

4 RESULTADOS

4.1 Objetivo específico 1 (OE-3)

4.2 Objetivo específico 2 (OE-3)

4.3 Objetivo específico 3 (OE-3)

OE-3. Generar un diagnóstico del estado de condición ambiental de la bahía en las componentes columna de agua, sedimento y biota marina.

A continuación, se presentan los resultados asociados a las tres primeras fases de la Evaluación de Riesgo Ecológico (MMA, 2014), mientras que la cuarta fase se incorpora en el capítulo 4 del presente estudio, asociado a la Cartera de Proyectos. Cabe señalar que antes de la ERE, se efectuó un diagnóstico ambiental de la bahía de Mejillones del Sur, considerando los resultados de la recopilación de información OE-1, y los resultados de las cuatro campañas semestrales de monitoreo (OE-2), donde en este último se han desarrollado ciertos monitoreos adicionales que ha permitido identificar un potencial riesgo en los organismos ligados al lecho marino, y de esta forma mejorar el diagnóstico del estado ambiental de la bahía.

4.3.1 Evaluación de Riesgo Ecológico

4.3.1.1 *Diagnóstico estado ambiental e identificación del problema*

Para proponer un diagnóstico integrado de la bahía de Mejillones del Sur, es necesario recordar la definición del sistema ambiental específico para el área de trabajo. Este considera los criterios de flujos de energía que potencialmente afectan a los ecosistemas; y simultáneamente los flujos de materiales potencialmente contaminantes que ingresan a los ecosistemas (materia orgánica, metales u otros materiales) y que pueden afectar los distintos componentes de la naturaleza. El sistema ambiental se definió con los siguientes componentes: i) Complejo Industrial-Mejillones que realiza las principales actividades de servicios y de producción; ii) Institucionalidad Ambiental, que norma jurídicamente las relaciones de las industrias con el medio ambiente y fiscaliza en su cumplimiento; iii) Población Local incluyendo a sus autoridades y asociaciones de trabajadores y; iv) Ecosistemas Marinos de la bahía Mejillones del Sur.

El diagnóstico del estado ambiental de bahía Mejillones del Sur se evaluó considerando el concepto de "salud del ecosistema", de acuerdo con la definición que propone Costanza et al. (1992), quien define operacionalmente la salud del ecosistema como una medida integral, de multiescala, dinámica y jerárquica de la resiliencia, organización y productividad del sistema. Estos conceptos están incorporados en el término "sostenibilidad", que implica la capacidad del sistema para mantener su estructura y función a lo largo del tiempo frente al estrés externo. Por otra parte, el diagnóstico del estado ambiental también consideró el enfoque práctico abordado por Hyde (2011) para determinar la salud de los ecosistemas asociados a las áreas marinas protegidas (AMP) de América del Norte. El enfoque consideró la transformación de una gran cantidad de información ecológica compleja en una escala cualitativa con enunciados concisos y fáciles de entender.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el diagnóstico ambiental de bahía Mejillones del sur indica que, la ubicación geográfica de la bahía permite la influencia de procesos de gran escala como el sistema de la corriente Humboldt, ENSO, la zona mínima de oxígeno (ZMO), procesos de surgencias, y la relación entre materia orgánica (proveniente de la alta productividad primaria) e hipoxia. Lo anterior confiere a la bahía la característica de un sistema ambiental sensible desde el punto de vista ecosistémico, con especial énfasis en los eventos naturales de surgencia costera, acumulación de nutrientes y materia orgánica,

que se traduce en una presión natural con eventos de bajo contenido de oxígeno. De acuerdo con lo anterior, el sistema ambiental puede ser modificado ecológicamente por factores forzantes naturales como por procesos de flujos de materiales y energía que desarrolla la ciudad, así como por las distintas actividades productivas que se realizan en el borde costero.

De acuerdo con los resultados del presente estudio, el estado actual de la columna de agua, en general indica, que las funciones y procesos del ecosistema pelágico son adecuados para el desarrollo de la biota acuática, y para mantener tanto la diversidad de sus comunidades como su proporción con respecto a las comunidades que históricamente han sido registradas en el área de estudio. En este contexto, es necesario dejar explícito que las concentraciones de metales y metaloides no representan un foco de atención al no sobrepasar ningún límite normativo a nivel internacional en la columna de agua.

Por otra parte, la concentración de oxígeno disuelto sí constituye un indicador prioritario en el diagnóstico, considerando su relación directa con la exposición natural que presenta la bahía a los procesos de surgencia, la dinámica de la ZMO y la alta producción primaria, procesos que modulan eventos de hipoxia en la bahía. Así como también su relación con procesos de descargas líquidas con materia orgánica que realiza la ciudad y las distintas actividades productivas que se desarrollan en el borde costero.

El análisis temporal y espacial del oxígeno disuelto en la columna de agua indica que este parámetro presenta una alta variabilidad espacio - temporal y que, dependiendo de la ubicación espacial, la profundidad en la columna de agua y la hora del día, se pueden generar en la bahía zonas con bajo contenido de oxígeno, generando una condición de hipoxia para los distintos grupos de organismos que habitan la columna de agua. En este contexto, se debe considerar que los grupos de organismos presentan una respuesta diferenciada a las concentraciones de oxígeno, por lo tanto, la condición de hipoxia no se puede generalizar y se debe indicar el grupo de organismos que estarían en una condición de hipoxia.

En este análisis adquieren mayor relevancia los procesos que ocurren entre los veriles de los 0 y 25 m, puesto que es aquí donde confluyen la mayoría de las forzantes naturales (mencionadas anteriormente) y antrópicas que determinan el comportamiento del oxígeno disuelto en la columna de agua. En este contexto, la principal forzante antrópica corresponde a las descargas líquidas que aumentan las tasas de incorporación de materia orgánica a la columna de agua y su posterior decantación en los sedimentos marinos, en zonas donde existe una baja circulación (saco de la bahía). En la columna de agua y en los sedimentos la degradación de esta materia orgánica requiere el consumo de oxígeno, por lo tanto, la magnitud y la ubicación de las descargas determinan a nivel local el comportamiento de este parámetro.

En acuerdo con lo anterior, se analizó la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de las descargas líquidas vertidas en la bahía. Los resultados de este análisis indicaron que el mayor consumo de oxígeno ocurre en el estrato superficial con respecto al fondo y, que el orden decreciente de consumo de oxígeno de las descargas líquidas corresponde a: "Energía" > "instalaciones fabriles varias" > "Ciudad de Mejillones". Por lo tanto, en las zonas de la bahía en donde confluyen las forzantes naturales con las descargas líquidas asociadas a estas actividades productivas, existe una mayor

probabilidad de generar una condición de hipoxia (dependiendo del organismo objetivo) a nivel local.

Con respecto a los sedimentos, es necesario indicar que éstos son el depósito final de las sustancias producidas en las aguas superficiales y de aquellas introducidas al mar por procesos naturales y antrópicos. Dependiendo de las variaciones físicas y químicas del ambiente, los sedimentos pueden actuar como sumidero o fuente de una serie de sustancias que modifican las características naturales de la columna de agua y la trama trófica marina (bentónica principalmente). Entre las variables químicas se encuentra el potencial Redox, el que está directamente relacionado con la cantidad de materia orgánica presente en el sedimento. A mayores concentraciones de materia orgánica, el potencial Redox adquiere valores más negativos (Redox < 0 o condición reductora). Por otra parte, la mayor concentración de materia orgánica en los sedimentos favorece el proceso de incorporación de metales.

El presente estudio determinó la presencia de zonas, acotadas espacialmente, en donde las funciones y procesos del ecosistema bentónico no son adecuados para el desarrollo de la biota acuática. Estas zonas están distribuidas entre los veriles 0 y 25 m a lo largo de la bahía. Lo anterior está relacionado con la concentración de los metales arsénico, cadmio, cromo y el potencial Redox de los sedimentos. En el caso de los metales, el análisis con respecto las referencias internacionales indica que las concentraciones de éstos en los sedimentos marinos frecuentemente provocarían efectos adversos en la biota ($< \text{ISQG} >$ PEL, CCME, 2002). En el caso del potencial Redox, el análisis indicó una condición reductora de los sedimentos y, por lo tanto, poco favorable para el desarrollo de la biota acuática en sectores del saco de la bahía.

En resumen, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, los factores de importancia que han sido identificados en la bahía son:

- Ecosistema naturalmente sensible, debido a los procesos de gran escala que lo dominan, generando acumulación de materia orgánica, nutrientes y consecuentemente provocando eventos de hipoxia,
- Condiciones oceanográficas propias de una bahía con bajas tasas de circulación de agua en su interior,
- Ubicación espacial, características fisicoquímicas y volumen de las descargas líquidas de origen antrópico dentro de la bahía y su relación con el aumento de las tasas de incorporación de materia orgánica y posterior depositación en los sedimentos
- Acumulación de metales y metaloides en el sedimento, tanto de origen natural como antrópico. Proceso favorecido por la acumulación de materia orgánica en los sedimentos.
- Aumento sostenido de la población,
- Aumento de la actividad industrial.
- Ausencia de una normativa ambiental de protección de los ecosistemas de la bahía Mejillones del Sur.

En este contexto y de acuerdo con las actividades antrópicas que se desarrollan en la bahía, éstas justifican una preocupación generalizada y la correspondiente intervención, puesto

que han ocurrido eventos acotados en el tiempo y en el espacio que han contribuido a la disminución de la calidad del agua y sedimentos.

Desde el punto de vista ambiental, es posible indicar que la bahía presenta un estado Deficiente, con tendencia En Deterioro, usando la clasificación indicada por Hyde 2011, para evaluar las condiciones de las áreas marinas protegidas (AMP) de América del Norte. La ocurrencia de condiciones particulares (zona mínima de oxígeno, surgencia costera, alta productividad biológica) con la presencia de condiciones geológicas que hace que los sedimentos marinos presenten concentraciones altas de ciertos elementos (como arsénico y otros metales), conduce a que las descargas líquidas de la industria local adquieran mayor relevancia en la condición de la columna de agua y los sedimentos de la bahía.

4.3.1.1.1 Ecosistema de la bahía Mejillones del Sur

Para proponer un diagnóstico integrado de la bahía de Mejillones del Sur, es necesario recordar la definición del sistema ambiental específico para el área de trabajo. Este considera los criterios de flujos de energía que potencialmente afectan a los ecosistemas; y simultáneamente los flujos de materiales potencialmente contaminantes que ingresan a los ecosistemas (materia orgánica, metales u otros materiales) que pueden afectar los distintos componentes de la naturaleza, esto resulta en un sistema único, que no es repetible, natural para este tipo de sistemas.

