). Como control de calidad se analizaron blancos de procedimiento y un material de referencia certificado para sedimentos por cada lote de 10 muestras analizadas.

6.3.4. CONTROL DE CALIDAD

El material de referencia certificado que se utilizó en este trabajo fue el PACS-2 (Marine sediment Reference Material for trace metals and other constituents-National Research Council of Canada NRC-CNRC) con el cual se evaluaron los porcentajes de recuperación de los diferentes metales traza analizados.

El límite de detección para el análisis de las concentraciones de Cr, Zn y Hg en las estaciones ($n = 97$) fue de 0.2 y 0.5 $\mu\text{g/g}$ para el Cr y Zn, respectivamente; y 3.0 ng/g para el Hg. El material de referencia analizado (PACS-2) presentó una recuperación promedio de 87.7, 81.2 y 99.5 % para el Cr, Zn y Hg, respectivamente.

6.3.5. CUANTIFICACIÓN DE Hg EN SEDIMENTOS

Para el análisis de mercurio en sedimentos se pesó aproximadamente 0.1 g de cada muestra seca en navecillas de níquel y se analizó por triplicado. Finalmente, la cuantificación del metal se realizó a través de un Analizador directo de mercurio marca Milestone DMA-80.

Como control de calidad se analizaron dos blancos y dos materiales de referencia por cada 10 muestras. El material de referencia utilizado fue el PACS-2 (Marine sediment Reference Material for trace metals and other constituents-National Research Council of Canada NRC-CNRC) del cual se pesaron 0.05 g para su análisis.

6.3.6. CUANTIFICACIÓN DE Cr, Zn y Hg EN AGUAS RESIDUALES

Para el análisis de los metales traza Cr y Zn en aguas residuales se siguió la metodología descrita por la APHA (2017). Se tomaron 50 mL de cada muestra de agua residual, posteriormente se fueron agregando 5 mL de HNO₃ concentrado hasta que la muestra obtuviera un color transparente y no se observaran sólidos. Las muestras fueron llevadas a reflujo a una temperatura aproximada de 95 °C, hasta obtener un volumen final aproximado de 10-20 mL. Finalmente, la solución fue transferida a tubos de polipropileno con agua desionizada hasta obtener un volumen final de 50 mL.

Para el análisis de los metales se utilizó un Espectrómetro de Emisión Atómica de plasma por microondas (Agilent MP-AES 4100). En el caso del análisis de Hg en aguas residuales no fue necesario realizar un tratamiento previo a las muestras, estas fueron analizadas a través de un Analizador directo de mercurio marca Milestone DMA-80.

6.4. ANÁLISIS DE DATOS

6.4.1. ENRIQUECIMIENTO POR METALES TRAZA (Cr, Zn y Hg) EN SEDIMENTOS

Para determinar los sitios enriquecidos por metales traza se utilizó el procedimiento de normalización descrito por Schiff y Weisberg (1999), el cual consiste en obtener la línea base Fe-metal a través de dos criterios: El primer criterio excluye a los sitios que se encuentran cercanos a fuentes conocidas de alguna entrada de metales traza, como lo pueden ser salidas de aguas residuales

arroyos o ríos, puertos, entre otros. El segundo criterio consistió en eliminar los datos extremos “outliers” de los sitios restantes. Para ello, se utilizó un análisis de regresión entre cada uno de los metales analizados y el normalizador (Fe_2O_3).

Los residuales que se obtuvieron en la regresión fueron evaluados a través de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. En los casos en los que no se obtuvo una distribución normal de los residuales de la regresión, se procedió a eliminar los datos extremos y recalcular la regresión. Se consideraron datos extremos a aquellos que poseían valores mayores a dos veces la desviación estándar (positiva o negativa). Esto se repitió hasta que se logró alcanzar una distribución normal.

Una vez que se obtuvo la línea base de cada metal se delimitó la variación que se considera normal. Para ello, se graficó la línea de tendencia de regresión lineal entre el normalizador (Fe) y el metal que forma la línea base del metal, así como su intervalo de predicción (95%) de la línea base. Todo valor del metal obtenido en muestras de sedimento por encima del intervalo de predicción se consideró como un sitio enriquecido.

6.4.2. POSIBLES EFECTOS TÓXICOS EN ORGANISMOS

Para evaluar si las concentraciones encontradas en el área de estudio representaban un riesgo para los organismos que habitan en ella, se utilizó la Guía de Calidad de Sedimentos (Sediment Quality Guideline, SQG) descrito por Long *et al.* (1995). En donde los efectos adversos producidos por sedimentos contaminados sobre los organismos acuáticos pueden ser evaluados mediante

valores de referencia denominados “rango de efecto bajo (ERL)” y “rango de efecto medio (ERM)”, de los cuales se derivan tres categorías de efectos biológicos adversos: efectos no observados (concentración < ERL), ocasionalmente observados (concentración entre ERL y ERM) y frecuentemente observados (concentración > ERM).

6.4.3. DIFERENCIAS LATITUDINALES

Para determinar si existen diferencias latitudinales y por profundidad en el área de estudio, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis la cual determinó si un grupo de datos proviene de la misma población (se rechaza la hipótesis nula; H_0 = No existen diferencias significativas entre las concentraciones del metal en cada zona).

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se analizan y discuten los resultados obtenidos para los metales traza Cr, Zn y Hg mediante un análisis de la distribución espacial (latitudinal y por estrato de profundidad) en los sedimentos superficiales. Cabe destacar que se consideraron cuatro estratos en el área de estudio por latitud (Norte, Centro, Sur y Estero) y profundidad (Somero, Intermedio, Profundo y Estero). Es importante señalar que en ambas categorías se consideró el Estero como un estrato independiente al Bight por las características oceanográficas particulares de este cuerpo de agua, las cuales son diferentes al de la Cuenca de las Californias (mayor porcentaje acumulado de tamaño de grano de 63 μm en el Estero). Por lo anterior, para la determinación de la línea base de cada metal se decidió separar la base de datos en dos sets: Bight (B02 a B98) y Estero (E03 a E29), esto con la finalidad de trabajar los datos de una manera más apropiada.

7.1. TAMAÑO DE GRANO

En la Tabla 1 se presenta la estadística descriptiva de las fracciones (4, 16, 40 y 63 μm) de tamaño de grano (% acumulado) de los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur) en la zona delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México (Anexo, Tabla A3).

Para el caso del Bight (zona Norte, Centro y Sur), de las cuatro fracciones analizadas la que presentó un mayor porcentaje acumulado fue la de <63 μm , presentando aproximadamente un promedio de 32.4% (rango de 1.0 – 100%).

Así mismo, para el caso del Estero la fracción de $<63 \mu\text{m}$ también fue la predominante, presentando un promedio del 56.1% (rango de 0.0 – 99.4%).

A pesar de no haber analizado las fracciones más gruesas de los sedimentos marinos superficiales, en el caso del Bight podemos observar que la fracción mayor a $63 \mu\text{m}$ (arenas) es la que predomina en los sedimentos (67.6%). Por lo tanto, esto nos estaría indicando que la dinámica oceánica en esta área rige su distribución, siendo las áreas expuestas de alta energía las que presentan un bajo porcentaje de sedimentos más finos (limo-arcillosos) debido a que las partículas no se logran depositar en el fondo marino. Por otra parte, el Estero presenta una distribución de tamaño de grano regida principalmente por el patrón de mareas. Se pueden observar tres zonas en el Estero: la boca dominada por tamaño de grano más grueso, la cabeza donde podemos encontrar una mayor acumulación de tamaño de grano fino y la zona entre la boca y la cabeza del Estero la cual se caracteriza principalmente por ser una zona de mezcla. En general, el Estero presentó un porcentaje acumulado en la fracción mayor a $63 \mu\text{m}$ de 43.9%

Para el caso de la clasificación de estrato por profundidad se puede observar que una tendencia donde el porcentaje de sedimento fino aumenta con la profundidad, comportamiento que se observa con mayor claridad en las fracciones menores a 40 y $63 \mu\text{m}$ (Tabla 1).

Tabla 1. Estadística descriptiva de las fracciones (4, 16, 40 y 63 μm) de tamaño de grano (% acumulado) de los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur). Prom=promedio, Med= mediana, Min-Max= mínimo-máximo.

Estrato	# de sitios	<4 μm			<16 μm			<40 μm			<63 μm		
		Min-Max	Prom	Med	Min-Max	Prom	Med	Min-Max	Prom	Med	Min-Max	Prom	Med
<i>por latitud</i>													
Norte	43	0.0 - 23.5	2.3	1.1	0.7 - 76.8	10.8	8.6	0.7 - 99.8	20.7	18.2	1.0 - 100	31.7	30.8
Centro	15	0.0 - 3.4	0.9	0.8	0.7 - 76.8	7.0	7.1	0.3 - 47.1	18.3	16.7	1.2 - 79.3	34.6	36.2
Sur	19	0.0 - 10.6	1.5	0.8	2.0 - 42.6	9.1	6.5	4.3 - 59.6	19.2	13.8	9.9 - 61.9	32.2	30.9
Estuario	20	0.0 - 8.5	4	3.7	0.0 - 47.7	25.0	24.3	0.0 - 89.5	46.4	43.4	0.0 - 99.4	56.1	53.6
<i>por profundidad</i>													
Somero	28	0.0 - 17.9	1.25	0.2	0.0 - 76.8	6.8	7.2	0.3 - 99.8	11.7	5.3	1.0 - 100	17.8	12.3
Intermedio	35	0.0 - 23.5	2.3	1.1	1.7 - 51.5	11.1	8.6	3.2 - 67.1	22.4	20.8	8.2 - 76.9	37.1	36.5
Profundo	13	0.6 - 3.5	1.8	1.5	5.4 - 20.2	12.3	11.6	14.0 - 53.0	30.6	25.8	34.4 - 85.5	53.2	43.1
Estuario	20	0.0 - 8.5	4.0	3.7	0.0 - 47.7	25.0	24.3	0.0 - 89.5	46.4	43.4	0.0 - 99.4	56.1	53.6

En general, los sedimentos del área de estudio se encuentran distribuidos en forma de parches. En el Bight, se observa que los parches presentan un menor porcentaje acumulado de la fracción de sedimento menor a $63\ \mu\text{m}$ en sitios que se encuentran expuestos a una mayor energía y menor batimetría (Anexo, Figura A1), siendo la zona norte donde se encontró un mayor contenido de sedimento arenoso. Para el caso del Estero se puede observar lo mismo: la boca del Estero corresponde a la zona expuesta a alta energía y la cabeza a una menor energía, es por esto que podemos observar sedimentos arenosos en la boca del Estero y limo-arcillosos en la cabeza del Estero (Figura 3).

Alvarez-Aguilar *et al.* (2017) reportó promedios de tamaño de grano $<63\ \mu\text{m}$ de 34.3, 36.8 y 23.7% para las campañas del Bight de 1998, 2003 y 2013, respectivamente. En conjunto, los dos sets de datos analizados en este trabajo presentaron un promedio de 37.3% para la fracción $<63\ \mu\text{m}$, por lo que en este caso el porcentaje de tamaño de grano $<63\ \mu\text{m}$ de la campaña del Bight 2018 es muy similar a las de 1998 y 2003. Es posible que las muestras de sedimento del Bight del 2013 fuera diferente debido a que en la región presentaba una temporada de sequía, con una precipitación promedio anual de aproximadamente 193.8 mm (CONAGUA, 2021). Lo anterior favoreció a que se presentará un menor aporte de material terrígeno por escurrimientos hacia la zona costera.

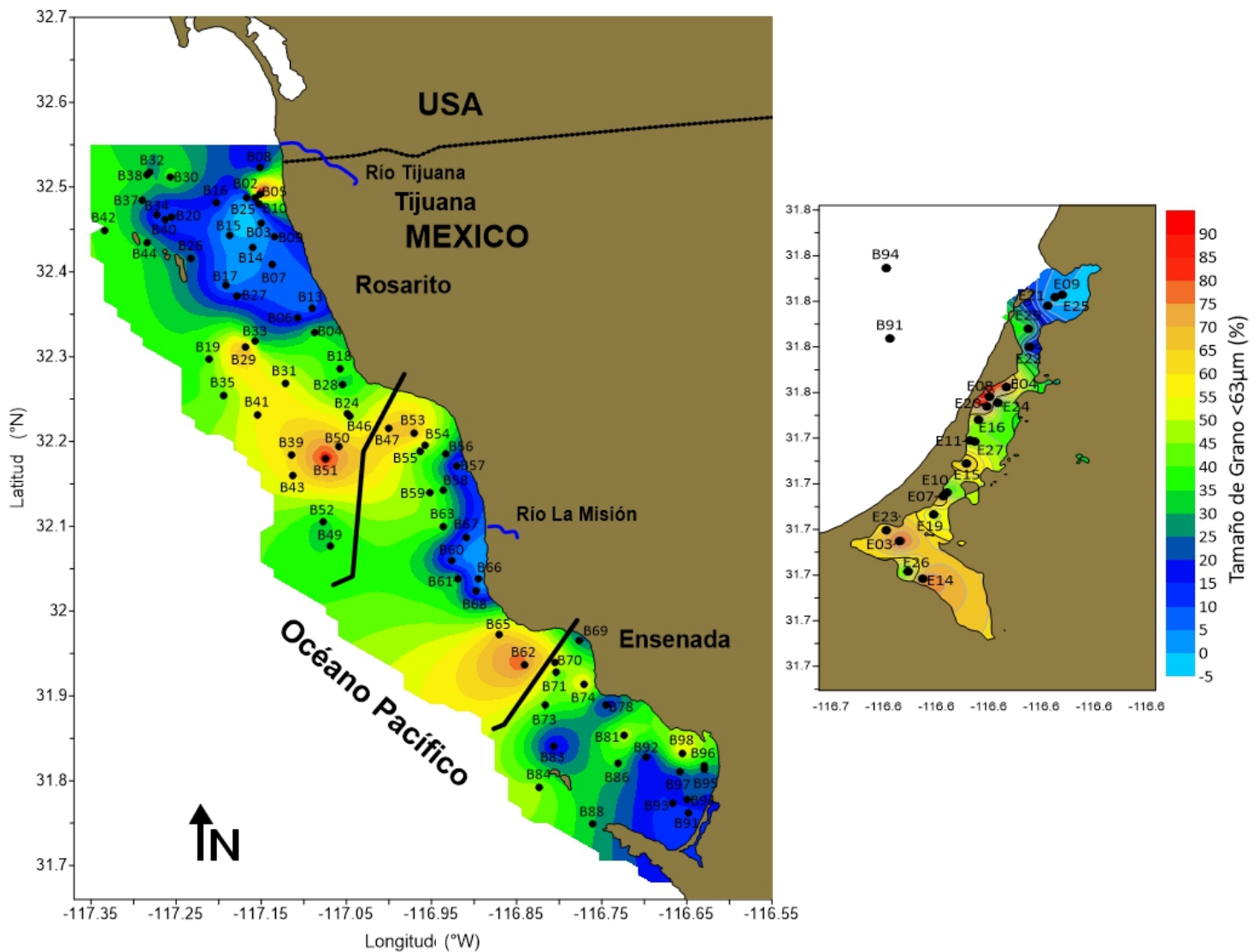


Figura 3. Distribución de tamaño de grano $<63 \mu\text{m}$.