El sistema ambiental se definió con los siguientes componentes: i) Complejo Industrial-Mejillones que realiza las principales actividades de servicios y de producción; ii) Institucionalidad Ambiental, que norma jurídicamente las relaciones de las industrias con el medio ambiente y fiscaliza en su cumplimiento; iii) Población Local incluyendo a sus autoridades y asociaciones de trabajadores y; iv) Ecosistemas Marinos de la bahía Mejillones del Sur.

Desde el punto de vista de la bahía existen procesos de gran escala como el sistema de corriente, ENSO, la zona mínima de oxígeno (ZMO), procesos de surgencias, y la relación entre materia orgánica e hipoxia.

La hipoxia afecta de manera diferenciada a los numerosos grupos de organismos. Los datos de oxígeno disuelto observados en diferentes puntos de la bahía, así como en el tiempo, muestran que tiene una alta variabilidad espacial en las tres dimensiones, y puede generar zonas de hipoxia en forma tridimensional en la bahía y así afectar a los distintos grupos de organismos que tienen respuesta diferenciada a las concentraciones de oxígeno. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) se encuentra en valores mayores en las capas superficiales de las aguas de la bahía en contraste con el fondo. El análisis indica que las mayores cargas másicas corresponden al de “Energía” con 2.000 t/ año, seguido por los sectores de “Instalaciones fabriles varias” y “Ciudad de Mejillones”, cada uno de ellos con valores cercanos a las 200 t/año, que pueden afectar a los ecosistemas y organismos, al agregar demanda bioquímica de oxígeno al ecosistema en los niveles de la columna de agua donde se integran las descargas. El análisis de sedimentos reveló la existencia de zonas que presentan valores más negativos de Redox en la cercanía del sector urbano de Mejillones.

Los sedimentos submareales presentaron en invierno concentraciones de arsénico en los puntos MAR-02, MAR-03 y MAR-05 indicando concentraciones que ocasionalmente

provocarían efectos adversos en la biota ($<ISQG > PEL$, CCME, 2002) e inferiores al límite establecido por el MOP para calidad en zonas portuarias, 1994 (Tabla 4-25). Los valores de cadmio presentaron alta variación entre puntos de muestreo. Los puntos MAR-02 y MAR-03 indicaron valores que frecuentemente provocarían efectos adversos en la biota, mientras que los puntos MAR-01 y MAR-04 presentaron valores que ocasionalmente provocan tales efectos (CCME, 2002). Todos estos puntos fueron superiores al límite establecido por el MOP, 1994 (Tabla 4-25). Al igual que el cadmio, el cobre presentó una alta variación entre puntos de muestreo submareales. Las concentraciones variaron entre un valor inferior al límite de detección ($<0,01 \text{ mg/kg}$) y $29,69 \text{ mg/kg}$ en el punto MAR-02. Las concentraciones en los puntos MAR-02 y MAR-03 indicaron valores que ocasionalmente provocarían efectos adversos en la biota ($>ISQG <PEL$, CCME, 2002) (Tabla 4-25). Las concentraciones de cromo estuvieron entre $47,10 \text{ mg/kg}$ en el punto MAR-04 y $65,24 \text{ mg/kg}$ en el punto MAR-06, sin diferencias espaciales definidas entre sectores. Los puntos MAR-02 y MAR-06 indicaron valores que ocasionalmente provocan efectos adversos en la biota ($>ISQG <PEL$, CCME, 2002). A excepción de los puntos MAR-04, MAR-07 y MAR-05 las concentraciones de cromo fueron superiores al límite establecido por el MOP, 1994 (Tabla 4-25).

De acuerdo con lo anterior el sistema ambiental, puede ser modificado ecológicamente por factores forzantes naturales como por los importantes procesos de flujos de materiales y energía que realiza la ciudad, así como por las distintas actividades productivas que se realizan en el borde costero.

Es importante destacar que para el litoral de Antofagasta los sedimentos poseen geológicamente valores más altos de arsénico que en otras zonas del litoral y esto puede verse reflejado en los contenidos naturales de los organismos, especialmente bentónicos. Este aspecto es de importancia en relación con los recursos hidrobiológicos que son consumidos por parte de la población del área.

Los resultados asociados a la cuantificación de emisiones dan cuenta de la existencia de un ingreso constante en términos máxicos de ciertos metales que podrían considerarse como potencialmente contaminantes. Resulta importante señalar que en el emisario de la planta de tratamiento de las aguas servidas no existe información de las concentraciones de agentes metaloides y metales de sus descargas hídricas, lo cual no permite dilucidar si tales descargas estuviesen o no aportando cantidades de agentes potencialmente contaminantes. Además, se ha cuantificado la existencia de un ingreso constante de materia orgánica, traducido indirectamente por cantidades de DBO_5 y SST que son vertidas a la bahía.

El diagnóstico ambiental de bahía de Mejillones del Sur apunta a que es un sistema ambiental sensible desde el punto de vista ecosistémico, con especial énfasis a los eventos naturales de surgencia costera y acumulación de nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere al sistema una presión natural con eventos de bajo contenido de oxígeno.

Desde el punto de vista ambiental, es posible indicar que la bahía presenta un estado Deficiente, con tendencia En Deterioro, usando la clasificación indicada por Hyde 2011, para evaluar las condiciones de las áreas marinas protegidas (AMP) de América del Norte. La ocurrencia de condiciones particulares (zona mínima de oxígeno, surgencia costera, alta productividad biológica) con la presencia de condiciones geológicas que hace que los

sedimentos marinos presenten concentraciones altas de ciertos elementos (como arsénico y otros metales), lo que conduce a que las descargas másicas de la industria local, como de la empresa sanitaria en la bahía, tengan un eventual impacto en las condiciones de los sedimentos y la columna de agua mayor al que es posible encontrar si esas condiciones naturales no existieran.

A continuación, se presenta la Evaluación de Riesgo Ecológico, el cual se liga directamente con el diagnóstico ambiental, que permita identificar el problema, para luego describirlo en detalle dentro de la primera fase y con ello seleccionar indicadores que permitan identificar si el estado de salud actual representa un riesgo para la vida del ecosistema. Las siguientes fases permitieron caracterizar en mayor detalle este problema, caracterizando el riesgo y cuantificarlo (por ejemplo, si el riesgo es bajo, medio o alto).

4.3.1.2 Fase 1: Formulación del problema

Para la definición de las sustancias objetivo o de los agentes potencialmente contaminantes para el ecosistema, se consideró una preselección inicial asociada a las características de la industria en términos de las mayores emisiones hídricas (Integración de la Información). De forma paralela, se realizó un análisis de cómo estas sustancias podrían estar presentes en el medio acuático de la bahía, desde el punto de vista fisicoquímico, abordando procesos de transporte, procesos biológicos, estados químicos, entre otros, que permitieran describir la disponibilidad de estos para ciertos organismos sensibles. Esta misma descripción luego, guarda relación con la identificación de las vías de exposición de estos compuestos con los organismos, en términos de procesos de absorción, contacto, entre otros.

Finalmente, producto de este análisis, se escogieron inicialmente 5 elementos potencialmente contaminantes, los cuales fueron llevados a un Taller de Expertos realizado en la Universidad de Antofagasta, el día 19 de diciembre de 2017, donde se opinó y validó respecto al listado final de agentes que deberían ser analizados en detalle en el presente estudio.

Así, el listado de elementos potencialmente contaminantes validado por los expertos, tanto para el ecosistema como para la salud humana, fue: arsénico, cadmio, cobre, cromo total y hexavalente, mercurio, plomo y zinc; lo que dio un total de 7 agentes (2 adicionales a la propuesta original).

Del mismo modo, se definieron los posibles receptores o afectados, por medio de una consulta a la comunidad de Mejillones y un análisis de los desembarques pesqueros (tanto industriales como artesanales). Con ello se definió un listado de especies prioritarias para el análisis del presente estudio. Este listado tuvo como propósito analizar las concentraciones de sustancias en el tejido de estos organismos, con el objetivo de evidenciar si existe alguna acumulación que pueda significar un riesgo ecológico y a la salud de las personas.

A continuación, se desglosa la formulación del problema en la identificación de los tres aspectos a considerar: identificar el peligro, sus vías de exposición, y sus efectos, los cuales finalmente se integran en el modelo conceptual de riesgo ecológico, como resultado de esta primera fase.

4.3.1.2.1 Identificación del peligro

Se ha considerado la identificación de los agentes potencialmente contaminantes, o elementos que pudieran generar una modificación ecosistémica negativa para la vida. Para la selección de estos agentes, se recurrió a la base de datos de emisiones hídricas del RETC, con lo cual se cuantificaron a nivel global la totalidad de los emisarios, y de este modo cuantificar de forma integrada las cargas másicas que están ingresando a la bahía, anualmente.

Este listado fue llevado al Taller de Expertos realizado en diciembre de 2017, donde se validó finalmente un total de 7 elementos potencialmente contaminantes. Con esto realizado, se hizo una descripción de tales estresores con el objetivo de complementar el conocimiento de estos elementos en el presente estudio.

4.3.1.2.1.1 Cuantificación de emisiones

Para la cuantificación de las emisiones hídricas sobre la bahía de Mejillones del Sur, si bien bajo un primer enfoque se efectuó en el OE1 una sumatoria y promedio de las cargas másicas a nivel global con información del RETC, estos datos no permiten un estudio más detallado de la influencia del sector urbano o industrial, por ejemplo, ni tampoco permite dilucidar en qué lugar podría visibilizarse un mayor impacto de las descargas.

Es por lo anterior que, para un enfoque más detallado, se tomó la información de cada una de las empresas que cuentan con un autocontrol de sus emisiones. Básicamente se tomaron los datos de concentración analizados en el acápite 4.1.1.3.4.2 *Emisiones fijas de aguas residuales*, y con la información de los caudales de cada RIL. Así, se obtienen las cargas másicas asociadas a cada registro. Cabe señalar que se cuenta con información detallada desde el 2011 al 2017 solamente.

Toda la información en términos de concentración y carga másica, además del detalle de los emisarios y la razón social (empresa) a la cual se encuentra asociado cada dato, se ha incorporado en una base de datos sistematizada, disponible en **Anexos digitales, 3_OE3_Diagnostico_ambiental, 6_Cuantificacion_emisiones**.

A continuación, se describen los parámetros seleccionados como prioritarios que fueron arsénico, cadmio, cromo, cromo hexavalente, cobre, mercurio, plomo y zinc. No obstante, también se consideraron como importantes de mencionar y analizar los parámetros DBO₅ y SST, ya que se detectaron niveles de emisión elevados en relación con las actividades o procesos industriales conocidos en el lugar, particularmente en las emisiones del sector energético que presenta niveles elevados en contraste a la industria sanitaria y pesquera.

El procedimiento de cálculo de emisiones por parte de la información recopilada a través de las empresas consta de una estimación de las cargas en base a las reglas de operación en términos de días de operación, y como aproximación, se utilizó un caudal representativo de sus descargas dado que no todas las empresas informaron de sus caudales con la misma periodicidad que sus otros parámetros. Luego, se multiplicó el valor representativo de su caudal por la concentración de cada uno de los parámetros, de tal forma de estimar la carga másica en términos de kg/día o t/día. Finalmente, a modo de análisis, se multiplicó este valor por los días de operación anuales informados, con lo que se estimó la tasa de descarga anual en toneladas, para analizar finalmente, a nivel anual, su descarga total.

De forma paralela, se realizó una sectorización de 10 áreas para evaluar la influencia distribuida de las descargas, tal como muestra la Figura 4.3-1, donde además se ha incluido el caudal promedio en m³ por día de cada emisario. En ella se logra apreciar que 4 de las 10 áreas presentan emisarios.

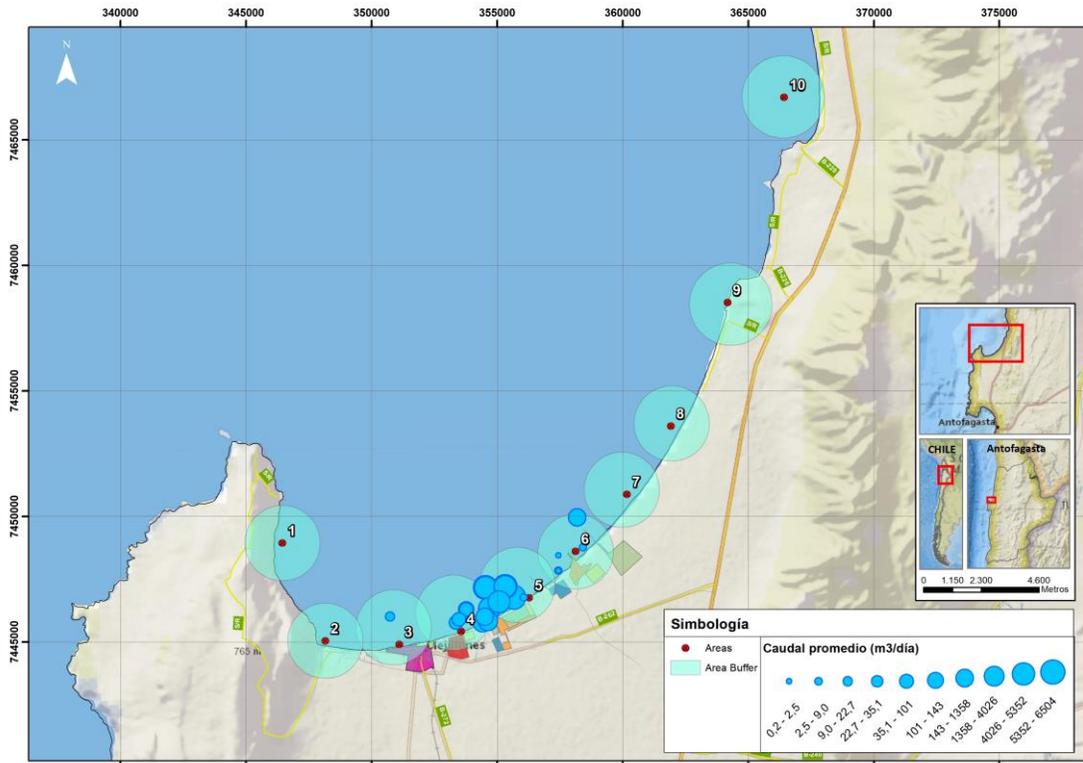


Figura 4.3-1 Distribución de las áreas para el análisis espacial de las descargas hídricas en bahía de Mejillones del Sur, junto al caudal promedio de cada uno de los emisarios.

Estas 10 áreas fueron identificadas mediante la agrupación espacial de toda la información georreferenciada de calidad de columna de agua; sedimentos; descargas de aguas residuales y sensibilidad ambiental. Los sectores 5 al 7 corresponden a zonas con actividad industrial, mientras que los sectores de los extremos 1 a 4 y 9 y 10 corresponden a áreas con menor actividad industrial. El área 8 en cambio representa el sector residencial.

Luego, se realizó la sumatoria a nivel anual por cada área, de modo tal de obtener una representación espacial del comportamiento de las descargas en toda la bahía.

La Figura 4.3-2 muestra el caudal medio anual de descarga por cada área, en escala logarítmica, donde se logra apreciar que el área 5 concentra el mayor volumen de descarga, le siguen las áreas 4 y 6 con un orden de magnitud menor, y el área 3 con dos órdenes de magnitud inferior.

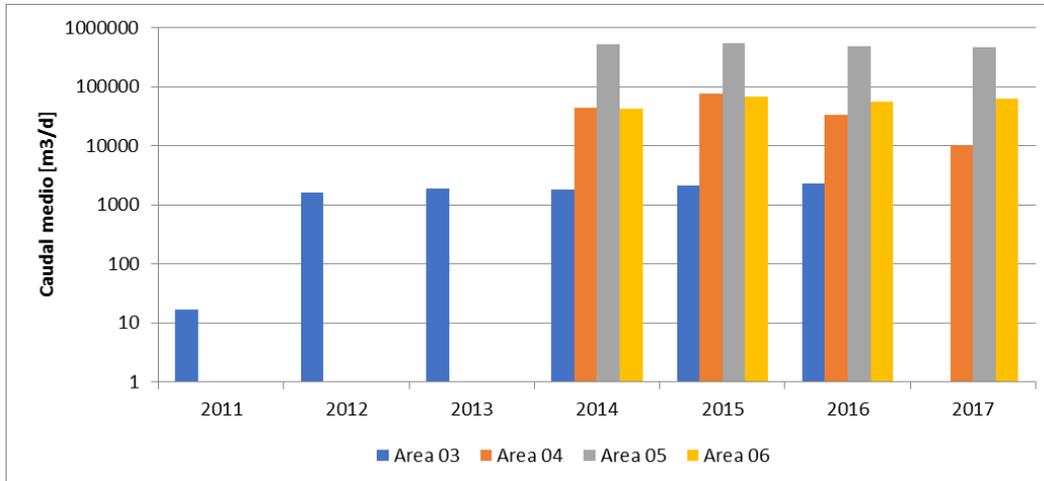


Figura 4.3-2 Caudal medio anual descargado por área.

Considerando los agentes seleccionados en el taller de expertos, las cargas máxicas de estas sustancias se presentan de la Figura 4.3-3 a la Figura 4.3-10. Es importante señalar que en algunas cargas el Área 5 fue graficado sobre el eje secundario, debido a que algunas cargas anuales se escapaban de los órdenes de magnitud de las otras áreas estudiadas.