7.2. CARBONO ORGÁNICO

En la Tabla 2 se muestra la estadística descriptiva de los resultados obtenidos del análisis del porcentaje de carbono orgánico en la zona delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México.

Tabla 2. Estadística descriptiva del porcentaje de carbono orgánico de los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur). Prom=promedio, Med= mediana, Min-Max= mínimo-máximo.

Estrato	# de sitios	%CO		
		Min-Max	Prom	Med
<i>por latitud</i>				
Norte	43	0.1 - 3.9	1.1	1.0
Centro	15	0.2 - 3.0	1.3	1.5
Sur	19	0.5 - 2.6	1.1	1.0
Estuario	20	0.1 - 4.3	1.7	1.6
<i>por profundidad</i>				
P. somero	28	0.1 - 1.4	0.5	0.4
P. intermedio	35	0.2 - 3.0	1.4	1.3
P. profundo	13	1.3 - 3.8	2.2	1.9
Estuario	20	0.1 - 4.3	1.7	1.6

El Bight (zona Norte, Centro y Sur) presentó un promedio de 1.2% de carbono orgánico, con una máxima de 3.8% y mínima de 0.1%. Las zonas cercanas a la costa fueron las que presentaron menores porcentajes de carbono orgánico (0–0.8%). En general, la zona norte y sur presentaron una menor acumulación de CO, mismas zonas en donde se presentó un bajo porcentaje acumulado de tamaño de grano de <63 μm .

Por otra parte, el Estero presentó un promedio de 1.7%, una mínima de 0.1% y máxima de 4.33%. Las zonas profundas corresponden a los sitios en donde se presentó un porcentaje de CO mayor. En general, se observó que las zonas de alta energía y las zonas profundas rigen la distribución del CO para el Bight y el Estero, comportamiento similar a lo observado para el %TG (Figura 4).

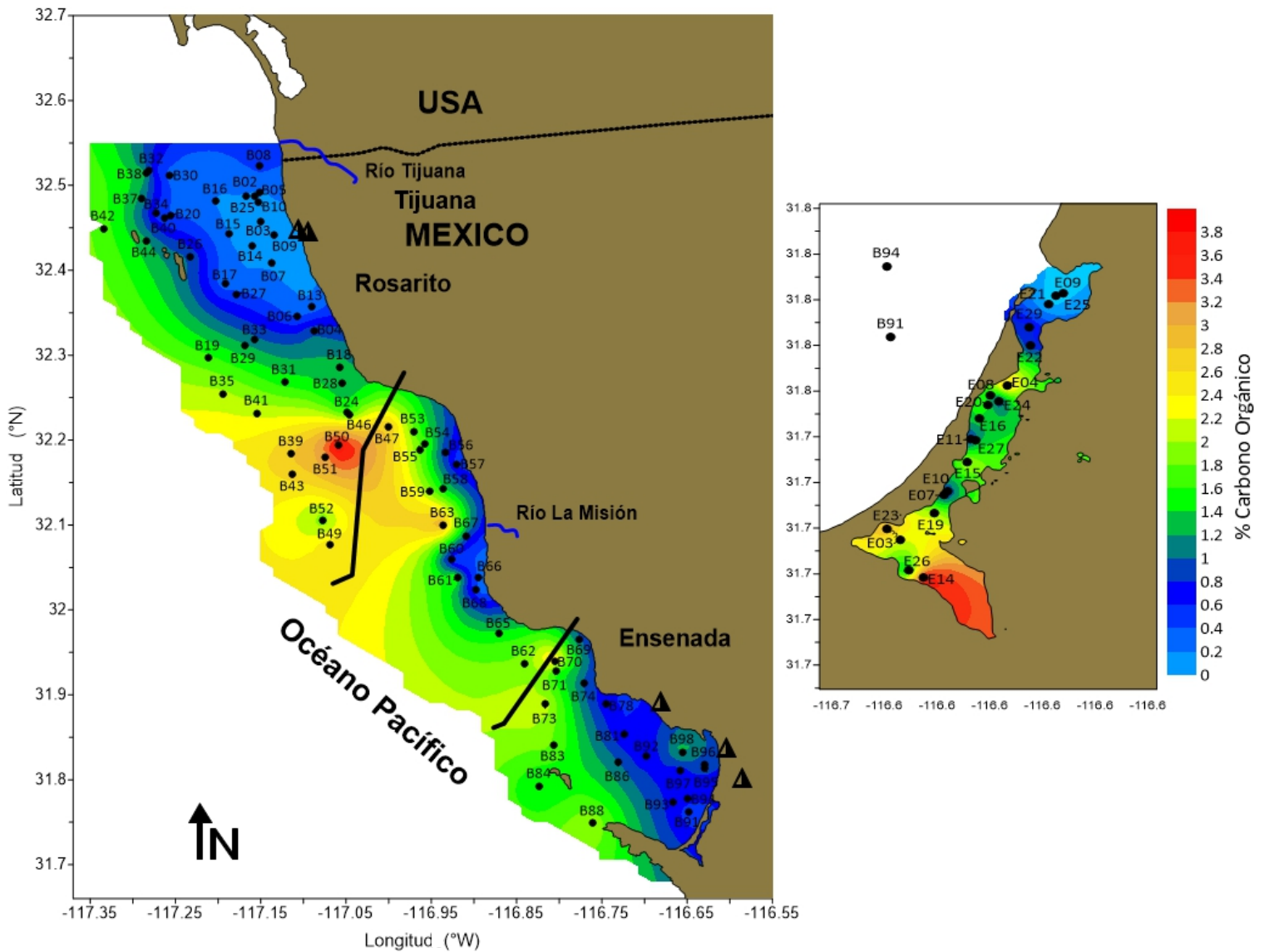


Figura 4. Distribución de %CO en sedimentos marinos superficiales del área de estudio.

Normalmente el contenido de carbono orgánico se encuentra asociado con la distribución del tamaño de grano en los sedimentos y así mismo, este último se asocia al contenido de metales traza. Por lo tanto, se evaluó la relación entre la distribución de tamaño de grano (%TG <63 μ m) y el contenido del carbono orgánico (%CO) para las muestras de sedimentos marinos superficiales colectadas. Se observó que el contenido de carbono orgánico a lo largo del área

de estudio presentaba una correlación relativamente baja con la distribución del %TG de la fracción <63 μm ($R^2 = 0.42$ para el Bight). Con la finalidad de mejorar dicha correlación se eliminaron los datos extremos “outliers” (muestra B05). Se obtuvo una correlación moderada ($R^2 = 0.56$) para el Bight y Estero, siendo este último donde no se observaron datos extremos (Figura 5 y 6).

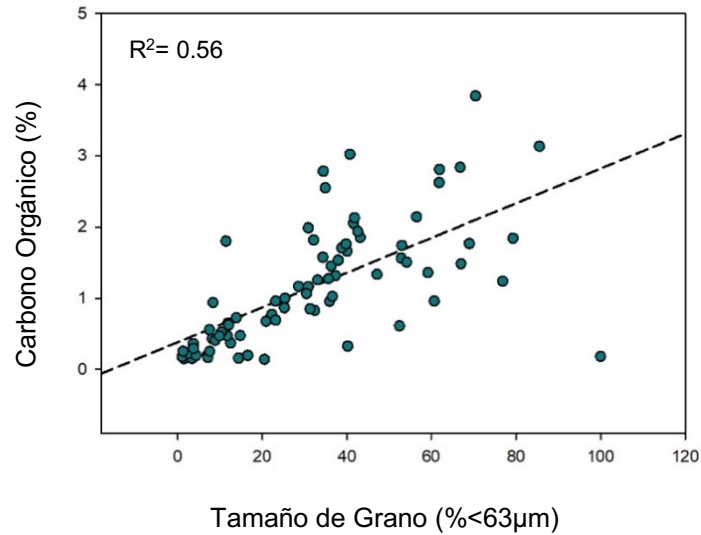


Figura 5. Correlación del tamaño de grano del sedimento y contenido de carbono orgánico para sedimentos superficiales colectados para el Bight.

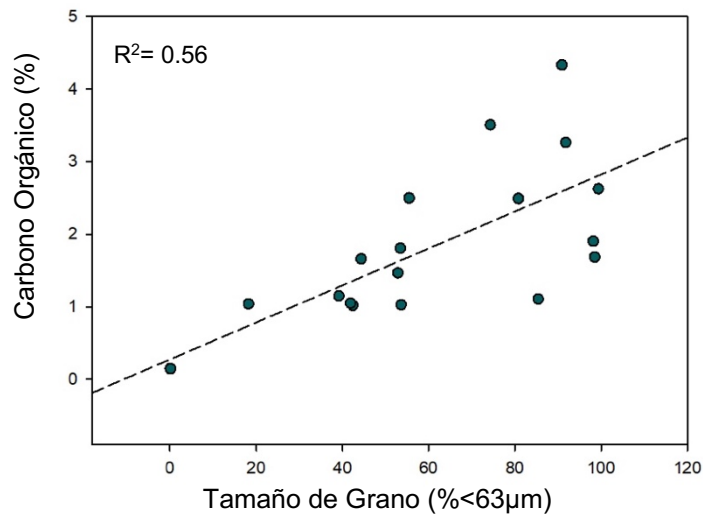


Figura 6. Correlación del tamaño de grano del sedimento y contenido de carbono orgánico para sedimentos superficiales colectados para el Estero.

7.3. CONCENTRACIONES DE METALES TRAZA EN SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES

7.3.1. CROMO (Cr)

En la Tabla 3 se resume la estadística descriptiva de las concentraciones del metal traza cromo (Cr) encontradas en los sedimentos superficiales en la zona delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México (Anexo, Tabla A5).

Tabla 3. Mínima, máxima, promedio y desviación estándar de las concentraciones de Cromo (Cr) en los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur).

Estrato	# de sitios	Cr ($\mu\text{g/g}$)		
		Min-Max	Prom	DS
<i>por latitud</i>				
Norte	43	9.4 - 117.5	40.2	33.6
Centro	15	15.3 - 83.7	40.9	22.2
Sur	19	9.2 - 58.9	25.4	14.8
Estuario	20	1.6 - 52.4	21.0	15.0
<i>por profundidad</i>				
P. somero	28	9.4 - 40.1	15.0	6.0
P. intermedio	35	9.2 - 105.3	43.4	25.8
P. profundo	13	28.8 - 117.5	66.4	30.6
Estuario	20	1.6 - 52.4	21.0	15.0

El promedio de concentración de Cr para el Bight (zona norte, centro y sur) fue de $36.7 \pm 28.4 \mu\text{g/g}$, con una mínima de $9.2 \mu\text{g/g}$ (ubicada en la zona sur) y máxima de $117.5 \mu\text{g/g}$ (ubicado en la zona norte). Las mayores concentraciones por Cr se encontraron en las estaciones B35 ($111.7 \mu\text{g/g}$), B39 ($105.3 \mu\text{g/g}$) y B43 ($117.5 \mu\text{g/g}$), estas se encuentran ubicadas en la zona norte del área de estudio y en los estratos intermedio para la estación B39 y profundo para el caso de las estaciones B35 y B43.

En el Estero se observó una concentración promedio de $21.0 \pm 15.0 \mu\text{g/g}$, con una mínima de $1.6 \mu\text{g/g}$ y máxima de $52.4 \mu\text{g/g}$. Las mayores concentraciones por Cr se observaron en la estación E03 ($52.4 \mu\text{g/g}$), E14 ($51.52 \mu\text{g/g}$) y E23 ($39.5 \mu\text{g/g}$), ubicadas en la cabeza del estero, sitio donde se presentó un mayor porcentaje acumulado de TG menor a $63 \mu\text{m}$.

Alvarez-Aguilar *et al.* (2017) reportó un rango de concentración para el Cr de $6.2 - 37.7$, de $6.9 - 54.3$ y $3.4 - 34.5 \mu\text{g/g}$ para las campañas del Bight de 1998, 2003 y 2013, respectivamente (Figura 7). Es importante destacar que, para la campaña del 2018, el rango de concentraciones de Cr fue de dos a tres veces mayor ($1.6 - 117.5 \mu\text{g/g}$) en comparación a lo reportado en la zona.

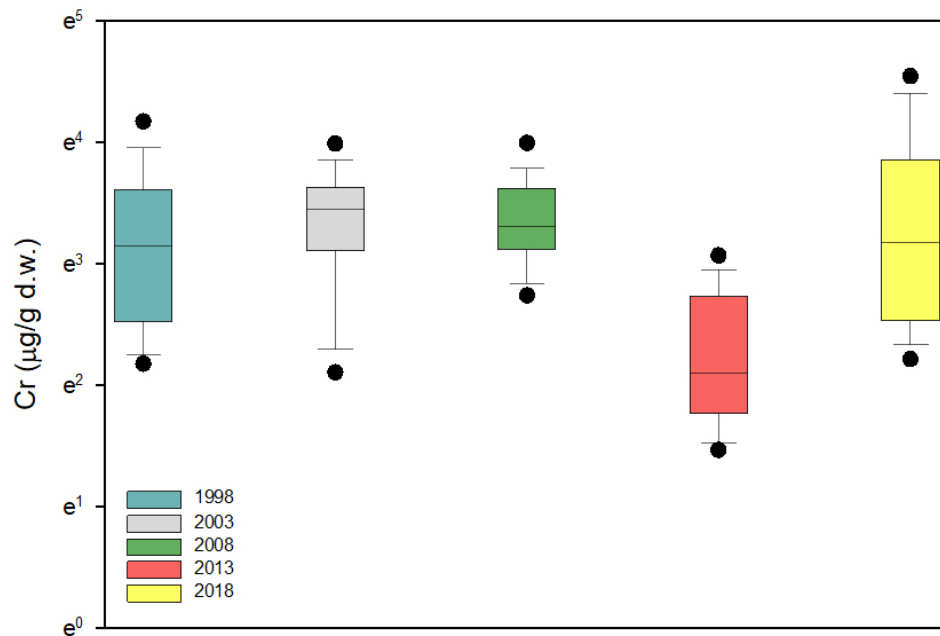


Figura 7. Diagrama de cajas de las concentraciones de Cr en las diferentes campañas del Bight (a escala exponencial).

7.3.2. ZINC (Zn)

En la Tabla 4 se resume la estadística descriptiva de las concentraciones del metal traza zinc (Zn) encontradas en los sedimentos superficiales en la zona delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México (Anexo, Tabla A5).