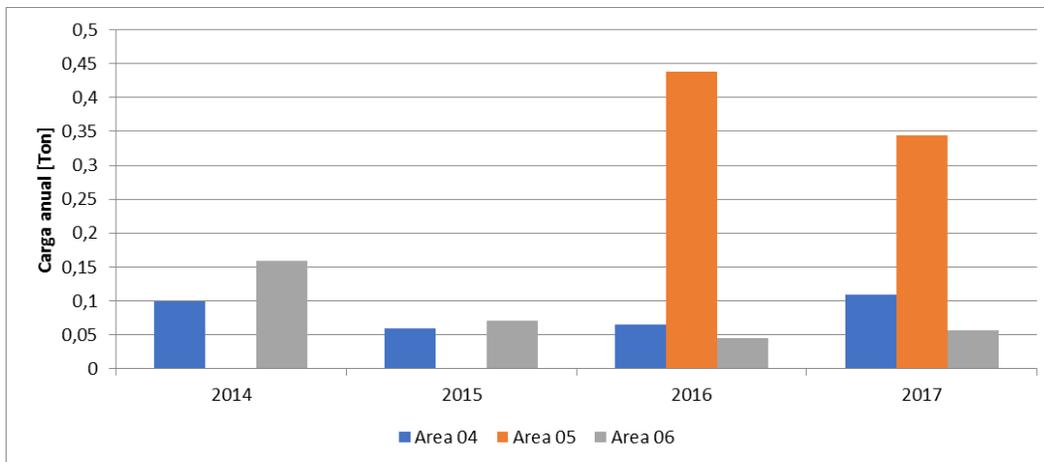


Figura 4.3-3 Ingreso anual de arsénico en bahía de Mejillones del Sur

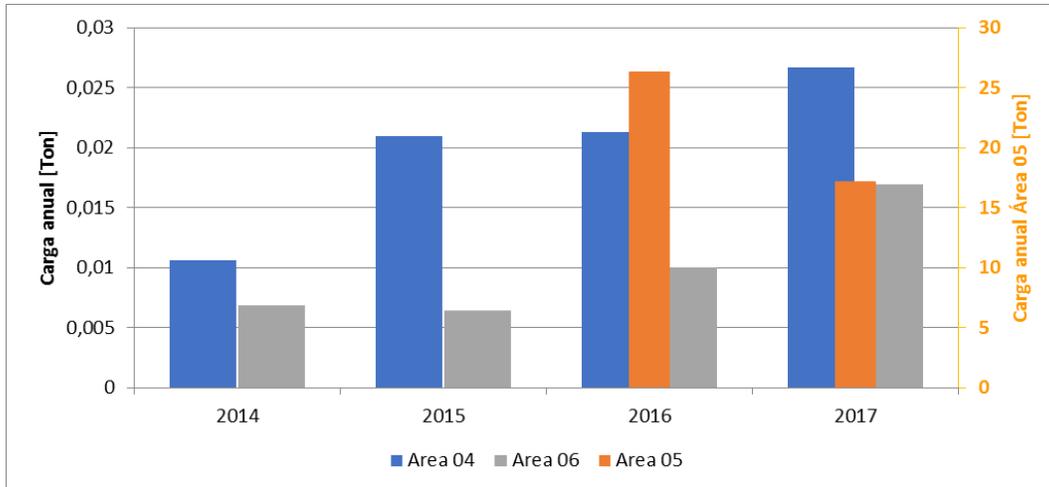


Figura 4.3-4 Ingreso anual de cadmio en bahía de Mejillones del Sur



Figura 4.3-5 Ingreso anual de cobre en bahía de Mejillones del Sur

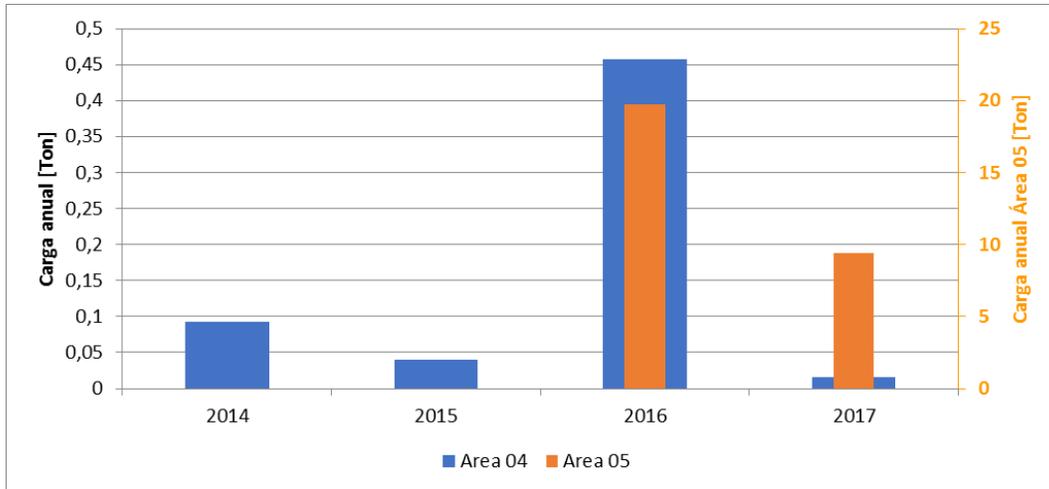


Figura 4.3-6 Ingreso anual de cromo total en bahía de Mejillones del Sur

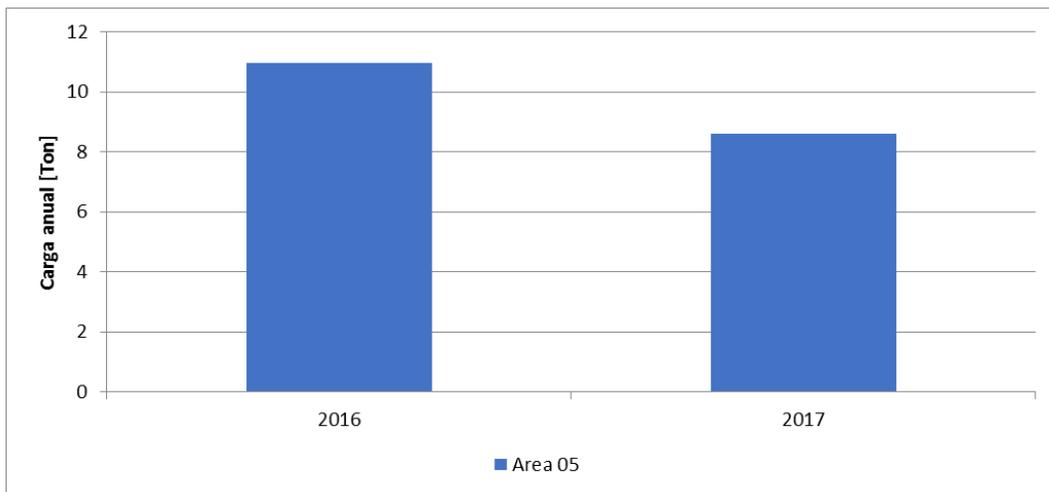


Figura 4.3-7 Ingreso anual de cromo hexavalente en bahía de Mejillones del Sur



Figura 4.3-8 Ingreso anual de mercurio en bahía de Mejillones del Sur

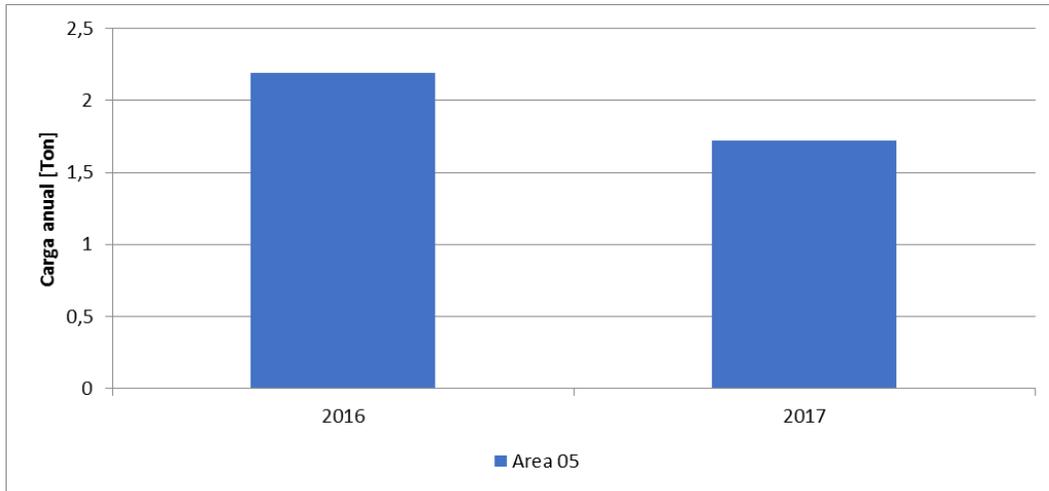


Figura 4.3-9 Ingreso anual de plomo en bahía de Mejillones del Sur

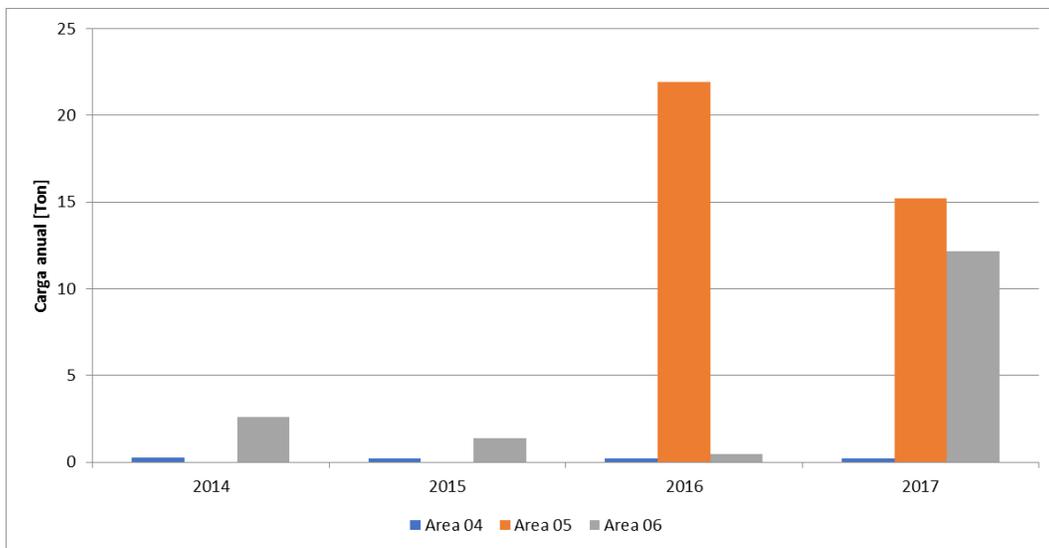


Figura 4.3-10 Ingreso anual de zinc en bahía de Mejillones del Sur

A nivel comparativo, las Figura 4.3-11, Figura 4.3-12 y Figura 4.3-13 muestran cuales agentes se estarían descargando en cada área en mayor cantidad para el área 4, 5 y 6 respectivamente.

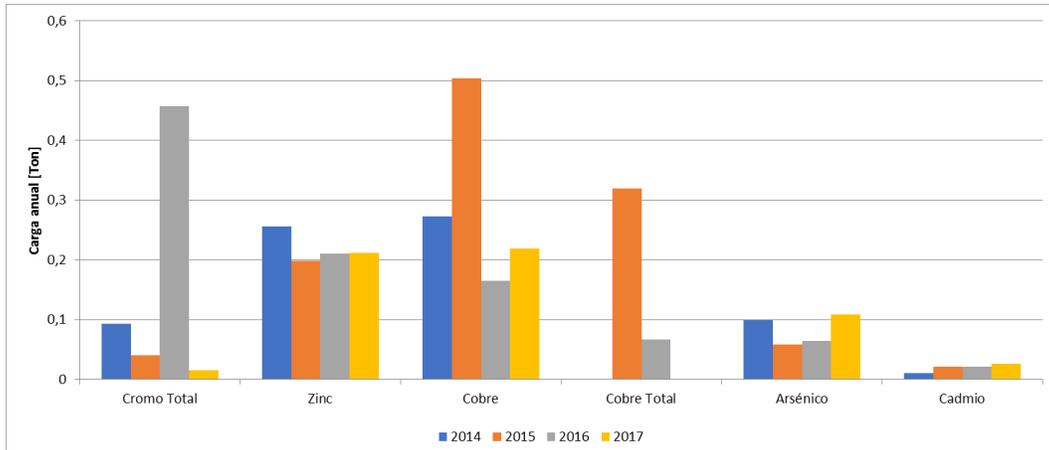


Figura 4.3-11 Ingreso anual de sustancias al área 4, ordenados de mayor a menor según la suma total por año.

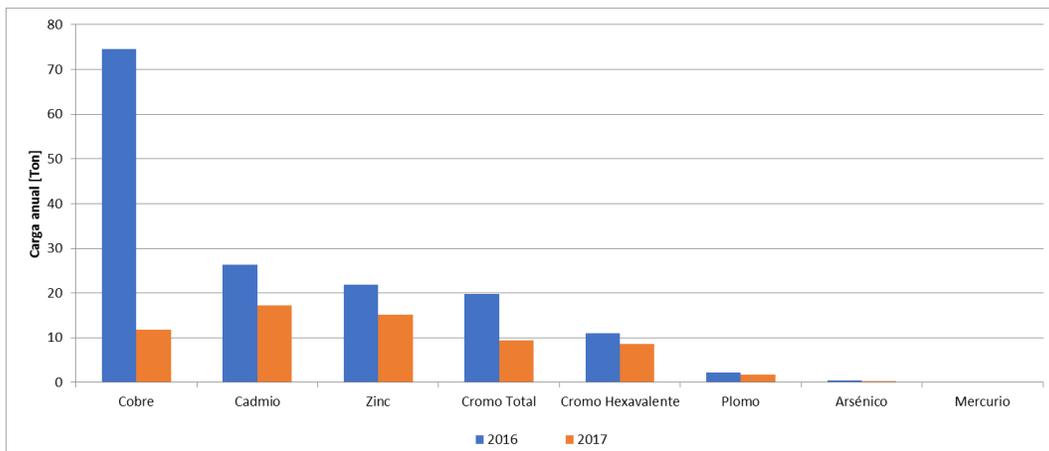


Figura 4.3-12 Ingreso anual de sustancias al área 5, ordenados de mayor a menor según la suma total por año.