El promedio de concentración de Zn para el Bight (zona norte, centro y sur) fue de 29.9 ± 14.3 $\mu\text{g/g}$, con una mínima de 6.6 $\mu\text{g/g}$ y máxima de 78.9 $\mu\text{g/g}$. La mayor concentración de Zn fue observada en la estación B49 con una concentración de 78.9 $\mu\text{g/g}$, la cual se encuentra ubicada en la zona norte y en el estrato profundo. Por otra parte, el Estero se presentó una concentración promedio de 26.7 ± 8.1 $\mu\text{g/g}$, con una mínima de 8.8 $\mu\text{g/g}$ y máxima de 40.9 $\mu\text{g/g}$, en donde este valor máximo lo encontramos en la estación E22, ubicada en la boca del Estero.

Tabla 4. Mínima, máxima, promedio y desviación estándar de las concentraciones de Zinc (Zn) en los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur).

Estrato	# de sitios	Zn ($\mu\text{g/g}$)		
		Min-Max	Prom	DS
<i>por latitud</i>				
Norte	43	6.6 - 78.9	29.5	16.3
Centro	15	8.3 - 33.7	23.4	7.4
Sur	19	23.9 - 71.7	36.2	11.1
Estuario	20	8.8 - 40.9	26.7	8.1
<i>por profundidad</i>				
P. somero	28	12.4 - 38.3	25.8	8.2
P. intermedio	35	13.7 - 117.5	34	34.1
P. profundo	13	88 - 78.9	65.8	20.3
Estuario	20	8.8 - 40.9	26.7	8.1

Para el caso del Bight, la estación con mayor concentración se encontró en la zona norte alrededor de la isobata de los 200 m. Mientras que en el Estero, la

estación se encontraba cercana a la boca (zona donde se observa una mayor influencia por el régimen de mareas).

Alvarez-Aguilar *et al.*, (2017) reportó un rango de concentración para el Zn de 2.9 - 80.2, 4.05 - 110.6, 2.5 - 51.4 $\mu\text{g/g}$ para las campañas del Bight de 1998, 2003 y 2013, respectivamente. Comparando los valores reportados por el autor y los obtenidos para la campaña del 2018, se puede observar que los rangos de concentraciones (6.6 - 78.9 $\mu\text{g/g}$) son similares a los reportados en la campaña de 1998. Por otra parte, se puede ver un aumento de concentraciones considerable de la campaña del 2013 a la del 2018 (Figura 8).

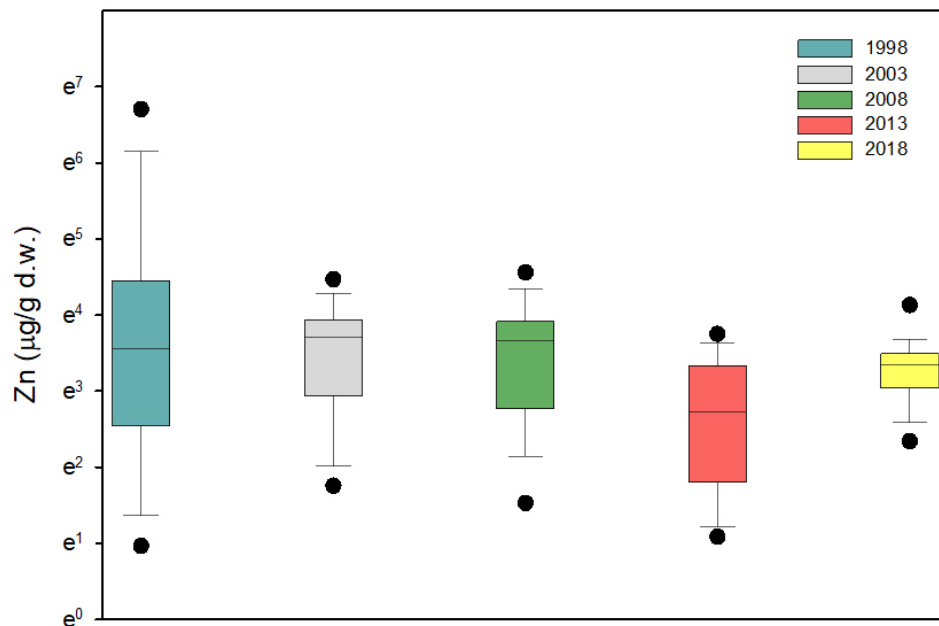


Figura 8. Diagrama de cajas de las concentraciones de Zn en las diferentes campañas del Bight (a escala exponencial).

7.3.3. MERCURIO (Hg)

En la Tabla 5 se resume la estadística descriptiva de las concentraciones del metal traza mercurio (Hg) encontradas en los sedimentos superficiales en la zona

delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México (Anexo, Tabla A5).

Tabla 5. Mínima, máxima, promedio y desviación estándar de las concentraciones de Mercurio (Hg) en los sedimentos marinos superficiales para los estratos por profundidad (somero, intermedio y profundo) y por latitud (Norte, Centro y Sur).

Estrato	# de sitios	Hg (ng/g)		
		Min-Max	Prom	DS
<i>por latitud</i>				
Norte	43	1.5 - 36.0	11.7	9.9
Centro	15	2.2 - 16.6	9.2	5.4
Sur	19	2.2 - 46.0	10.6	12.0
Estuario	20	1.7 - 20.4	10.6	5.0
<i>por profundidad</i>				
P. somero	28	1.5 - 28.7	4.8	5.2
P. intermedio	35	2.9 - 35.0	20.4	9.6
P. profundo	13	10.5 - 35.0	19.9	8.2
Estuario	20	1.7 - 20.4	10.6	5.0

Las concentraciones del Hg fueron tres órdenes de magnitud menor a las concentraciones de Cr y Zn. Se presentó un promedio de concentración de Hg para el Bight (zona norte, centro y sur) fue de 10.9 ± 9.6 ng/g, con una mínima de 1.5 ng/g y máxima de 46.0 ng/g. En los sedimentos superficiales, solo la estación B83 tuvo concentraciones altas de Hg, con un valor de 45.9 ng/g, la cual se encuentra ubicada en la zona sur y en un estrato intermedio. Mientras que, para el Estero se presentó una concentración promedio de 10.6 ± 5.0 ng/g, con una mínima de 1.7 ng/g y máxima de 20.4 ng/g. Se presentaron dos estaciones con altas concentraciones por Hg, la estación E14 con una concentración de 20.4 ng/g y la E23 con 19.5 ng/g, ambas ubicadas en la cabeza del Estero.

La campaña del Bight 2018 es la primera en la que se mide Hg, por lo tanto, no hay datos de las campañas anteriores con las cuales se puedan comparar.

Sin embargo, Gutiérrez-Galindo *et al.* (2007) analizó Hg en muestras sedimentos marinos (n = 37) colectadas en 1988 dentro del área de estudio. El autor reportó un rango de concentración de 30.4 - 96.5 ng/g, encontrando que el sitio con mayor concentración se ubicaba en la zona norte cercano a las Islas Coronado. Comparando los valores reportados por el autor y los obtenidos en la campaña del 2018 (1.5 - 45.9 ng/g) podemos observar que las concentraciones de Hg disminuyeron significativamente. Sin embargo, es importante destacar que estas posibles diferencias pudiesen deberse a que la técnica de análisis de Hg utilizada por los autores fue diferente a la de este trabajo, presentando un límite de detección de 9.0 ng/g.

7.4. DIFERENCIAS POR LATITUD Y PROFUNDIDAD

Para establecer diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones totales de cada metal en los estratos clasificados de acuerdo a su distribución latitudinal, se realizó la prueba estadística de Kruskal-Wallis. Este análisis estadístico fue seleccionado ya que el conjunto de datos no presentaba una distribución normal.

La concentración del Cr de la zona norte, centro y sur fueron diferentes entre sí (H = 8.354, gl = 3), para el caso del Zn y Hg no se encontraron diferencias significativas (H = 6.270, gl = 3 y H = 0.11, gl= 3, respectivamente).

Mientras que, al considerar la clasificación por estratos de profundidad, se encontraron diferencias significativas entre el estrato somero, intermedio y profundo para la concentración de Cr y Hg (H= 7.815, gl= 3 y H=35.9 gl= 3). Cabe señalar que en el caso del Zn no se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

7.5. NORMALIZACIÓN DE METALES TRAZA

Se utilizaron los datos de las concentraciones de Cr, Zn y Fe₂O₃ de las campañas Bight 1998, 2003, 2008, 2013 y 2018 para el caso de la cuenca de las Californias y de las campañas Bight 2013 y 2018 en el caso del Estero, con la finalidad de determinar la línea base de cada metal. Para el caso de Hg, no fue posible generar esta línea base ya que la campaña Bight 2018 es la primera en la que se midió este metal.

Al realizar la normalización de los metales traza con base a los criterios descritos por Schiff y Weisberg (1999) se observó que metales como el Cr, Zn (Figura 9) y Hg (Figura 10) presentaron estaciones por arriba del intervalo de predicción lo que indica que estos sitios poseen enriquecimiento por estos metales en los sedimentos marinos superficiales.

El Hg presentó una buena correlación con el %CO ($R^2 > 0.91$) en el Bight y Estero. Por otro lado, el Cr presentó una buena correlación con el %Fe₂O₃ ($R^2 > 0.85$) en el Bight y Estero. Sin embargo, el Estero no tuvo una buena correlación entre el Zn con ninguno de los normalizadores ($R^2 < 0.1$), por lo que la determinación de sitios enriquecidos para esta zona no pudo ser realizada.

Una posible explicación a la baja correlación con este metal sea que existen otros factores que están alterando la distribución del Zn en el Estero, como lo pueden ser algunas fuentes cercanas a la boca del Estero que cambian completamente la tendencia esperada (relación directamente proporcional de la concentración del Zn con el mayor porcentaje de tamaño de grano fino).

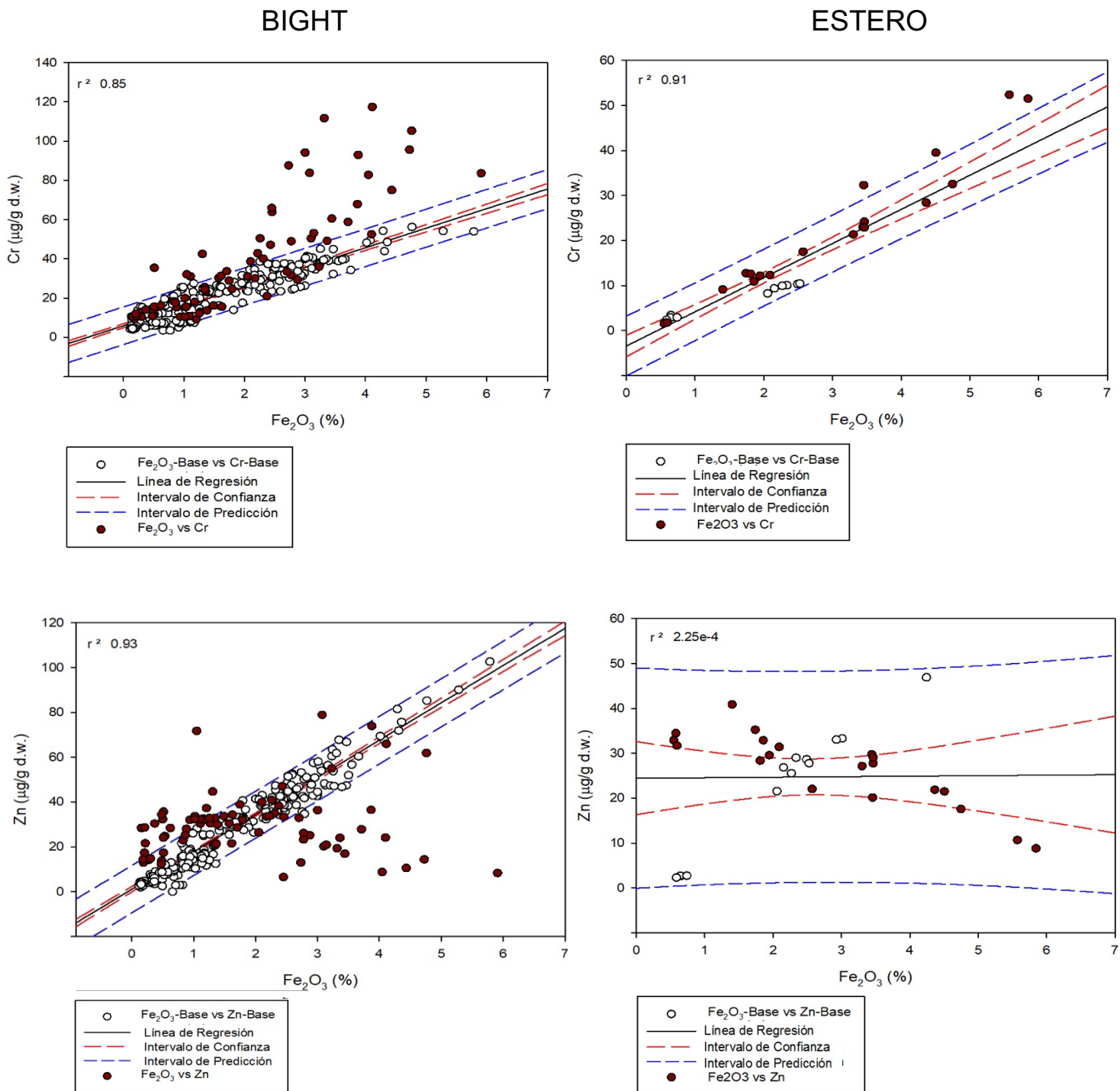


Figura 9. Normalización del Cr y Zn para la determinación de sitios enriquecidos.

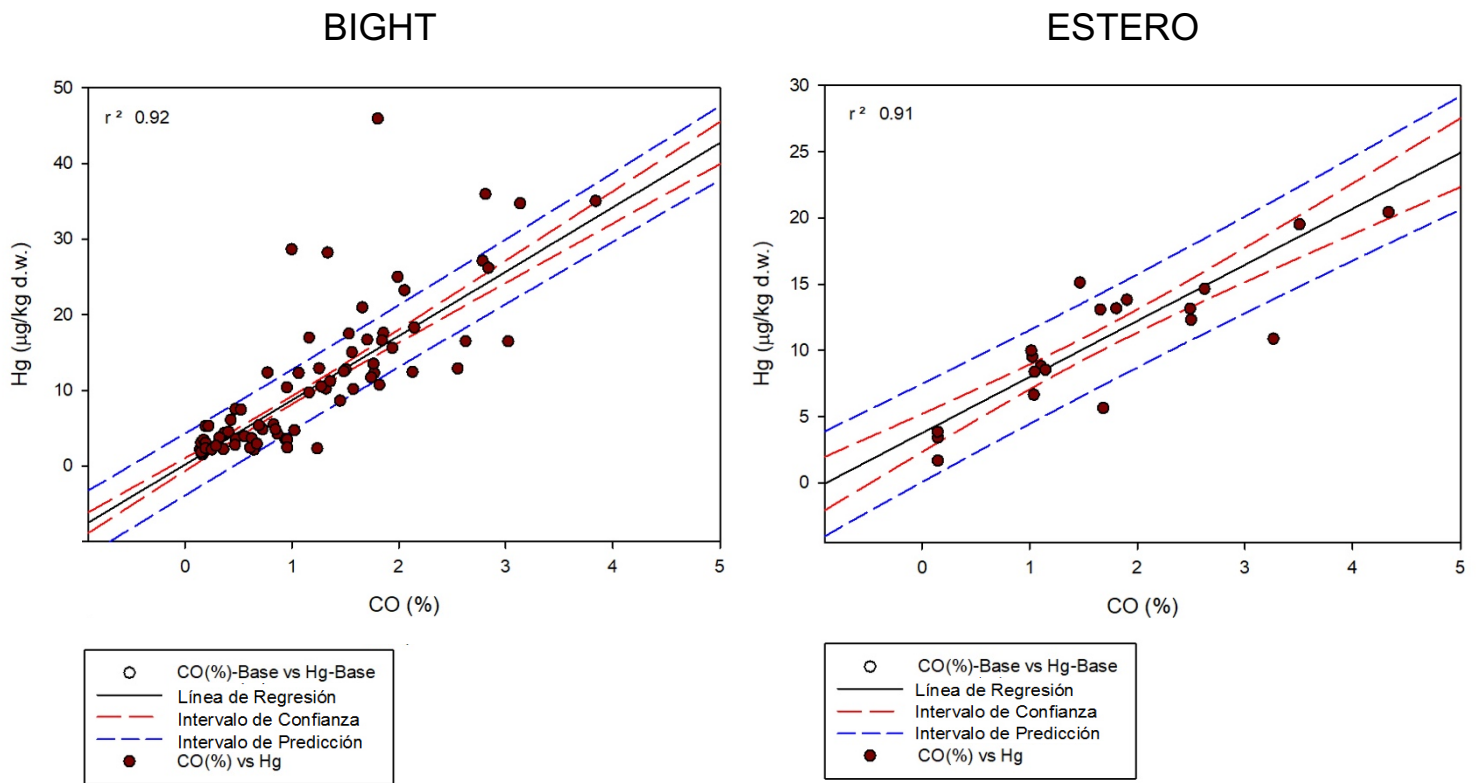


Figura 10. Normalización del Hg para la determinación de sitios enriquecidos.

7.6. ENRIQUECIMIENTOS POR METALES TRAZA

A continuación, se presentan los sitios enriquecidos para cada metal en la zona delimitada desde la frontera Tijuana (México) – California (E.U.A) a la Bahía Todos Santos, B.C., México.

La relación metal/ $\%Fe_2O_3$ se utilizó para identificar los sitios en los que los sedimentos marinos superficiales se encontraban enriquecidos. Al utilizar el $\%Fe_2O_3$ se observó una buena correlación con el Cr y Zn, obteniendo un valor promedio de $R^2 = 0.90$. Mientras que para el caso del Hg se presentó una mejor correlación con el $\%CO$, obteniendo un valor promedio de $R^2 = 0.91$.

7.6.1. ENRIQUECIMIENTO POR CROMO (Cr)

La distribución de Cromo (Cr) en el área de estudio se encuentra en un intervalo de 9.2 a 117.5 $\mu\text{g/g}$ d.w. en el Bight y 1.6 a 52.4 $\mu\text{g/g}$ d.w. en el Estero (Figura 11). La distribución de Cr parece estar controlada por la distribución del tamaño de partículas finas, ya que las zonas donde se presentan mayor %TG <63 μm corresponde a los sitios donde se presentaron mayores concentraciones de Cr. Por lo tanto, podemos decir que los patrones físicos como lo son corrientes y mareas parecen estar dominando la distribución de este metal.

El Bight presentó un enriquecimiento por Cr en 31 estaciones (B18, B19, B24, B26, B28, B29, B31, B33, B35, B37, B39, B41, B42, B43, B46, B47, B49, B50, B51, B52, B53, B58, B59, B62, B61, B63, B65, B70, B73, B83, B84), mientras que en el caso del Estero se presentó un enriquecimiento en 4 estaciones (E03, E04, E14, E23) (Figura 9). El 21% de las estaciones presentaron enriquecimiento en la zona norte del área de estudio, 7% en zona centro, 4% en la zona sur y 3% en el estero. En general, se observó que el número de sitios enriquecidos disminuyó de norte a sur en el área de estudio.

Es importante destacar que los sitios enriquecidos presentes en el área de estudio se encontraron a profundidades mayores a 50 m a excepción de la estación B26 ubicada en la zona norte la cual se encontraba a una profundidad de 21 m, lo cual sugiere que la acumulación de Cr en la región está mayormente asociada a zonas de acumulación de material particulado fino.

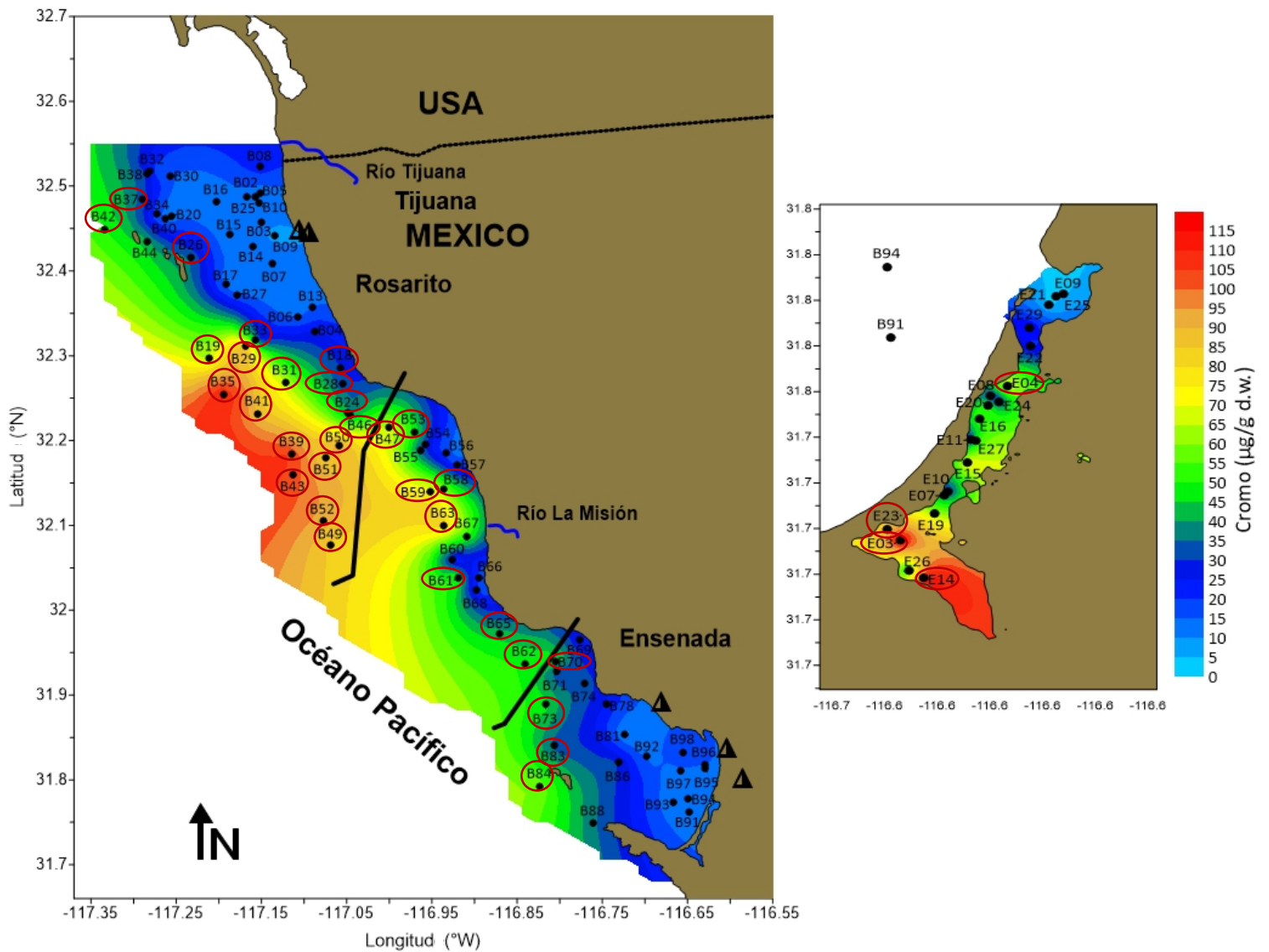


Figura 11. Distribución de Cromo (Cr) en sedimentos del área de estudio. El círculo rojo indica la estación que presentó un enriquecimiento por Cr.

Durante las campañas del Bight 1998, 2003, 2008 y 2013, únicamente se presentó un sitio enriquecido por Cr en la campaña del 2003, el cual se localizaba en el cañón submarino ubicado en el interior de la Bahía Todos Santos, esto nos parece sugerir que el área de estudio está teniendo una entrada de Cr, la cual está aumentando las concentraciones y el número de sitios enriquecidos por este metal.

El Cr está asociado a las actividades antropogénicas, siendo utilizado principalmente en la fabricación de pigmentos y conservantes textiles, en la fabricación de cemento, en aleaciones, pinturas, catalizadores, agentes anticorrosivos, baterías, fungicidas, conservantes de madera y recubrimientos metálicos.

7.6.2. ENRIQUECIMIENTO POR ZINC (Zn)

La distribución de Zinc (Zn) en el área de estudio se encuentra en un intervalo de 6.6 a 78.9 $\mu\text{g/g d.w.}$ en el Bight y 8.8 a 40.9 $\mu\text{g/g d.w.}$ en el Estero (Figura 12). La distribución de Zn en el Bight parece estar controlada por la distribución del tamaño de partículas finas, ya que las zonas donde se presentan mayor %TG <63 μm corresponde a los sitios donde se presentaron mayores concentraciones de Zn. Sin embargo, en el caso del Estero no ocurre la mismo.

Por lo tanto, podemos decir que para el caso del Bight los patrones físicos como lo son corrientes y mareas parecen estar dominando la distribución de este metal, mientras que en el caso del Estero existe una fuente cercana a la boca que está cambiando las concentraciones esperadas.

El Bight presentó un enriquecimiento por Zn en 27 estaciones (B09, B13, B14, B16, B16, B17, B20, B25, B26, B27, B30, B32, B33, B34, B40, B44, B49, B57, B66, B68, B69, B81, B83, B91, B93, B94, B95) en un intervalo de profundidad de 15 a 82 m, a excepción de la estación B49 que presento una profundidad de 144 m (Figura 11). Debido a que la correlación entre %Fe₂O₃ y Zn era muy baja en el Estero, no se pudo realizar la normalización del metal y determinar los sitios

enriquecidos (Figura 10). El 16% de las estaciones presentaron enriquecimiento en la zona norte del área de estudio, 3% en zona centro y 7% en la zona sur.

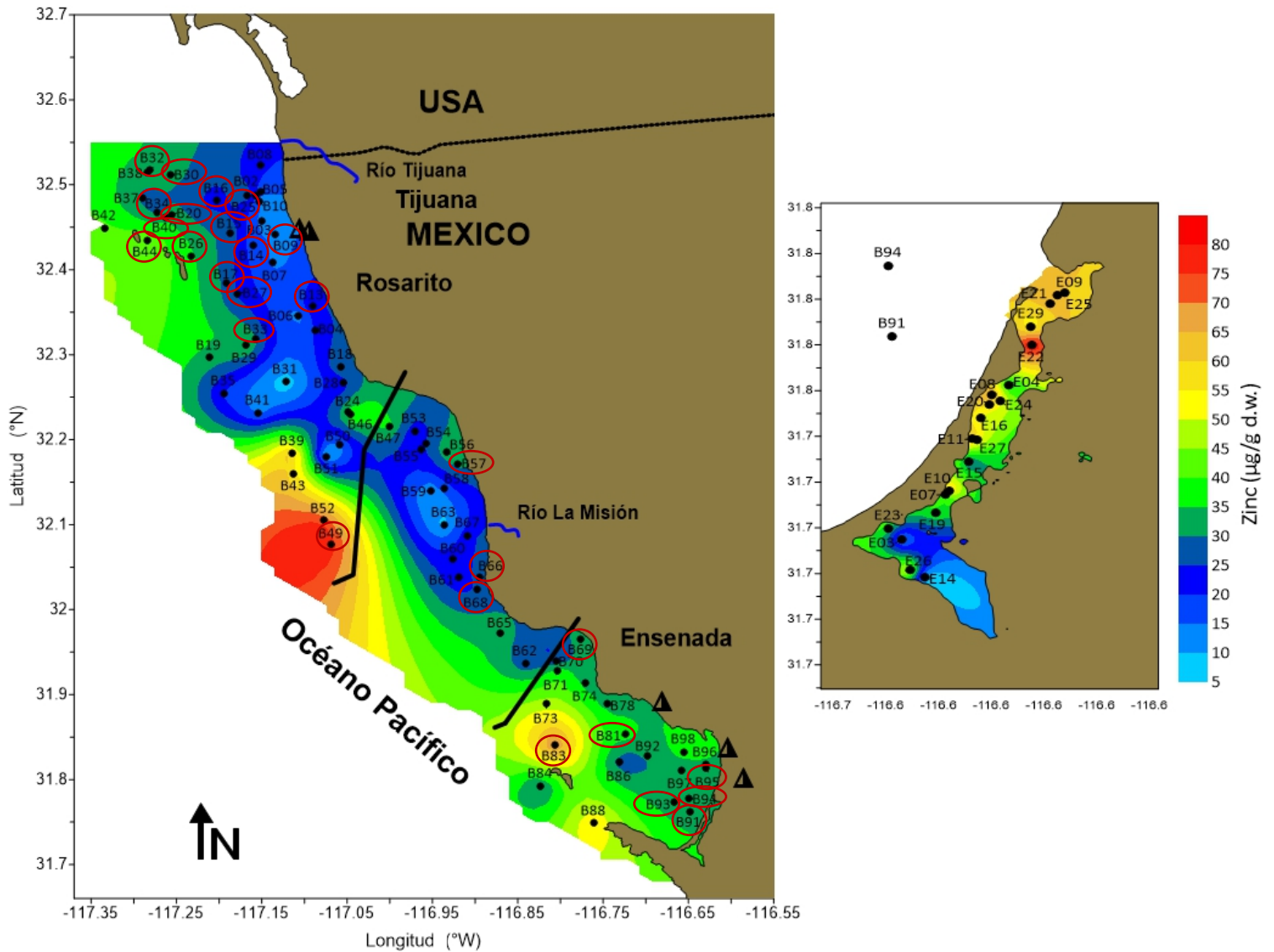


Figura 12. Distribución de Zinc (Zn) en sedimentos del área de estudio. El círculo rojo indica la estación que presentó un enriquecimiento por Zn.