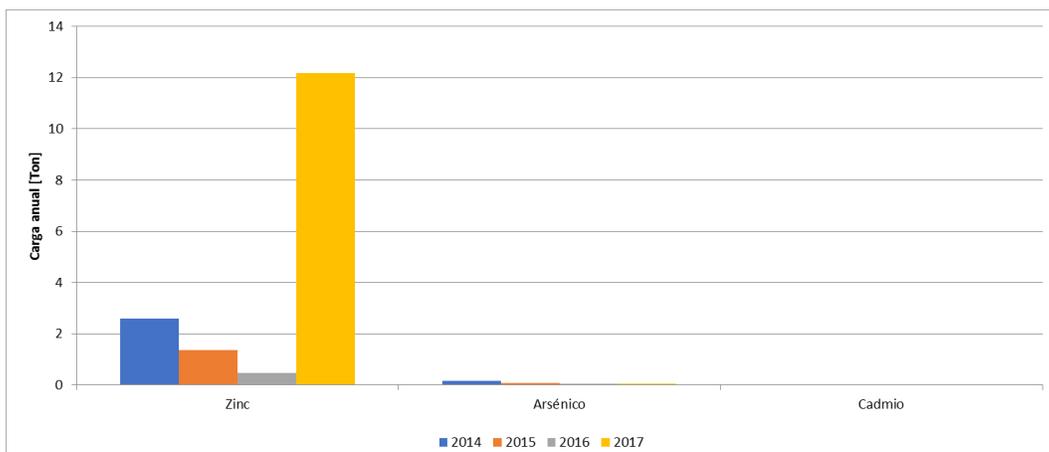


Figura 4.3-13 Ingreso anual de sustancias al área 6, ordenados de mayor a menor según la suma total por año.

Se puede inferir que las áreas 5 y 6 concentran la mayor cantidad de masa de agentes potencialmente contaminantes asociado a metales, con un orden de magnitud superior en contraste al área 4. Sin embargo, el área 6 ha presentado los mayores niveles de zinc. Es importante señalar que en el área 3, donde solo se encuentra el emisario submarino de la industria sanitaria, no existen mediciones de metales por lo cual no es posible analizar este tipo de sustancias. Así, de los elementos metálicos estudiados, resaltarían el cobre, cadmio, zinc, cromo (total y hexavalente), plomo y arsénico.

Desde el punto de vista de la modificación ecosistémica producto de la incorporación de materia orgánica desde las descargas, se ha observado una cantidad apreciable de carga másica de DBO₅ y SST en las descargas. La Figura 4.3-14 y Figura 4.3-15 dan cuenta de las cargas másicas de estos dos parámetros. Se observa que el área 5 tiene el mayor ingreso de DBO₅ y SST, con 2 órdenes de magnitud mayor que las otras áreas, donde fue necesario graficarlo en el eje secundario para que logran visualizarse las demás áreas.

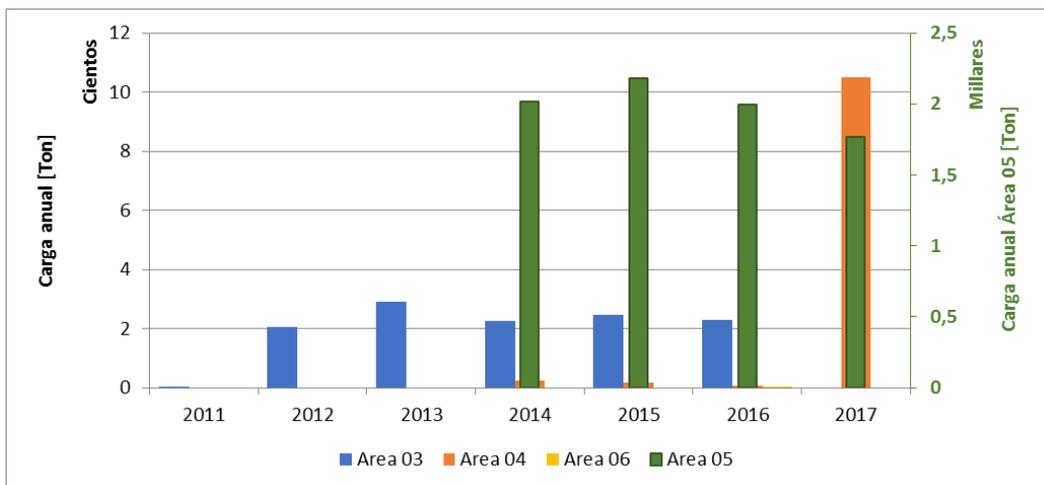


Figura 4.3-14 Ingreso anual de DBO₅ a la bahía de Mejillones del Sur

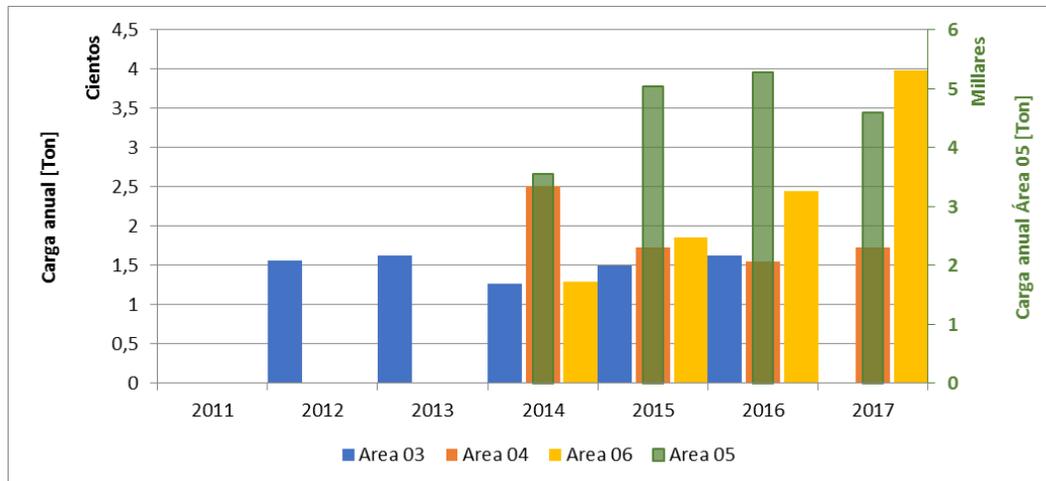


Figura 4.3-15 Ingreso anual de SST a la bahía de Mejillones del Sur

Los resultados anteriores permiten dilucidar que existe un ingreso de carga másica de DBO_5 y SST importante en el Área 5, donde se encuentra gran parte de las descargas asociadas a la industria pesquera y de energía. Por otro lado, resulta interesante comparar que las demás áreas presentan 2 órdenes de magnitud inferior en sus cargas másicas, e incluso 3 órdenes respecto al Área 3.

A continuación, se describen los estresores seleccionados en el Taller de Expertos, desde el punto de vista de su biodisponibilidad y toxicidad, considerando las condiciones ambientales de bahía de Mejillones (Redox, pH, entre otros).

4.3.1.2.1.2 Descripción de estresores

Conocer las concentraciones de los diferentes compuestos químicos, en los distintos compartimentos ambientales, así como su comportamiento en cada uno es clave en el desarrollo de un análisis de riesgo ecológico (van Leeuwen y Vermeire, 2007). Una vez liberado al ambiente, un contaminante experimenta procesos de transporte, inter- e intra-compartimentos ambientales, procesos de bioacumulación, procesos de transformación biótica y abiótica, procesos de biodegradación y biodisponibilidad. Además, las características del ecosistema pueden modificar ampliamente la naturaleza y distribución final del contaminante (US EPA, 1992). Estos procesos determinan la concentración final de un químico en el ambiente y su distribución entre los diferentes compartimentos. Se ha comprobado que la concentración total presente en el medio no es indicativa de efectos adversos o bioacumulación en biota, al contrario, la biota se ve en efecto expuesta solamente a una fracción de la concentración total. Los compuestos químicos encontrados comúnmente en el medio ambiente son moléculas orgánicas neutras, iones libres, complejos de metales con ligandos aniónicos (como hidróxidos, cloruros, sulfato, etc.), y especies adsorbidas en sólidos suspendidos o macromoléculas (como carbono orgánico disuelto).

Así, biodisponibilidad, puede definirse brevemente, como la fracción de químico presente en un compartimento ambiental que, en un periodo de tiempo dado, está disponible para la

absorción por un organismo (van Leeuwen y Vermeire, 2007). Es la forma disuelta libre del contaminante en la interfase de la membrana biológica, la que se transporta a través de ella, mediante procesos pasivos o activos. Los métodos pasivos de transporte a través de la membrana, o difusión, son predominantes en el caso de compuestos orgánicos, como también para algunos metales y compuestos organometálicos. Los metales, por otro lado, son preferentemente transportados a través de la membrana por procesos activos, en los cuales se involucran enzimas específicas (US EPA, 2007).

En el caso de los metales, los valores de coeficientes de partición se ven fuertemente influenciados por las características de las fases acuosas y sólidas, principalmente por el pH, ya que K_p (coeficiente de partición sólido-agua) usualmente decrece, hay más metal disuelto en la fase acuosa, a medida que disminuye el pH. Así, en el caso de los metales, se tiende a considerar la concentración del ion metálico libre para cuantificar la absorción y posibles efectos adversos. Como consecuencia, la biodisponibilidad de los metales y su toxicidad son funciones de la química del agua, la cual determina la especiación del metal. En general, los iones metálicos libres se encuentran en ambientes con valores de pH ácido y potenciales Redox altos (van Leeuwen y Vermeire, 2007; National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005). En resumen, la biodisponibilidad de metales traza depende de factores físicos, químicos y biológicos, los cuales son altamente complejos e interdependientes (Worms *et al.*, 2006). Mientras que las condiciones fisicoquímicas pueden limitar la internalización del metal, los organismos pueden adaptarse. Los metales esenciales son regulados para evitar casos de deficiencia o exceso, mediante diferentes mecanismos dependientes del organismo, el metal y la fisicoquímica del metal en solución.

El pH, es probablemente la variable más importante que influencia el comportamiento de metales en el medio ambiente. Los complejos formados con sulfato, fluoruro, cloruro y fosfato son más estables bajo pH 7, mientras que los complejos de carbonato e hidróxido son más estables a pH alcalino (US EPA, 2007). En cuanto al potencial redox, éste está controlado principalmente por el oxígeno atmosférico y materia orgánica, la cual a su vez controla la adsorción en sólidos suspendidos y sedimentos. La salinidad, es otro factor que afecta la biodisponibilidad de metales, especialmente cuando estos corresponden a descargas que se realizan desde efluentes de agua dulce a sistemas marinos (Hamelink, 1992). Esto se debe a que los metales en agua dulce se encuentran asociados a ciertos ligandos o materia orgánica, los que al entrar en contacto con aguas de alta salinidad sufren un proceso de desorción, seguido de una adsorción a otros iones presentes en el agua marina, como cloruros y sulfatos, habiendo una competición por los sitios de adsorción del metal. Además, los ligandos aniónicos se ven afectados por las mayores concentraciones en el agua de mar de cationes mayoritarios, pudiendo complejarse con estos, apoyando la desorción momentánea de metales traza.