Durante las campañas del Bight 1998, 2003, 2008 y 2013, solo se reportaron sitios enriquecidos para el Zn en 1998 y 2003. En 1998, se observaron dos sitios enriquecidos en la zona norte ubicados cerca de la línea de costa entre las descargas de las Planta de Tratamiento Binacional y Punta Bandera; dos sitios

ubicados en la zona centro, cerca de la línea de costa al sur de Punta Descanso a una profundidad de 46 y 186 m. En 2003, se reportó un sitio enriquecido en la zona sur, ubicado en el cañón submarino localizado en el interior de la Bahía Todos Santos a una profundidad de 205 m.

Se puede observar que hubo un aumento significativo en el número de sitios enriquecidos en la campaña del Bight 18 (35%) con respecto a las campañas del Bight de 1998 y 2003 (7% y 1%, respectivamente), por lo que esto nos indica que estamos teniendo fuentes que están introduciendo Zn al área de estudio, incrementando las concentraciones y el número de sitios enriquecidos por este metal.

La producción de Zn mundial es de 11 millones de toneladas, las principales áreas de aplicación del zinc son: construcción (45%), transporte (25%), bienes de consumo y electrodomésticos (23%) e ingeniería (7%) (IZA, 2015). El uso del Zn está asociado a las actividades antropogénicas, es utilizado principalmente en actividades industriales como extracción, combustión de carbón y elaboración del acero, galvanizado del hierro, producción de latón, planchas de zinc para tejados, fabricación de pinturas y esmaltes, aditivo en la metalurgia de metales preciosos, insumo farmacéutico, etc. En la actualidad el uso del Zn no ha sido restringido, sino que ha ido incrementando con el paso de los años y esto es el reflejo de lo que podemos encontrar en el medio actualmente.

7.6.3. ENRIQUECIMIENTO POR MERCURIO (Hg)

La distribución de Mercurio (Hg) en el área de estudio se encuentra en un intervalo de 1.5 a 45.9 ng/g d.w. en el Bight y 1.7 a 20.4 ng/g d.w. en el Estero (Figura 13).

La distribución de Hg en el Bight y Estero parece estar controlada por la distribución del porcentaje de carbono orgánico, los sitios donde se presentó un mayor %CO corresponde a los sitios donde se presentó una mayor concentración de Hg.

El Bight presentó un enriquecimiento por Hg en 12 estaciones (B19, B26, B32, B35, B37, B39, B51, B71, B83, B84, B88), mientras que en el del Estero solo se presentó un sitio enriquecido (E27). El 7% de las estaciones presentaron enriquecimiento en la zona norte del área de estudio, 3% en la zona sur y el 1% en el estero. En este caso en la zona centro no se encontraron sitios enriquecidos.

Durante las campañas del Bight 1998, 2003, 2008 y 2013 no se analizaron las concentraciones de Hg. Sin embargo, Gutiérrez-Galindo *et al.* (2007) analizó las concentraciones de Hg en sedimentos marinos superficiales en 37 estaciones en la misma área de estudio colectadas en 1998. Los autores reportaron 4 sitios enriquecidos, ubicados en la zona norte y centro del área de estudio.

Por lo que se puede observar que hubo un aumento en el número de sitios enriquecidos, la zona centro no presento sitios enriquecidos, no obstante, en la zona sur y el Estero se presentaron nuevos sitios enriquecidos. Sin embargo, no podemos asegurar que en el área de estudio se encuentren fuentes de Hg que lo

estén ingresan al medio, debido a que no existen suficientes análisis de Hg en los años previos al Bight 2018 con cuales poder comparar.

Los usos más comunes de Hg son la industria minera, industria cloro-álcali, uso como fungicida, pinturas, catalizadores, relleno dental, termómetros, barómetros, lámparas, pilas y rectificadores de corriente.

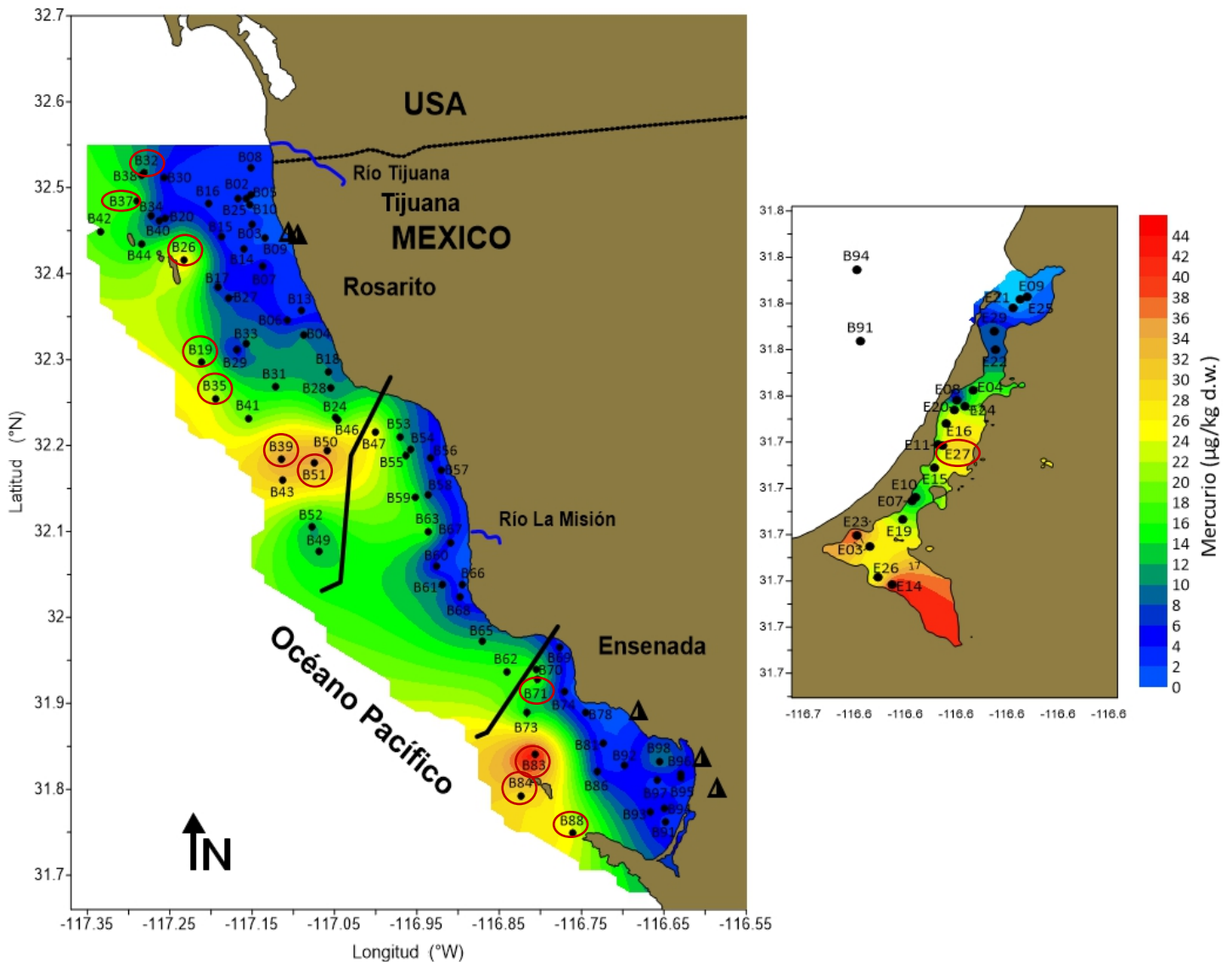


Figura 13. Distribución de Mercurio (Hg) en sedimentos del área de estudio. El círculo rojo indica la estación que presentó un enriquecimiento por Hg.

7.7. POSIBLES EFECTOS TÓXICOS EN ORGANISMOS

En la Tabla 6 se muestran los valores de referencia de ERL y ERM para cada metal, así como el número de estaciones que caen dentro de estos rangos. Según esta clasificación, el Cr puede estar representando un riesgo para los organismos expuestos que habitan en el área de estudio en 10 de las 97 estaciones evaluadas. De acuerdo a los criterios del SQG, las concentraciones de Zn y Hg representan un riesgo menor al ERL para los organismos que habitan en el área de estudio. Sin embargo, esto es considerando la presencia de un solo metal, pero como podemos observar en cada sitio confluyen la presencia de otros metales (Anexos Tabla A5) y posiblemente otro tipo de contaminantes (pesticidas, hidrocarburos aromáticos, bifenil policlorados, etc), que puede estar ocasionando una mayor repercusión en la salud de los organismos en el área de estudio, lo que significa que estos pueden estar presentando un riesgo para los organismos expuestos que se habitan en el área.

Tabla 6. Número de estaciones evaluadas mediante la aplicación de SQG. Valores de referencia ERL y ERM obtenidos de Long et al., (1995).

	Metales		
	Cr	Zn	Hg
Número de estaciones			
n<ERL	87	97	97
Entre ERL y ERM	10	0	0
n>ERM	0	0	0
Concentración del rango de efectos ($\mu\text{g/g d.w.}$)			
ERL	81	150	0.15
ERM	370	410	0.71

7.8. AGUAS RESIDUALES TRATADAS

En la Tabla 7 se presenta las concentraciones promedio totales de Cr, Zn y Hg encontradas en cada uno de los efluentes de las PTAR muestreadas en este trabajo. Con respecto a las concentraciones de Cr y Zn en los efluentes de las PTAR en el área de estudio, la PTAR Punta Bandera (Efluente Tratado) perteneciente a la ciudad de Tijuana presentó mayores concentraciones para ambos metales. En tanto, en el caso del Hg solo PTAR El Naranjo perteneciente a la ciudad de Ensenada presentó la mayor concentración por este metal (Tabla 7).

Tabla 7. Concentraciones totales de metales traza (mg/l) encontradas en los diferentes efluentes de PTAR.

PTAR	Efluente m ³ /d	Concentración (mg/L)			Masa (kg/d)		
		Cr	Zn	Hg	Cr	Zn	Hg
El Sauzal	4566.5	0.01	0.10	0.001	0.05	0.47	0.00
El Gallo	12694.3	0.01	0.14	0.001	0.14	1.72	0.01
El Naranjo	41313.6	0.00	0.10	0.003	0.12	4.14	0.11
Punta Bandera - Efluente Tratado	96595.2	0.08	0.23	0.001	8.11	22.02	0.10
Punta Bandera - Efluente Excedente	NA	0.01	0.09	0.001	NA	NA	NA
Descarga Arroyo (Punto Y)	105235.2	0.05	0.21	0.001	5.37	21.81	0.07

NA: No aplica.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas en aguas y bienes nacionales, dentro de la lista metales traza se encuentra el Cr, Zn y Hg, donde los límites máximos permisibles son 1.0, 20.0 y 0.02 mg/L, respectivamente. Mientras que en el caso de la Ley Clean Water Act de Estados Unidos se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en efluentes, siendo que para el Cr, Zn y Hg se establecen valores de 2.0, 15.0 y 0.005 mg/L, respectivamente.

Por lo tanto, las concentraciones de Cr, Zn y Hg encontradas en los efluentes de las PTAR analizadas en este trabajo se encuentran dentro los límites máximos permisibles reportados por México y Estados Unidos.

El único estudio que a nuestro conocimiento existe es el elaborado por la ciudad de San Diego (2003). En este estudio realizado durante enero a julio de 2003, se caracterizó las aguas residuales de la ciudad de Ensenada, reportándose concentraciones de Cr, Zn y Hg. En el caso del Cr se reportó un rango de concentración de 0.012 - 0.044 mg/L; en el caso del Zn un rango de 0.2 - 1.1 mg/L; y para el Hg un rango de 0.002 - 0.004 mg/L. Considerando lo anterior, actualmente las concentraciones observadas en todas las PTAR de la ciudad de Ensenada están dentro del rango reportado por la ciudad de San Diego en 2003. Por lo tanto, aunque no se observaron cambios en las concentraciones observadas en 2003 y 2018 para Cr, Zn y Hg, no se puede descartar que estas han permanecido constantes durante este lapso de tiempo ya que no han sido monitoreadas frecuentemente.

7.9. INVENTARIO DE MASAS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES

Para la determinación del inventario de masa total distribuida en los sedimentos marinos superficiales en el área de estudio se realizó la estimación de las concentraciones promedio por área (AWM) utilizando la ecuación descrita por Lao *et al.*, (2012):

$$AWM = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times AW_i)}{\sum_{i=1}^n AW_i}$$

AW_i representa el área ponderada en km^2 para la estación i , mientras que n indica el número total de estaciones y p_i representa la concentración del metal (Cr, Zn o Hg) en la estación i . Las estimaciones del inventario de masa total de cada metal en los sedimentos marinos superficiales fueron calculadas utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Masa} = \sum AW_i \times p_i \times T$$

Para la estimación se utilizó el área total por estrato (A) en km^2 , T el espesor de la capa de sedimento muestreada, la cuales equivalente a 2 cm como lo describe la metodología de muestreo de sedimentos marinos superficiales. La densidad del sedimento (δ) utilizada fue al reportada por Lao *et al.* (2012), la cual es de 1.5 g/mL.

En el área de estudio, se estima que en los sedimentos marinos superficiales se encuentran distribuidos 1258.2, 1050.5 y 0.4 toneladas de Cr, Zn y Hg, respectivamente en una extensión de 1173 km^2 que incluye las 4 zonas de muestreo (norte, centro, sur y estero).

La distribución espacial de metales traza en el área de estudio sugiere que existe la mayor acumulación de Hg en la zona norte y sur (0.012 g/kg), mientras que para el Cr es la zona norte y en la zona centro, cuyos valores fueron similares (39.8 y 41.1 g/kg, respectivamente), pero en el caso del Zn la zona sur fue la que presento una mayor acumulación, con un valor de AWM de 38.1 g/kg (Tabla 8).

Tabla 8. Inventario de masas en sedimentos marinos superficiales.

Zona	n	Área [km ²]	Cr		Zn		Hg	
			AWM (g/kg)	Masa (kg)	AWM (g/kg)	Masa (kg)	AWM (g/kg)	Masa (kg)
Norte	43	678.6	39.8	810062.7	27.1	552088.7	0.012	242.4
Centro	15	163.9	41.1	202179.0	24.6	121196.5	0.009	42.2
Sur	19	326.5	24.7	242196.4	38.1	373673.5	0.012	113.5
Estuario	20	4.9	25.2	3721.3	24.2	3571.0	0.011	1.7

Las contribuciones al inventario de masas de los tres metales traza presentes en sedimentos marinos superficiales del área de estudio se presentan en porcentaje en la Figura 14. Para el caso del Cr fueron el 64.4, 16.1, 19.3 y 0.3 %, en el Zn el 52.6, 11.5, 35.6 y 0.3 % y para Hg el 60.6, 10.6, 28.4 y 0.4 %, considerando el siguiente orden zona norte, centro, sur y estuario, respectivamente.

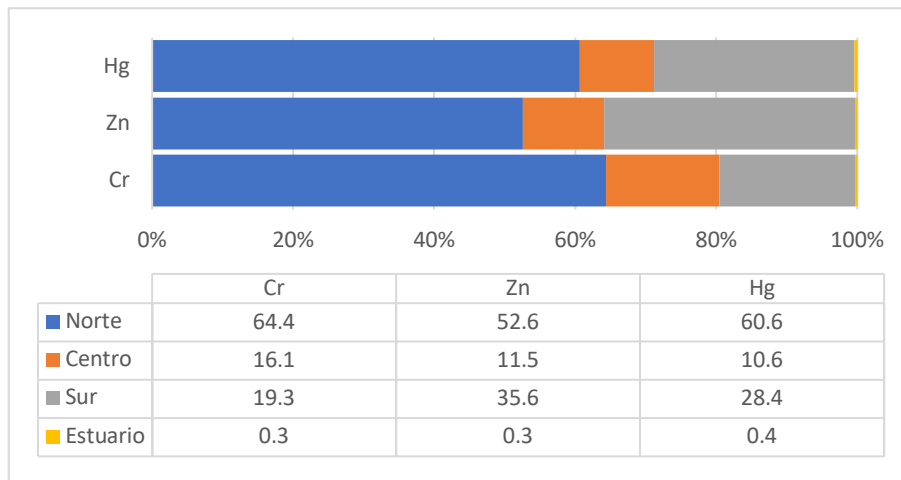


Figura 14. Contribución al inventario de masa (%) de los metales traza analizados en los sedimentos marinos superficiales.

7.10. FUENTES POTENCIALES DE METALES TRAZA

Respecto a la influencia de la contaminación por metales traza en el área de estudio, diversos autores (Muñoz-Barbosa *et al.*, 2004, Villaescusa-Celaya *et al.* 1997, 2000, Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1994) reportan que las altas concentraciones y sitios enriquecidos por metales en la zona se deben principalmente a la descarga de aguas residuales por las PTAR.

Sañudo y Flegal (1991) mencionan que los metales descargados por emisores de aguas residuales en la región de California permanecieron en un área de 132 km alrededor del punto de emisión, y con un promedio de permanencia de 34 días en las aguas superficiales de esta zona. Sin embargo, al calcular los kg por día de Cr, Zn y Hg descargados al medio marino por las PTAR del área de estudio y al realizar el inventario de masas en sedimentos marinos, las descargas de las PTAR serían menores al 10%, por lo que no serían la fuente principal de los metales traza analizados en el área de estudio.

7.10.1. MODELO CONCEPTUAL

En la Figura 15 se muestra un modelo de las fuentes potenciales de metales traza a la zona, así como también los flujos de corriente que se encuentran en la zona basados en lo descrito por Orozco-Borbón *et al.* (2006).

De manera general, podemos decir que la distribución de los metales traza (Cr, Zn y Hg) está siendo dominada por procesos físicos, que generan que las mayores concentraciones de estos metales se encuentren asociadas a las zonas más profundas cercanas a la isobata del 200 m (límite operacional) y por ende, a las partículas grano fino (menor a 63 μm). En el área de estudio, el patrón de

corrientes dominante durante el año es de norte-sur, provocando un transporte advectivo debido a la Corriente de California. Sin embargo, aunque en menor proporción hay periodos preferentemente en verano (duración de días) en donde los vientos de gran escala se debilitan y genera un cambio de dirección de la corriente sur-norte, donde el efluente de Punta Bandera y otros que descargan sobre la zona costera pueden llegar a afectar a sitios ubicados al norte de estos puntos de entrada (comunicación personal Mejía-Trejo, 2021). Este comportamiento sería relevante en la zona norte y centro del área de estudio.

Por otra parte, en la Zona Sur (Bahía Todos Santos) estos metales parecen provenir preferentemente del norte de esta área. Adicionalmente, se observan aportes de metales provenientes del sur, que al ser introducida dentro de la bahía son distribuidos según el patrón de corrientes dominantes en la zona.

No obstante, podemos observar que la distribución de las concentraciones de Zn en los sedimentos superficiales en la zona de estudio parece estar más influenciada por fuentes costeras, que lo que se observa para la distribución de las concentraciones de Cr y Hg.

Algunas de las posibles fuentes que pudieran estar alterando el comportamiento de los metales en área de estudio puede el transporte atmosférico, el cual se intensifica cuando se presentan eventos de viento Santa Ana, que pueden transportar una mayor concentración de partículas provenientes tanto de zonas lejanas como cercanas a la zona de estudio. Aunado a lo anterior, las actividades de la termoeléctricas en la zona centro del área de estudio pudieran estar influenciando en la distribución del Cr y Zn, debido a que son metales asociados a esta actividad, así como por aportes provenientes de los

efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales que introducen estos metales. Finalmente, los eventos de lluvia predominantes en la época invernal en la región, pueden ser una fuente importante de estos metales al introducir gran cantidad de material particulado a través de las escorrentías fluviales debido a que la cobertura vegetal en la zona de estudio es escasa.

Como se esperaba, la zona norte del área de estudio presentó un mayor porcentaje de sitios enriquecidos, que podría estar asociado al impacto antropogénico, ya que en esta zona se localiza la mayor densidad poblacional e industrial de la región.

Cabe señalar que en la zona centro, la plataforma continental es estrecha, observándose que la zona profunda se encuentra más cercana a la costa (Anexo, Figura A1). por lo que la cantidad de material particulado pudiera estar depositándose a mayores profundidades que el límite operacional (200 m) utilizado en el protocolo de muestreo. Adicionalmente, la zona centro presenta un menor desarrollo habitacional e industrial, por lo que el impacto antropogénico es menor al observado en la zona norte y sur. En el Estero se puede observar que el ciclo de mareas favorece a la resuspensión del material particulado en la boca y va decreciendo hacia la cabeza del Estero. Así mismo, podemos observar que en la boca del Estero se presentan las mayores profundidades (aproximadamente 6 m) y alrededor de la cabeza las zonas más someras (aproximadamente 1 m) (Ibarra-Obando *et al.*, 2010).

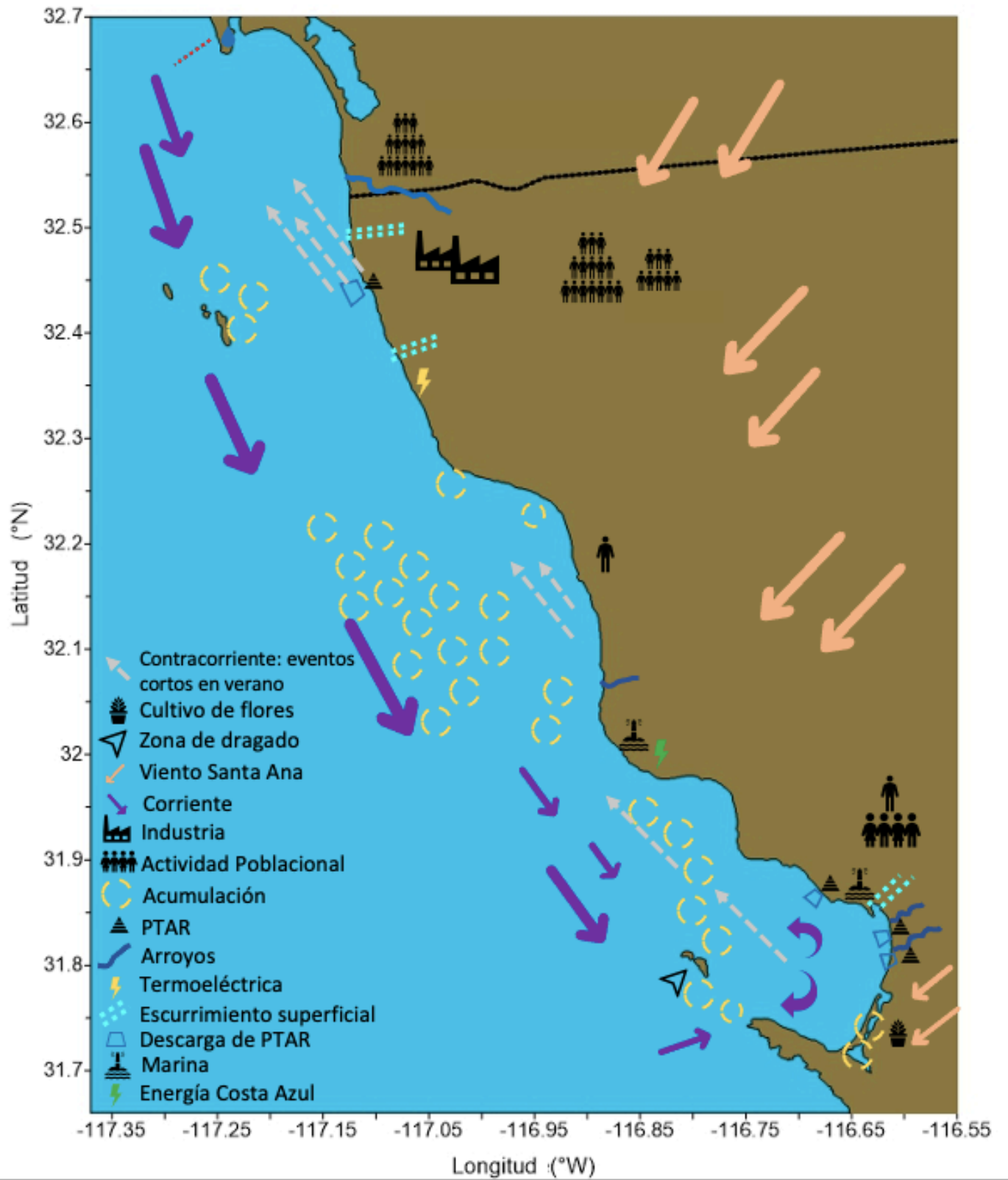


Figura 15. Fuentes potenciales de metales traza al área de estudio

8. CONCLUSIÓN

La distribución de las concentraciones del Cr, Zn parece estar controlado por el patrón de distribución de tamaño de grano. Procesos como las corrientes y mareas son las responsables de su distribución de la distribución de estos metales, a excepción del Zn en el Estero, donde parece que existen otras fuentes que alteran su distribución, teniendo como resultado mayores concentraciones ubicadas en la boca del Estero, una zona de alta energía debido al constante recambio de agua dado por los ciclos de marea.

En el caso del Hg las concentraciones son menores al resto de metales (Cr y Zn), su distribución parece estar controlada por fenómenos relacionados con la productividad biológica, debido a su buena correlación con el porcentaje de carbono orgánico.

Se observó un grado de perturbación importante, ya que se encontraron un alto número de sitios enriquecidos (Cr = 35, Zn = 27, Hg = 12) en el área de estudio, por lo que en la zona existen fuentes que están incorporando estos metales.

A pesar de haber encontrado un gran número de sitios enriquecidos para los tres metales analizados (Cr, Zn y Hg) se observó una baja incidencia de sitios que pudieran tener repercusiones a los organismos expuestos. Únicamente el Cr presentó concentraciones que ocasionalmente podrían representar un riesgo de efectos biológicos adversos para los organismos expuestos (10 de las 97 estaciones).

Finalmente, los aportes de Cr, Zn y Hg provenientes por aportes de aguas residuales tratadas hacia el área de estudio representan una pequeña proporción de la masa total distribuida a lo largo del área de estudio. Por lo tanto, los efluentes de las PTAR no representan el principal aporte de metales traza hacia los sedimentos marinos.

9. REFERENCIAS

- Alvarez-Aguilar A., Rodríguez-Villanueva V., Macías-Zamora J. V., Ramírez-Álvarez N., Hernández-Guzmán F. A. (2017). Spatio-temporal analysis of benthic polychaete community structure in the north-western coast of Baja California, México. *Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom*. 97(5): 993-1005.
- American Public Health Association (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd. edition.
- Bascom W. (1982). The effects of waste disposal on the coastal waters of Southern California. *Environ. Sci. Technol.* 16: 226-236.
- Bakus G. J. (1989). The marine biology of southern California. Univ. So. Calif. Allan Hancock Fdn. Occ. Pap. New Series. 7:1-61.
- Benites-Campo N. (2011). Producción limpia y biorremediación para disminución e la contaminación por cromo en la industria de curtiembres. *Revista del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales. Ambiente y Sostenibilidad*. 1: 25-31.
- Blanco-Hernández A. L., Gutiérrez A., Jiménez-Blas O., Santiago-Guervós M., Miguel-Manzano B. (1998). Estudio de los niveles de plomo, cadmio, zinc y arsénico, en aguas de la provincia de Salamanca. *Rev. Esp. Salud Publica*. 72: 53-65.
- Blesa M. A. y Castro G. (2015). *Historia natural y cultural del mercurio*. 1a ed. Buenos Aires: Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias.

- Bruland-Kenneth W., Bertine K., Koide M., Goldberg-Edward D. (1974). History of Metal Pollution in Southern California Coastal Zone. *Environmental Science & Technology*. 8 (5): 425-432.
- Bruland, K.W., Knauer, G.A., Martin, J.H., 1978. Cadmium in northeast Pacific waters. *Limnol. Oceanogr.* 23:618-625.
- Calmano, W., Hong, J., Forstner, U. (1993). Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science and Technology*. 28: 223-235.
- Carman C.M., Xiang-Doong Li, Gan Z., Onyx W.H., Yok-Sheung Li. (2007). Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China. *Environmental Pollution*. 147: 311-323.
- Casas I. C., Gómez E., Rodríguez L. M., Girón S. L., Mateus J. C. (2015). Hacia un plan nacional para el control de los efectos del mercurio en la salud en Colombia. *Biomedica*. 35 (2): 30-37.
- Cañizares-Villanueva R.O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. 42: 131-143.
- Cervantes-Guerra, Y., Almaguer-Cermenate, Y., Pierra-Conde, A., Orozco-Melgar, G., Hans-Juergen, G. (2011). Metales traza en sedimentos de la Bahía de Cayo Moa (Cuba): evaluación preliminar de la contaminación. *Minería y Geología*. 27(4): 1-19.