Según los valores de pH (7,6 unidades) y potencial Redox (540 mV) promedio medidos históricamente en la columna de agua de bahía Mejillones, los metales traza se encontrarían principalmente en forma de complejos inorgánicos, los cuales no estarían fácilmente disponibles para la absorción por parte de organismos. Hay que considerar que, en sistemas marinos se encuentra presente una alta concentración de iones cloruro, lo cual implica una mayor complejación de los metales con estos iones, que en sistemas dulceacuícolas (Hamelink, 1992).

En sedimentos, los metales pueden encontrarse en diferentes fracciones (disuelta, intercambiable, carbonato, óxido de hierro-manganeso, orgánica y cristalina), y dependiendo de la fracción en la que se encuentren, muestran diferentes niveles de movilidad (Kastratovic et al., 2013; Nayak, 2015). La fracción biodisponible en sedimentos corresponde principalmente a la fracción intercambiable, la cual consiste en metales enlazados a material coloidal o particulado. Los cambios de temperatura, pH, potencial redox, tipo de sedimento, actividad microbiológica, concentración de ligandos orgánicos, pueden conducir a la liberación de metales desde la fase sólida (Jamshidi-Zanjani y Saeedi, 2015). Así, los metales presentes en complejos con carbonato aumentan su biodisponibilidad si las condiciones son más ácidas, al igual que los presentes en la fase de óxido de hierro-manganeso (Nayak, 2015).

4.3.1.2.1.2.1 Arsénico

De manera específica, el arsénico en la fase acuosa se encuentra principalmente como As(V) en ambientes oxidantes, y As(III) en ambientes reductores. Las formas solubles de arsénico pueden moverse a través de este compartimento durante largas distancias, sin embargo, el arsénico se adsorbe fuertemente en sedimentos (Toxnet, 2018; Sharma y Sohn, 2009). En sistemas con valores de pH ácidos y neutros, As(V) se encuentra predominantemente adsorbido, mientras que As(III), se encuentra débilmente adsorbido. Por otro lado, a altos valores de pH, ambos estados de oxidación presentan poca adsorción en sedimentos. En sistemas marinos, la forma más tóxica de este metal, As(III), se encuentra en fracciones menores al 20% del total (Neff, 1997). En sedimentos oxidantes está primariamente asociado a minerales de hierro, mientras que en ambientes reductores se encuentra en forma de sulfuros precipitados. De acuerdo con las condiciones promedio presentes en bahía Mejillones, el arsénico se encontraría principalmente en las formas $[HAsO_4^{2-}]$ y $[As(OH)_3]$, según el diagrama de Pourbaix respectivo (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005).

4.3.1.2.1.2.2 Cadmio

En el medio ambiente, el cadmio se encuentra como Cd(II), el cual puede encontrarse en numerosas formas químicas, como ion libre, hidratos, complejos inorgánicos y orgánicos y, a su vez, puede encontrarse disuelto, coloidal o particulado (Toxnet, 2018). En aguas dulces principalmente se presentan hidróxidos y carbonatos, mientras que en agua de mar se encuentra como cloruro. Este metal se remueve de la columna de agua mediante adsorción a materia orgánica en sedimentos, precipitación como carbonato, o coprecipitación con óxidos metálicos. Según los valores de pH y potencial redox promedio registrados históricamente en bahía Mejillones, el cadmio estaría presente en el sistema como Cd^{2+} según lo establecido por el diagrama de Pourbaix (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005), sin embargo, éste no considera los iones cloruro presentes en el agua de mar, los cuales formarán complejos con los iones de cadmio formando $CdCl_2$, el cual es menos biodisponible y tóxico que el ion metálico libre. Según Libes (2009), las concentraciones del ion libre con respecto a la concentración total se encontrarían en una razón de 0,027, es decir, predominantemente no biodisponible.

4.3.1.2.1.2.3 Cobre

El cobre, se encuentra en numerosos minerales, como cuprita, tenorita, malaquita, azurita, entre otros. Los compuestos de Cu(II) son altamente solubles e incluyen cloruros, nitratos y sulfatos, mientras que los insolubles son óxidos, hidróxidos, carbonatos y sulfuros (Toxnet, 2018). Los compuestos solubles son fuertemente adsorbidos a sólidos suspendidos, pero este proceso puede disminuir en presencia de materia orgánica, estabilizando el metal en forma de complejos. La mayoría de los compuestos solubles e insolubles se encuentran asociados a sólidos, tienen baja movilidad y no se espera que se volatilicen. Además, no existe evidencia de procesos de biotransformación, que tengan una influencia en el comportamiento general en el medio ambiente. Debido a su condición de nutriente esencial, el cobre es altamente bioacumulado en plantas y animales, sin embargo, no se biomagnifica a lo largo de la cadena trófica. Según los valores promedio de pH y potencial redox registrados en bahía Mejillones, el cobre se encontraría principalmente en las formas de cuprita (CuO_2), Cu metálico y CuCl_2^- , todas ellas no biodisponibles, según el diagrama de Pourbaix para agua marina (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005). Según Libes (2009), las concentraciones del ion libre con respecto a la concentración total se encontrarían en una razón de 0,093, es decir, predominantemente no biodisponible, en forma de carbonatos e hidróxidos.

4.3.1.2.1.2.4 Cromo total y hexavalente

Cuando se descarga en agua, la mayoría de los compuestos de cromo se depositan en sedimentos. La adsorción de compuestos de Cr(III) y Cr(VI) en sólidos suspendidos y sedimentos está altamente influenciada por los cambios en potencial redox que puedan ocurrir (Toxnet, 2018). En ambientes altamente oxidantes existe una mayor proporción de Cr(VI), mientras que en sistemas reductores predomina Cr(III), el cual se encuentra mayoritariamente adsorbido en sólidos suspendidos, compuestos orgánicos y minerales. El potencial de bioacumulación en organismos es bajo, y no existe evidencia de biomagnificación a lo largo de la cadena trófica. Según el diagrama de Pourbaix y bajo las condiciones promedio registradas en bahía Mejillones, el cromo se encontraría como CrO^+ (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005). Según Libes (2009), el cromo en aguas marinas se encuentra como óxidos.

4.3.1.2.1.2.5 Mercurio

El mercurio, se encuentra mayormente en la atmósfera, pudiendo depositarse en la superficie de los cuerpos de agua. Los compuestos inorgánicos de mercurio pueden ser metilados por microorganismos autóctonos de suelos, agua dulce y agua salada, bajo condiciones oxidantes o reductoras, lo cual puede ocurrir en un periodo de 30 a 50 días. No se espera que los compuestos de mercurio se bioconcentren, a no ser que se encuentren como metil-mercurio en el ambiente ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) (Toxnet, 2018). Del diagrama de Pourbaix y las condiciones promedio de bahía Mejillones, el mercurio se encuentra en su forma metálica precipitada, por lo que no se encontraría disponible desde la columna de agua o la fase de agua intersticial del sedimento (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005). Según Libes (2009), las concentraciones del ion libre con respecto a la concentración total se encontrarían en una razón de 6×10^{-5} , es decir, predominantemente no biodisponible.

4.3.1.2.1.2.6 Plomo

El plomo en medio marino proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles, por lo que su transporte principal es deposición de aerosoles en la superficie de la columna de agua. De esta manera, las concentraciones de plomo en la superficie son más elevadas que a mayores profundidades, debido al aporte atmosférico. El plomo es un elemento no-esencial que es tóxico a bajas concentraciones de exposición, es fuertemente bioacumulado, y en algunas especies marinas se han reportado altas concentraciones, especialmente aquellas ubicadas en la parte superior de la cadena trófica (Libes, 2009). En bahía Mejillones, de acuerdo con las condiciones promedio de pH y potencial redox registradas históricamente, el plomo se encontraría principalmente en formas complejadas con cloruro (PbCl_3^- , PbCl_2 , PbCl^+) y carbonato (PbCO_3), de acuerdo con lo estimado por las constantes químicas de formación. Además, a las altas concentraciones de cloruro presentes en el agua de mar, hay una alta concentración de hidróxidos de plomo, $\text{Pb}(\text{OH})^+$, e ion libre, Pb^{2+} (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005; Toxnet, 2018).

4.3.1.2.1.2.7 Zinc

El zinc corresponde a un micronutriente, es decir, que se requieren en bajas concentraciones y tienen un efecto estimulante en la actividad biológica, pero a niveles más elevados pueden tener efectos negativos o incluso resultar tóxicos. Este tipo de metales, han demostrado tener un rol clave en los sistemas enzimáticos. Según las condiciones de pH y potencial redox de bahía Mejillones, el zinc en medio marino se encuentra preferentemente como Zn^{2+} , ZnCO_3 y ZnCl (Libes, 2009; National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005). Además, este metal tiende a coprecipitar con o adsorberse a óxidos de Fe-Mn, y presenta un alto grado de complejación con materia orgánica, la cual varía a lo largo de la columna de agua, dependiendo de los gradientes de materia orgánica disuelta (Libes, 2009).

Para todos estos metales, es importante recalcar, también, que estos resultados no consideran la presencia de materia orgánica, la cual causa efectos variables en la biodisponibilidad de metales (Libes, 2009). Por ejemplo, la toxicidad del cobre puede reducirse gracias a la complejación con materia orgánica, forma no biodisponible para el fitoplancton. Por otro lado, el hierro ve aumentada su biodisponibilidad en presencia de materia orgánica. En el caso del mercurio, la complejación con materia orgánica también aumenta su toxicidad, ya que los compuestos órgano-, metil- y dimetil-mercurio, son mucho más tóxicos que el mercurio en su forma iónica. En el caso del arsénico, los grupos funcionales de algunas moléculas orgánicas pueden afectar la especiación de arsénico mediante reacciones de óxido-reducción, formación de películas de materia orgánica en la superficie, donde el arsénico podría adsorberse, y por último complejación entre componentes de la materia orgánica (Sharma y Sohn, 2009).

Según los resultados encontrados, los metales tienden a acumularse en sedimentos (Gao *et al.*, 2016), los cuales sirven como reservas temporales de contaminantes, y pueden entrar a cadenas alimenticias por distintas rutas, primariamente por la acumulación en organismos bentónicos (US EPA, 2007; Díaz-de-Alba *et al.*, 2016). Estos incluyen organismos que viven total o parcialmente en los sedimentos, o aquellos que se alimentan de la capa superficial de sedimento. Por ejemplo, para algunos organismos, la ingestión de sedimentos puede significar cerca del 100% de su acumulación para ciertos metales, por ejemplo, mercurio en su forma metilada (Gao *et al.*, 2016). Generalmente, la exposición de organismos

bentónicos se asume proporcional a las concentraciones en el agua intersticial, sin embargo, estudios indican que la absorción desde el agua superficial a los sedimentos e ingesta de partículas pueden ser fuentes significativas de metales (Redelstein *et al.*, 2015). Para que las fracciones de metal no disponible en sedimentos cambien de especiación y, por lo tanto, aumente su biodisponibilidad, es necesario que las condiciones de pH y potencial redox se modifiquen, pasando a condiciones de acidez extrema y ambientes altamente oxidantes, con bajos porcentajes de materia orgánica (Nayak, 2015; Hunt y Smith, 1983).