- CONAGUA (2021). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvias. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resúmenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- Cuberos E. A., Rodríguez, Prieto E. (2009). Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*. 11(2): 278-289.
- Daesslé L.W., Ramos S.E., Carriquiry J.D., Camacho V.F., (2002). Clay dispersal and the geochemistry of manganese in the northern Gulf of California. *Cont. Shelf Res.* 22: 1311-1323.
- Dailey M.D., Anderson J.W., Reish D.J., Gorsline D.S. (1993). The California Bight: Background and setting. In: Dailey MD, Reish DJ, Anderson JW (eds.), *Ecology of Southern California Bight: A Synthesis and Interpretation*. Univ. California Press, Berkeley. 1–18.
- Dong C., Idica E. Y., McWilliams J. C. (2009). Circulation and multiple-scale variability in the Southern California Bight. *Progress in Oceanography*. 82: 168-190.
- Durán-Arroyo M. M. (2011). Evaluación de los impactos ambientales asociados a la contaminación en agua, suelo y sedimento por cromo y zinc, en los municipios de Tabio y Tenjo - Cundinamarca (Sub. – Cuenca del Río Chicú). (Tesis de Licenciatura). Universidad de la Salle. Facultad de Ingenierías.

- Fergusson J. E. (1990). *The Heavy Elements, Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Editorial: Pergamon Press. Oxford. ISBN: 0608062421.
- Gerrels R.M., Mackenzie F.T., Hunt C. (1975). *Chemical cycles and the global environment: assessing human influences*. Estados Unidos. Editorial W. Kaufmann. ISBN: 0913232297
- Gómez-Valdez, J. (1983). Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 9(2): 75-86.
- Guardia-Peña O., Ustáriz-García C., García-García M. A., Morera-Barrios L. (2011). Algunas aplicaciones clínicas del zinc y su acción sobre el sistema inmune. *Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia*. 27 (3): 367-381.
- Gutiérrez-Galindo E. A., Flores-Muñoz G., Ortega-Lara V., Villaescusa-Celaya J. A. (1994). Heavy metals in coastal sediments of the Baja California (México)-California (USA) border zone. *Ciencias Marinas*, 20(1): 105-124.
- Gutiérrez-Galindo E. A., Villaescusa-Celaya J. A., Arreola-Chimal A. (1999). Bioaccumulation of metals in mussels from four sites of the coastal region of Baja California. *Ciencias Marinas*. 25(4): 557-578.
- Gutiérrez-Galindo E. A., Casas-Beltrán D. A., Muñoz-Barbosa A., Macías-Zamora J. V., Segovia-Zavala J. A., Orozco-Borbón M. V., Daessle L. W. (2007). Spatial distribution and enrichment of mercury in surface sediments off the northwest coast of Baja California, México. *Ciencias Marinas*. 33(4): 473-482.

Gutiérrez-Galindo E. A., Casas-Beltrán D. A., Muñoz-Barbosa A., Daesslé L. W., Segovia-Zavala J.A., Macías-Zamora J. V., Orozco-Borbón M. V. (2008). Distribution of Mercury in Surficial Sediments from Todos Santos Bay, Baja California, México. *Bull Environ. Contam. Toxicol.* 80: 123-127.

Gutiérrez-Galindo E. A., Muñoz-Barbosa A., Mandujano-Velasco M. R., Daesslé L. W., Orozco-Borbón M. V. (2010). Distribution and Enrichment of Silver and Cadmium in Coastal Sediments from Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Bull Environ Contam Toxicol.* 85: 391-396.

Hendricks T.J. y Eganhouse R.P. (1992). Sediment model verification. In: Southern California Coastal Water Research Project, Annual Report. 1990-YI and 1991-92. Long Beach. California. 61-69.

Herrera, J., Rodríguez, J., Coto, J., Salgado, V. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha.* 26(1): 27-36.

Hernández-Guzmán F.A., Macías-Zamora J.V., Ramírez-Alvarez N., Alvarez-Aguilar A., Quezada-Hernandez C., Fonseca A. P. (2017). Treated wastewater effluents as a source of pyrethroids and fipronil at Todos Santos Bay, México: its impact on sediments and organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 36(11): 3057-3064.

Huerta-Díaz M. A., Delgadillo-Hinojosa F., Hernández-Ayón M., Segovia-Zavala J., García-Esquivel Z., López-Zarate H., Siqueiros-Valencia A., Galindo-Bect S. (2008). Diagnosis of trace metal contamination in sediments: The example

- of Ensenada and El Sauzal, two harbors in Baja California, México. *Marine Environmental Research*. 66: 345-358.
- Ibarra-Obando S. E, Poumian-Tapia M., Morzaria-Luna H. (2010). Efectos a largo plazo de la exclusión de las mareas en las especies de la llanura de las marismas en el Estero de Punta Banda, Baja California. *Estuarios y costas*. 33: 753–768.
- IMP (1994). Evaluación de los Efectos en el Ambiente Causados por la Depositación de Sedimentos Dragados de la Dársena de Pajaritos en Coatzacoalcos. Informe Final, EOE-8149. México: 55.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014). Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2014. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/anuario_multi/2013/ags/AEyGAGS13.pdf
- International Zinc Association (2015). Sustainable Development Goals. Disponible en: <https://sustainability.zinc.org/>.
- Kennish M. J. (1998). Pollution Impacts on Marine Biotic Communities. CRC Press LLC, Boca Raton, FL. ISBN: 9780367448073
- Lao W, Tiefenthaler L, Greenstein DJ, Maruya KA, Bay SM, Ritter K, Schiff K. 2012. Pyrethroids in Southern California coastal sediments. *Environ. Toxicol. Chem.* 31:1649–1656.
- Long Edward R., Macdonald Donald D., Smith Sherri L., Calder Fred D. (1995). Incidence of Adverse Biological Effects Within Ranges of Chemical

Concentrations in Marine and Estuarine Sediments. *Environmental Management*. 19: 81-97.

Lynn R.J., Bliss A., Eber L.E. (1982). Vertical and horizontal distribution of seasonal mean temperature, salinity, sigma-t, stability, dynamic height, oxygen and oxygen saturation in the California Current, 1950–1978. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Atlas*. 30: 513–535.

Lynn R. y Bograd S. (2002) Dynamic evolution of the 1997–1999 El Niño–La Niña cycle in the southern California Current system. *Prog Oceanogr*. 54: 59–75.

Martínez G. (2002). Metales pesados en sedimentos superficiales del Golfo de Cariaco, Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela*. 41: 83-96.

Martínez X. G. (2004). El mercurio como contaminante global. (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Química.

Morton B., Blackmore G. (2001). South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 42: 1236-1263.

Muñoz-Barbosa A., Gutiérrez-Galindo E. A., Segovia-Zavala J. A., Delgadillo-Hinojosa F., Sandoval-Salazar G. (2004). Trace metal enrichment in surficial sediments of the northwest coast of Baja California, México. *Marine Pollution Bulletin*. 48: 587-603.

Muñoz-Barbosa A., Gutierrez-Galindo E. A., Daesslé L. W., Orozco-Borbón J. A., Segovia-Zavala J.A. (2012). Relationship between metal enrichments and a biological adverse effects index in sediments from Todos Santos Bay,

- northwest coast of Baja California, México. *Marine Pollution Bulletin*. 64: 405-409.
- Nestlé A. (2013). Usos de complementos de zinc en salud pública. Western Human Nutrition Research Center, University of California. Health Sciences Drive. 62: 31-42.
- Partida-Gutiérrez D. I., Villaescusa J. A., Macías-Zamora J.V, y Castillón F.F. (2003). Contaminantes orgánicos persistentes en núcleos de sedimentos de la región sur de la Cuenca de las Californias. *Ciencias Marinas*. 29(4): 521–534.
- Pérez M., Marín G., Fermín I. (2006). Biodisponibilidad de Metales Traza en Sedimentos Superficiales del Ecosistema Lagunar Costero Bocarpido-Chacopata (Península de Araya, Estado Sucre). *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela, Univ. Oriente*. 45 (2): 81-91.
- Petersen, J.H., Jahn, A.E., Lavenberg, R.J., McGowen, G.E. and Grove, R.S. (1986). Physicalchemical characteristics and zooplankton biomass on the Continental Shelf off Southern California. *CalCOF1 Rep.*, 27: 36-50.
- Peña E.L., Martínez M., Espinoza A.M. (2014). Tratamiento de aguas residuales municipales y su impacto ambiental sobre un ecosistema. *Tecnura*. 5 (9): 37,45.
- Proal N., Bernando J., Martínez L., Mueller M. (1997). Estudio sobre el tratamiento de aguas residuales industriales altamente concentradas en metales pesados bajo aglomeración esférica. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 41(2): 51-56.

- Reynoso H.E. y Jorajuria A. (1988). Distribución de metales pesados en la costa occidental de la Península de Baja California, usando *Mytilus californianus* como organismos centinelas. *Ciencias Marinas* 14(4): 101-116.
- Rooney C.P., Zhao F.J., McGrath S.P. (2006). Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environ. Toxicol. Chem.* 25: 726-732.
- Sadiq, M. (1992) Toxic metal chemistry in marine environments. Editorial Marcel Dekker: 390. ISBN 9780824786472.
- San Diego City (2003). Wastewater Characterization Study City of Ensenada (reporte técnico). Metropolitan Wastewater Department.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A. y Russell-Flegal A. (1991). Trace element distributions in coastal waters along the US-Mexican boundary: relative contributions of natural processes vs. anthropogenic inputs. *Mar. Chem.* 33: 371-392.
- SEMARNAT (2011). Política Nacional de Mares y Costas de México. Recuperado de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/C001776.pdf>
- SEMARNAT (2020). Precipitación media histórica por entidad federativa. Recuperado de: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGU_A01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=#INI.

Schiff, K.C., Weisberg, S.B., (1999). Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environmental Research* 48. p. 161-176.

Schiff, K.C., McLaughlin K., Moore S., Cao Y. (2019). *World Seas: An Environmental Evaluation. Volume I: Europe, The Americas and West Africa.* Editorial: 978-0-12-805068-2

Téllez J., Carvajal R. M., Gaitán A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia.* 52(1): 50-61.

UNEP (2000). *Mining and sustainable development II. Challenges and perspectives.* United Nations Environment Programme. *Industry and Environ.* 23: 95.

UNEP (2021). *Marine Pollution.* Recuperado de: <https://leap.unep.org/knowledge/glossary/marine-pollution>.

Villaescusa-Celaya J. A., Gutiérrez-Galindo E. A., Flores-Muñoz G. (1997). Heavy metals in geochemical sediments fractions of the border region between Baja California, México, and California, USA. *Ciencias Marinas.* 23(1): 43-70.

Villaescusa-Celaya J. A., Gutiérrez-Galindo E. A., Flores-Muñoz G. (2000). Heavy metals in the fine fraction of coastal sediments from Baja California (México) and California (USA). *Environmental Pollution.* 108: 453-462.

Weinberg J. (2007). Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG.

Red Internacional de Eliminación de los contaminantes orgánicos persistente.

Recuperado

de:

https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf

ANEXOS

Tabla A1. Clasificación por estrato latitudinal de las estaciones de sedimentos marinos superficiales muestreadas en el área de estudio.

Estación	Profundidad (m)	Sección
B02	24	Norte
B03	23	Norte
B04	30	Norte
B05	25	Norte
B06	22	Norte
B07	20	Norte
B08	18	Norte
B09	19	Norte
B10	21	Norte
B13	16	Norte
B14	23	Norte
B15	28	Norte
B16	34	Norte
B17	28	Norte
B18	50	Norte
B19	71	Norte
B20	46	Norte
B24	134	Norte
B25	26	Norte
B26	21	Norte
B27	35	Norte
B28	68	Norte
B29	50	Norte
B30	52	Norte
B31	55	Norte
B32	82	Norte
B33	55	Norte
B34	60	Norte
B35	121	Norte
B37	79	Norte
B38	130	Norte
B39	105	Norte
B40	48	Norte
B41	88	Norte
B42	114	Norte
B43	123	Norte
B44	54	Norte
B46	145	Norte
B47	160	Norte
B49	144	Norte
B50	210	Norte
B51	174	Norte
B52	117	Norte

Continua...

Estación	Profundidad (m)	Sección
B53	79	Centro
B54	72	Centro
B55	110	Centro
B56	39	Centro
B57	24	Centro
B58	59	Centro
B59	128	Centro
B60	-	Centro
B61	101	Centro
B62	172	Centro
B63	101	Centro
B65	157	Centro
B66	26	Centro
B67	46	Centro
B68	30	Centro
B69	20	Sur
B70	102	Sur
B71	144	Sur
B73	84	Sur
B74	46	Sur
B78	31	Sur
B81	36	Sur
B83	50	Sur
B84	105	Sur
B86	44	Sur
B88	112	Sur
B91	15	Sur
B92	30	Sur
B93	28	Sur
B94	20	Sur
B95	17	Sur
B96	17	Sur
B97	25	Sur
B98	23	Sur
E03	1.4	Estuario
E04	0.5	Estuario
E07	1.2	Estuario
E08	0.8	Estuario
E09	1.4	Estuario
E10	1.4	Estuario
E11	0.7	Estuario
E14	2.3	Estuario
E15	3	Estuario

Continua...

Estación	Profundidad (m)	Sección
E16	0.7	Estuario
E19	2.7	Estuario
E20	0.4	Estuario
E21	1.5	Estuario
E22	1.8	Estuario
E23	1.3	Estuario
E24	1	Estuario
E25	1.3	Estuario
E26	0.8	Estuario
E27	0.5	Estuario
E29	2.3	Estuario

Tabla A2. Ubicación de las estaciones de los efluentes de aguas residuales tratadas (EART) muestreadas en el área de estudio.

EART	Coordenadas	
	Latitud (°N)	Longitud (°O)
Punta Bandera	32.4465	-117.0940
Planta Y	32.4487	-117.1054
El Sauzal	31.8918	-116.6806
El Gallo	31.8385	-116.6041
El Naranjo	31.8028	-116.5849

EART: Efluentes de aguas residuales tratadas.

Tabla A3. Porcentajes acumulados de tamaño de grano (<4, <16, <40 y <63 μm) presentes en los sedimentos marinos superficiales del área de estudio.

Estación	Fracción			
	<4 μm	<16 μm	<40 μm	<63 μm
B02	3.5	16.8	20.6	20.6
B03	0.00	0.7	0.8	1.5
B04	0.4	4.1	14.7	35.9
B05	17.9	76.8	99.9	100.0
B06	0.1	2.2	5.2	12.6
B07	0.3	2.7	4.8	7.0
B08	0.0	2.0	5.3	14.8
B09	0.6	3.8	5.2	7.1
B10	2.7	11.4	14.4	14.4
B13	0.0	1.2	2.8	7.6
B14	0.1	1.7	2.2	3.4
B15	0.0	0.7	0.7	1.0
B16	1.9	9.3	14.3	16.6
B17	0.1	1.5	2.0	2.6
B18	1.2	8.6	21.1	37.3
B19	0.8	6.7	17.8	40.0
B20	0.0	1.7	3.2	8.2
B24	1.5	11.5	27.3	53.0
B25	0.1	1.9	2.9	4.3
B26	5.1	17.2	24.0	25.4
B27	0.4	4.0	8.1	11.7
B28	0.9	7.9	18.7	30.8
B29	23.5	51.5	67.1	77.0
B30	6.2	24.7	35.2	40.2
B31	1.5	9.3	25.9	54.2
B32	0.7	4.9	10.8	22.3
B33	1.0	7.7	17.5	30.4
B34	0.0	1.7	3.6	10.4
B35	1.5	10.2	22.5	41.5
B37	0.4	4.0	11.2	28.6
B38	0.6	5.4	14.0	35.6
B39	3.7	19.6	37.9	62.0
B40	0.3	2.6	4.8	8.8
B41	1.8	12.6	31.8	56.5
B42	1.5	9.1	20.8	38.8
B43	2.2	11.6	21.9	34.4
B44	1.7	10.1	21.3	33.0
B46	1.1	10.1	24.2	43.1
B47	1.5	13.9	39.8	66.9
B49	3.3	15.0	25.8	34.9
B50	1.6	14.0	44.3	70.4
B51	2.1	17.6	53.0	85.5
B52	3.5	14.3	23.9	32.1

Continua...

Estación	Fracción			
	<4 μm	<16 μm	<40 μm	<63 μm
B53	1.4	11.8	37.2	69.0
B54	1.1	9.8	28.3	53.0
B55	1.0	8.8	21.9	39.8
B56	0.5	5.1	14.0	32.3
B57	0.0	1.0	2.6	7.6
B58	0.7	5.7	16.1	36.2
B59	0.8	7.1	21.3	42.5
B60	0.0	1.2	2.3	3.7
B61	0.9	7.3	16.7	34.3
B62	3.4	20.2	47.1	79.3
B63	0.9	8.0	22.4	40.7
B65	2.4	16.2	38.0	67.0
B66	0.0	0.0	0.3	1.2
B67	0.0	1.7	3.8	8.4
B68	0.0	1.2	2.3	3.7
B69	0.9	6.2	13.4	23.2
B70	1.4	10.2	30.6	61.9
B71	1.0	7.4	18.4	37.9
B73	2.4	14.1	27.1	41.8
B74	10.6	42.6	59.6	60.7
B78	0.8	4.9	8.4	11.8
B81	3.5	19.7	40.2	52.5
B83	1.6	6.5	10.1	11.4
B84	2.5	14.9	31.2	47.1
B86	0.3	3.4	10.7	36.5
B88	0.8	7.5	16.9	30.9
B91	0.1	2.7	5.4	9.9
B92	0.0	1.9	4.3	12.0
B93	0.3	3.4	7.0	13.9
B94	0.6	6.5	13.8	23.2
B95	0.4	5.1	13.5	25.3
B96	0.3	5.2	17.5	31.3
B97	0.1	3.2	10.2	20.9
B98	0.8	8.2	26.8	59.2
E03	8.2	47.7	89.5	99.4
E04	6.4	41.7	75.7	91.9
E07	8.5	43.1	68.5	85.5
E08	6.1	41.7	85.4	98.5
E09	0.0	0.0	0.0	0.1
E10	3.6	19.9	32.4	39.2
E11	4.5	26.3	45.0	53.7
E14	6.4	42.1	77.7	91.0
E15	5.3	36.8	65.4	80.9

Continua...

Estación	Fracción			
	<4 μm	<16 μm	<40 μm	<63 μm
E16	3.4	22.3	41.8	53.4
E19	4.4	26.7	46.1	55.5
E20	5.6	37.4	82.6	98.2
E21	0.0	0.0	0.0	0.0
E22	1.1	8.3	14.5	18.2
E23	3.8	29.1	60.0	74.4
E24	2.8	17.2	32.9	42.4
E25	0.0	0.1	0.1	0.2
E26	3.6	21.2	36.4	44.4
E27	3.2	21.3	41.4	52.9
E29	2.4	16.8	32.1	41.9

Tabla A4. Porcentajes de carbono orgánico presentes en los sedimentos marinos superficiales del área de estudio.

Estación	%CO	Estación	%CO
B02	0.1	B58	1.4
B03	0.1	B59	1.9
B04	0.9	B60	0.4
B05	0.2	B61	1.6
B06	0.4	B62	1.8
B07	0.2	B63	3.0
B08	0.5	B65	1.5
B09	0.2	B66	0.
B10	0.2	B67	0.9
B13	0.2	B68	0.3
B14	0.1	B69	1.0
B15	0.2	B70	2.6
B16	0.2	B71	1.5
B17	0.2	B73	2.1
B18	1.3	B74	1.0
B19	1.7	B78	0.6
B20	0.4	B81	0.6
B24	1.6	B83	1.8
B25	0.2	B84	1.3
B26	1.0	B86	1.0
B27	0.5	B88	2.0
B28	1.2	B91	0.5
B29	1.2	B92	0.6
B30	0.3	B93	0.7
B31	1.5	B94	0.7
B32	0.8	B95	0.9
B33	1.1	B96	0.8
B34	0.5	B97	0.7
B35	2.0	B98	1.4
B37	1.2	E03	2.6
B38	1.3	E04	3.3
B39	2.8	E07	1.1
B40	0.4	E08	1.7
B41	2.1	E09	0.1
B42	1.7	E10	1.1
B43	2.8	E11	1.0
B44	1.3	E14	4.3
B46	1.8	E15	2.5
B47	2.8	E16	1.8
B49	2.5	E19	2.5
B50	3.8	E20	1.9
B51	3.1	E21	0.1
B52	1.8	E22	1.0
B53	1.8	E23	3.5
B54	1.7	E24	1.0
B55	1.8	E25	0.1
B56	0.8	E26	1.7
B57	0.6	E27	1.5
		E29	1.0

%CO: Porcentaje de carbono orgánico.

Tabla A5. Concentraciones de los metales traza Cr, Zn, Hg y %Fe₂O₃ en sedimentos marinos superficiales en el área de estudio.

Estación	Metales Traza			%Fe ₂ O ₃
	Cr (µg/g d.w.)	Zn (µg/g d.w.)	Hg (ng/g d.w.)	
B02	11.0	13.8	2.2	0.5
B03	11.2	13.0	3.1	0.2
B04	25.6	20.6	10.4	1.3
B05	11.7	17.3	1.9	0.5
B06	14.5	12.4	4.3	0.5
B07	12.8	14.2	5.3	0.3
B08	23.4	21.4	3.6	1.4
B09	9.4	14.4	1.5	0.2
B10	10.4	14.8	1.6	0.3
B13	15.0	24.7	2.2	0.5
B14	11.0	17.3	1.8	0.2
B15	10.4	28.4	3.4	0.1
B16	10.8	21.6	3.0	0.2
B17	12.0	28.6	5.3	0.2
B18	30.3	30.5	10.2	1.6
B19	63.9	33.4	21.0	2.5
B20	13.8	32.3	6.1	0.5
B24	40.1	35.0	15.0	2.3
B25	14.1	30.3	2.3	0.4
B26	35.4	35.6	28.7	0.5
B27	15.6	24.0	7.5	0.5
B28	31.3	21.5	9.7	1.6
B29	94.2	36.3	2.3	3.0
B30	15.6	32.4	3.8	1.0
B31	65.9	6.6	12.8	2.4
B32	20.0	33.6	12.3	1.0
B33	31.1	30.3	12.3	1.1
B34	16.1	28.3	7.5	0.6
B35	111.7	19.3	23.2	3.3
B37	33.6	28.7	17.0	1.7
B38	30.0	33.4	10.5	2.2
B39	105.3	61.9	36.0	4.8
B40	10.8	34.3	4.5	0.5
B41	87.6	13.0	18.3	2.7
B42	50.4	40.9	16.7	2.3
B43	117.5	66.0	27.1	4.1
B44	42.5	44.7	12.9	1.3
B46	38.7	40.0	17.6	2.1
B47	67.9	36.4	26.2	3.9
B49	83.8	78.9	12.9	3.1
B50	95.6	14.4	35.0	4.7
B51	82.8	8.8	34.7	4.0
B52	93.0	73.9	10.7	3.9

Continua...

Estación	Metales Traza			%Fe ₂ O ₃
	Cr (µg/g d.w.)	Zn (µg/g d.w.)	Hg (ng/g d.w.)	
B53	50.4	20.2	12.3	3.1
B54	29.3	25.1	11.7	2.9
B55	31.6	23.3	13.5	2.8
B56	16.1	33.8	5.5	1.5
B57	18.0	32.0	3.9	1.2
B58	60.5	16.9	8.6	3.4
B59	75.1	10.6	15.6	4.4
B60	18.3	22.9	2.2	0.8
B61	53.1	20.9	10.2	3.1
B62	48.9	26.1	16.6	2.8
B63	83.7	8.3	16.5	5.9
B65	42.9	33.7	12.5	2.2
B66	15.3	27.8	2.2	0.9
B67	52.5	24.1	3.6	4.1
B68	17.6	25.1	2.6	0.9
B69	24.3	32.8	3.5	1.3
B70	49.1	23.9	16.5	3.4
B71	28.8	38.9	17.5	1.7
B73	47.1	47.1	12.4	2.4
B74	33.5	32.9	2.4	2.7
B78	24.6	32.0	2.2	1.8
B81	9.2	37.2	2.4	1.2
B83	32.1	71.7	45.9	1.0
B84	58.9	27.8	28.2	3.7
B86	31.1	26.3	4.7	2.0
B88	36.0	55.0	25.0	3.2
B91	10.5	32.0	2.7	0.9
B92	13.0	30.3	3.6	1.3
B93	10.8	32.3	4.9	1.1
B94	10.5	32.4	5.4	1.0
B95	12.1	32.8	4.2	1.2
B96	15.5	34.3	4.9	1.6
B97	13.7	29.9	2.9	1.4
B98	21.0	38.3	11.2	2.4
E03	52.4	10.7	14.7	5.6
E04	32.3	20.1	10.9	3.4
E07	17.5	22.2	8.8	2.6
E08	12.7	35.2	5.7	1.7
E09	1.8	34.5	1.7	0.6
E10	12.3	31.4	8.5	2.1
E11	10.9	32.9	9.5	1.9
E14	51.5	8.8	20.4	5.8
E15	32.6	17.6	13.1	4.7

Continua...

Estación	Metales Traza			%Fe ₂ O ₃
	Cr (µg/g d.w.)	Zn (µg/g d.w.)	Hg (ng/g d.w.)	
E16	24.2	27.8	13.2	3.5
E19	28.4	21.9	12.3	4.4
E20	23.0	29.8	13.8	3.4
E21	1.6	32.9	3.4	0.5
E22	9.1	40.9	6.6	1.4
E23	39.5	21.5	19.5	4.5
E24	12.2	29.6	10.0	1.9
E25	1.8	31.7	3.8	0.6
E26	21.4	27.2	13.1	3.3
E27	22.9	29.1	15.1	3.5
E29	12.6	28.4	8.4	1.8
LD	0.2	0.5	3.0	
BL	0.5	0.8	0.0	
%REC	87.5	81.2	99.5	

LD: Limite de detección.

BL: Blanco.

%REC: Porcentaje de recuperación.

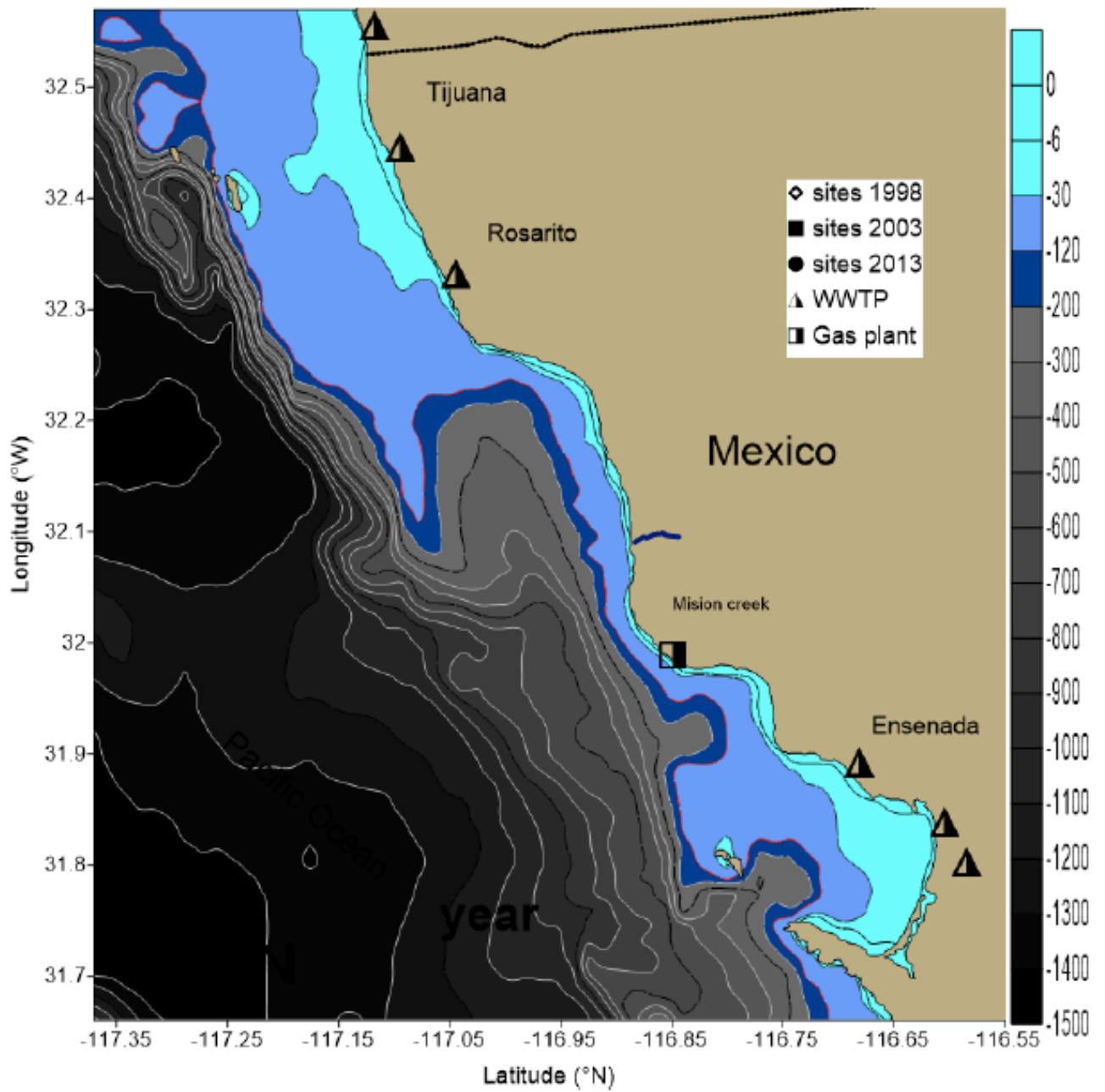


Figura A1. Batimetría de la zona de estudio, realizada con datos satelitales de topografía y gravedad (tomado de: Alvarez-Aguilar, 2017)