4.3.1.2.2 Identificación de vías de exposición

En una segunda etapa de la formulación del problema, se requiere conocer si estos agentes pueden encontrarse biodisponibles para los organismos marinos, es por ello por lo que se hace una revisión bibliográfica de cómo estos agentes pueden presentarse en el medio acuático, y también cómo se incorporan a los organismos marinos.

Las vías de exposición son importantes para los diferentes grupos de organismos. En bahía Mejillones existen tres medios de exposición generales para los organismos marinos: *absorción* (contacto directo), *ingestión* a través de la malla trófica e *ingestión* a través de las partículas de materia orgánica.

Los ecosistemas acuáticos, están naturalmente expuestos a una variedad de metales cuyas formas químicas y concentraciones se rigen por procesos geoquímicos naturales y actividades antropogénicas. Tales metales pueden ser elementos esenciales necesarios para apoyar los procesos biológicos, o bien no esenciales sin función biológica conocida. Las funciones celulares son fundamentales para los procesos que intervienen en la captación, regulación, utilización y acumulación del metal. La toxicidad de un metal puede ser atribuida a su disfunción y/o a la interacción resultante de metales con estructuras celulares inapropiadas.

Los intentos de discernir patrones generales de respuesta a metales sobre los organismos acuáticos son complejos, debido a la amplia variedad de especies y por la especiación química de los metales, la cual depende de factores fisicoquímicos específicos que prevalecen en el ambiente local, tales como: salinidad, compuestos orgánicos disueltos, pH, dureza y carga sedimentaria, los que influyen en las formas químicas de los metales que prevalecen en los sistemas acuáticos, interviniendo a su vez, en la biodisponibilidad y toxicidad del metal.

4.3.1.2.2.1 Proceso de absorción de metales

La absorción de metales por organismos acuáticos involucra la transferencia del metal al sistema circulatorio, la cual se realiza a través de la barrera epitelial de las branquias, los sistemas digestivos o integumento (Andersen *et al.*, 1994). Los órganos que sirven como sitios de captación son las branquias, el intestino y las glándulas digestivas, allí se tienden a concentrar los metales y, por lo tanto, presentan potenciales de bioacumulación relativamente altos.

4.3.1.2.2.1.1 Absorción epitelial de los metales

La captación de metales esenciales, tales como Ca, Cu, Fe y Zn, a menudo involucra vías específicas que son esenciales para satisfacer las necesidades metabólicas de los organismos. Por ejemplo, los canales de Ca y los portadores de membrana específicos de Fe y Cu (Bobilya *et al.*, 1992) están implicados en la absorción de estos metales. La captación de metales no esenciales que son toxicológicamente importantes, tales como Cd y Hg, no considera mecanismos de captación específicos y parecen comportarse de manera accidental, siguiendo las vías existentes para metales esenciales. El cadmio, por ejemplo, puede atravesar la membrana en su forma iónica y se ha demostrado que es absorbida a través de los canales de Ca en las células de la pituitaria (Hogstrand *et al.*,

1994), hepatocitos de mamíferos (Hinkle *et al.*, 1987), branquias de peces (Luoma, 1996) y crustáceos (Rainbow y Luoma, 2011).

4.3.1.2.2.1.2 Absorción de metales por endocitosis

Es bien sabido que los invertebrados utilizan los mecanismos de endocitosis para la absorción de materiales desde el entorno (Wang y Rainbow, 2005). Los órganos externos, como las branquias, son capaces de fagocitar las partículas desde el ambiente. Metales asociados con partículas han demostrado ser acumulados por mecanismos de endocitosis en varias especies de invertebrados (Wang y Rainbow, 2005). Una vez que los metales son captados por las células mediante endocitosis, se incorporan dentro de las vesículas lisosomales para posteriormente seguir las vías intracelulares (Fowler, 1987). Las vías de absorción en la sangre pueden incluir transferencia de vesículas a las células de la sangre o liberación del contenido de las vesículas directamente al plasma sanguíneo.

4.3.1.2.2.2 Transporte interno de los metales

La entrega de metales a los órganos internos y la posterior redistribución entre los órganos ocurre como resultado del transporte del metal a través del sistema circulatorio (Betzer y Pilson, 1975). Se ha sabido por algún tiempo que las proteínas plasmáticas de vertebrados juegan el papel dominante en el transporte del metal (Scott y Bradwell, 1983). El plasma sanguíneo contiene diversas proteínas que transportan una amplia gama de metales. La unión de ciertos metales a las proteínas plasmáticas pueden ser específicos (por ejemplo, Fe y Cu por la transferrina por ceruloplasmina) o no específica (por ejemplo, Ca, Ni y Zn por albúmina de suero).

En los invertebrados, las células sanguíneas y hemocitos se han considerado tradicionalmente los principales vehículos de transporte para los metales. Muchas células de este tipo poseen una alta movilidad, fagocitan y son capaces de atravesar las capas celulares, pudiendo albergar altas concentraciones de metales (Scott y Bradwell, 1983). Estudios recientes indican que las proteínas del plasma de invertebrados pueden desempeñar un rol mucho más importante en el transporte de los metales. Uno de estos roles es análogo a la situación en los vertebrados, las proteínas plasmáticas de invertebrados se unen a metales (Bebianno y Langston, 1998) y pueden ser responsables para la mayoría del transporte de metales que ocurren el sistema circulatorio de estos organismos.

4.3.1.2.2.3 Excreción del metal

Los organismos acuáticos utilizan una variedad de mecanismos para eliminar metales de sus cuerpos. El proceso general es especie-específico, órgano y tejido específico y metal y ligando específico. En un individuo, la cinética de liberación del metal se espera que sea compleja para reflejar la diversidad de compartimientos desde donde el metal debe ser movilizado. Además, los parámetros físicos y químicos, tales como, temperatura y salinidad pueden afectar la velocidad de liberación en organismos acuáticos (Dahlgaard, 1986). La liberación de los metales puede tardar horas (Cd) (Tjahaja *et al.*, 2012), días (Zn) o semanas (Ni, Cu, Pb) (Zhang *et al.*, 2015), el tiempo estimado depende de la tasa de rotación del metal y el ligando, el cual puede tomar meses, estaciones o años.

La vía renal es la ruta principal para la excreción de una variedad de metales, tales como Co, Cd, Sn, Ni, Cr, Mn, Zn y Cu en los mamíferos (Vinodhini y Narayanan, 2008). Una

segunda vía para la excreción de metales es mediante la eliminación de heces. En los invertebrados acuáticos, los metales pueden ser liberados por la descarga de cuerpos residuales del tejido digestivo. Los cuerpos residuales pueden contener una variedad de metales, incluyendo Ca y Mg, una matriz orgánica y iones fosfato. Estos cuerpos residuales son liberados desde las células de las glándulas digestivas por exocitosis (Petering *et al.*, 1984) y se eliminan como parte de las heces.

Como conclusión, los procesos relacionados con la absorción, transporte y liberación del metal están íntimamente ligados a las condiciones ambientales y las funciones biológicas intrínsecas de los organismos. Estudios, han identificado la importancia de la especiación química de los metales en el control de absorción de los metales y el número de mecanismos biológicos implicados en la regulación del metal y el metabolismo.

4.3.1.2.2.4 Metales de interés ambiental

Según lo señalado por la EPA en la normativa “National Recommended Water Quality Criteria” del año 2009, los metales seleccionados se consideran como metales prioritarios de acuerdo con su toxicidad. Los metales de interés ambiental a describir son los siguientes: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y Zinc (Zn).

4.3.1.2.2.4.1 Arsénico (As)

La toxicidad del arsénico depende de la especiación del metal en el medio. En general, las especies de arsénico inorgánico son más tóxicas que las formas orgánicas para los organismos, incluyendo seres humanos y otros animales vivos (Neff, 1997). La forma del arsénico en el agua depende de Eh, pH, contenido de materia orgánica, sólidos en suspensión, oxígeno disuelto y otras variables (US EPA, 1985). El arsénico en el agua existe principalmente como una especie iónica disuelta; mientras que la fracción particulada representa menos del 1% del arsénico medible total. Este metal puede ser absorbido por ingestión, inhalación, o por medio de penetración de la piel o membranas mucosas. Las células toman el arsénico a través de un sistema de transporte activo que normalmente se utiliza en el transporte del fosfato. Los mecanismos de toxicidad del arsénico difieren mucho entre las especies químicas, aunque todos parecen causar signos similares de intoxicación (Eisler, 1988). Las concentraciones de arsénico en los tejidos de las especies de la biota marina muestran una amplia gama de valores, siendo más alta en lípidos, el hígado y los tejidos musculares, y que varía con la edad del organismo, localización geográfica, y la proximidad a las actividades antropogénicas. En general, los tejidos con alto contenido de lípidos contenían altos niveles de arsénico (Hall *et al.*, 1978).

4.3.1.2.2.4.2 Cadmio (Cd)

El cadmio, se encuentra naturalmente en los depósitos minerales y se distribuye a baja concentración en el medio ambiente. El cadmio entra al medio ambiente de forma natural y por actividades antropogénicas, sin embargo, fuentes humanas, tales como minería y procesos urbanos, son responsables de contribuir aproximadamente el 90% de cadmio sobre las aguas superficiales (US EPA, 2016). El cadmio es un metal no esencial, sin función biológica en la vida acuática (Eisler, 1985). Exposiciones agudas de cadmio causan aumentos en la mortalidad de los organismos acuáticos, mientras que exposiciones crónicas producen efectos adversos sobre el crecimiento, los sistemas de reproducción, inmunológico y endocrino, el desarrollo y el comportamiento de la biota acuática (US EPA, 2016). El cadmio bio-acumula en todos los niveles tróficos, acumulándose en los hígados y

riñones de los peces (Bazzi, 2014). La acumulación de metales en los tejidos de los peces depende de la dosis de exposición y tiempo, así como otros factores tales como la temperatura, la edad de los peces, interacción con otros metales, la química del agua y la actividad metabólica de los peces (Ferrer, 2003). Los crustáceos aparentemente parecen ser más sensibles al cadmio que los peces y moluscos (Joel y Amajuoyi, 2009).

4.3.1.2.2.4.3 Cobre (Cu)

El cobre es un elemento esencial requerido por todos los organismos vivos, pero también puede ser tóxico para las especies acuáticas cuando se presenta en elevadas concentraciones. Los efectos nocivos de los metales pesados resultan de la degradación biológica incompleta, por lo tanto, pueden bio-acumularse en los peces, ya sea, directamente desde el agua que los rodea o por la ingestión de alimentos (Quintaneiro *et al.*, 2015). Asimismo, cuando el cobre alcanza concentraciones suficientemente altas en las células, estas pueden alterar el funcionamiento fisiológico de los peces (Okocha y Adedeji, 2012). Varios autores han demostrado que los peces y crustáceos son de 10 a 100 veces más sensibles a los efectos tóxicos del cobre que los mamíferos, mientras que las algas, especialmente las especies de alga azul-verde son 1000 veces más sensibles a los efectos tóxicos de este metal (Okocha y Adedeji, 2012).

4.3.1.2.2.4.4 Cromo elemental (Cr) y hexavalente (Cr VI)

El cromo puede existir en estados de oxidación desde -2 a +6, pero es más frecuente encontrarlo en el ambiente en estados de oxidación como trivalente (+3) y hexavalente (+6). El cromo hexavalente es más tóxico que la forma +3 debido a que su potencial de oxidación es alto y penetra fácilmente las membranas biológicas (Taylor y Parr, 1978). La toxicidad del cromo sobre la biota acuática es significativamente influenciada por variables abióticas, tales como: dureza, temperatura, pH y salinidad del agua; y los factores biológicos tales como: especies, estado de vida, y las posibles diferencias en la sensibilidad de las poblaciones locales (Zayed y Terry, 2003). De todos los metales, el cromo tiene características toxicológicas únicas, lo que puede deberse tanto a la acción del cromo hexavalente actuando como un agente oxidante o cromo trivalente capaz de formar compuestos orgánicos complejos y, por lo tanto, inducir secreción de moco, erosión de las escamas, decoloración, letargo y natación irregular, además del aumento de la mortalidad en los organismos acuáticos (Kim y Kang, 2016).

4.3.1.2.2.4.5 Mercurio (Hg)

El mercurio y sus compuestos no tienen ninguna función biológica conocida, sin embargo, la presencia del metal en las células de los organismos vivos es potencialmente tóxica. El mercurio puede bioconcentrarse en los organismos y biomagnificarse en las cadenas alimentarias (Eisler, 1988b). La especiación química es una de las variables más importante que influye en la ecotoxicología del mercurio (Storelli y Marcotrigiano, 2002). El metilmercurio es la especie de mercurio más peligrosa debido a su alta estabilidad, su solubilidad en lípidos, y su posesión de propiedades iónicas que llevan a una alta capacidad de penetrar en las membranas de los organismos vivos (Boszke *et al.*, 2002). Para todos los organismos, las primeras etapas de desarrollo son las más sensibles, siendo el metilmercurio la forma inorgánica más tóxica. Numerosos factores biológicos y abióticos modifican la toxicidad de los compuestos del mercurio, sin embargo, los mecanismos de acción aún no son claros. Los signos de intoxicación aguda por mercurio en peces incluyen: la quema de opérculos, aumento de la frecuencia respiratoria, pérdida de equilibrio, y

lentitud. Los signos de intoxicación crónica por mercurio producen emaciación (debido a la pérdida de apetito), lesiones cerebrales, cataratas, disminución de la respuesta a cambios en la intensidad de la luz, incapacidad para capturar el alimento, la coordinación motora anormal, y varios comportamientos erráticos (Eisler, 1988b).

4.3.1.2.2.4.6 Plomo (Pb)

El plomo es un elemento xenobiótico ubicuo, y debido a su uso industrial es uno de los contaminantes más importantes. El plomo es altamente tóxico y su exposición, incluso en bajas concentraciones, puede producir efectos adversos en organismos vivos (Szimanski, 2014; Eisler, 1988c). A nivel molecular, este metal puede alterar o interferir con la actividad de proteínas y ácidos nucleicos, resultando en cambios en el metabolismo celular y fisiología, lo que puede conllevar a estados patológicos. El plomo también puede afectar las funciones de macromoléculas, directa o indirectamente, mediante la inducción de estrés oxidativo, que es la respuesta primaria de la exposición al plomo. En peces, el plomo se acumula principalmente en branquias, hígado, riñón y huesos. En huevos de peces, se observa un aumento de la concentración de plomo a mayores concentraciones de exposición, y hay estudios que han mostrado que el plomo se acumula en la superficie del huevo, pero no en los embriones (UK MPA Centre, 2018). En crustáceos, las concentraciones de plomo son mayores en la concha que en los tejidos blandos, y se relacionan con las concentraciones encontradas en sedimentos.

4.3.1.2.2.4.7 Zinc (Zn)

El zinc es un elemento de importancia para los procesos metabólicos, ya que se trata de un constituyente de proteínas y enzimas en organismos (Jakimska et al., 2011), debido a esto, es fácilmente acumulable en organismos. Varias especies de crustáceos son capaces de regular la incorporación de zinc en su organismo, pero a mayores concentraciones este proceso ya no es efectivo (UK MPA Centre, 2018). Los complejos de zinc y aquellas especies adsorbidas en partículas sólidas presentan una menor toxicidad para animales y plantas, pero pueden ser tóxicos para animales que se alimentan de partículas que contienen zinc (US EPA, 1993).

4.3.1.3 Identificación de los posibles receptores y sus efectos

La última etapa de la fase 1 consiste en identificar los posibles receptores y sus potenciales efectos, no solo a nivel de organismos (especies) sino también a nivel ecosistémico. El uso de esta aproximación se ha centrado principalmente en identificar organismos como receptores de los materiales potencialmente contaminantes. Es conveniente indicar que el principal foco del ERE fueron los químicos tóxicos que entran en los ecosistemas y que en la evaluación se desarrolla sobre las bases del conocimiento existente de las técnicas desde la biología, química ambiental y ecotoxicología (Chen et al. 2013). En nuestro caso, de acuerdo con las sugerencias de Chen hemos incorporado además al análisis de los organismos, la malla trófica de la que forman parte. Para entregar una mejor descripción de los flujos de materiales potencialmente contaminantes en el ecosistema.

La identificación de los posibles receptores, dicho de otro modo, de los posibles organismos afectados, se realizó a través 3 pasos:

Primero se analizaron los principales desembarques pesqueros (tanto industriales como artesanales), el cual se analizó en el capítulo 4.2.

En segundo lugar, se realizó una consulta enfocada principalmente en el conocimiento de los expertos del lugar, incluidos los pescadores y buzos artesanales, donde existe un extenso conocimiento no solo de los organismos, sino también de la historia de bahía Mejillones desde el punto de vista de la localización de recursos marinos, y las contingencias ambientales que han existido.

En tercer lugar, se describen los principales componentes de la malla trófica elaborada en función de los principales grupos funcionales de especies, sustentada por los antecedentes ecológicos existentes y simultáneamente orientada a especies que son parte del consumo humano. Esta decisión demandada por las necesidades expresadas en las bases técnicas por la autoridad implica un enfoque más amplio, general e integrado para satisfacer ambos requerimientos, pero que se traduce en algunas limitaciones, como el número de observaciones o muestras que se pueden obtener. Así, se incluyeron especies que pueden ser bioindicadores de contaminación, especialmente metales.

La estructura de las redes tróficas se determinó mediante una revisión de estudios ecológicos que incluyeran información sobre el contenido estomacal, las estrategias de alimentación y las preferencias de hábitat de las diferentes especies presentes en bahía Mejillones del Sur (Camus and Arancibia 2013, CEA 2017, Chávez et al. 2007, Contreras et al. 2000, Laudien et al. 2007, Palma and Apablaza 2004, Reddin et al. 2015, Rojas 2014, Ulloa et al. 2013, Valdés et al. 2007, Zuñiga 2002, Zuñiga et al. 1983 y Torres and Escribano 2003).

De acuerdo con la aproximación definida, los principales receptores son componentes bióticos de los ecosistemas de la bahía. Para elaborar la malla trófica se considera la revisión de antecedentes indicadas más arriba, y las especies consideradas recursos hidrobiológicos identificados por los pescadores artesanales locales. Las especies fueron organizadas en 6 grupos; Algas, Filtradores, Suspensívoros, Detritívoros, Herbívoros y Carnívoros y en ellos se indican los principales receptores potenciales:

- i) **Algas:** este corresponde a los productores primarios bentónicos como son las macroalgas de los grupos clorófitas, rodófitas, feófitas; entre las que son recursos hidrobiológicos se puede mencionar al huiro y el pelillo.
- ii) **Herbívoros:** en el diagrama de las mallas tróficas se indican erizos y lapas que forman parte de los recursos hidrobiológicos. También está el erizo negro *Tetrapigus niger*.
- iii) **Filtradores:** corresponden a un numeroso grupo de organismos, entre los cuales se han seleccionado los bentónicos como ostión y choro, recursos hidrobiológicos; además se incluyó la especie *Emerita análoga*, que se ha usado como especie bioindicadora para detectar patrones de contaminación con metales pesados.
- iv) **Carnívoros:** existe una variedad de depredadores de los distintos grupos taxonómicos. Se han seleccionado aquellos que son bentónicos y son recursos hidrobiológicos, así hemos seleccionado al pulpo y el loco.
- v) **Detritus:** corresponde a materia orgánica muerta que se encuentra tanto en la columna de agua como en el sedimento en proceso de descomposición, sea

aeróbica o anaeróbica y es una de las fuentes de alimento en modelo de la malla trófica de la bahía Mejillones.

Las relaciones entre los consumidores y las presas son complejas, diversas y existe escasa literatura sobre las preferencias alimenticias de los organismos marinos. En este contexto, para facilitar la comprensión del lector o lectora, la representación gráfica de la red trófica (Figura 4.3-16) corresponde a una representación general que considera explícitamente las preferencias de hábitat de grupos de organismos, el flujo de energía y materiales (metales). Por una parte, los organismos pelágicos, considerando a todos aquellos que habitan en la columna de agua y, por otra parte, los organismos bentónicos, considerando a todos aquellos que habitan en el fondo asociados al sustrato (duro o blando). Mayores detalles pueden ser revisados en Anexos digitales, **3_OE3_Diagnostico_ambiental, Malla_trofica, 2018_06_GOA001_MallaTrófica.xlsx**, en donde se presenta una matriz Consumidor/Presa.

Los posibles receptores identificados (especies seleccionadas) se muestrearon para analizar su tejido y en ellos se determinó la concentración de metales seleccionados en el estudio. Separadamente se realizaron bioensayos estandarizados, con algunos metales. Adicionalmente se incluyó un análisis de exposición a sedimentos extraídos directamente desde la bahía de Mejillones. Este experimento permite evaluar los efectos que imponen los sedimentos como una matriz en la cual se encuentran inmersos los organismos y evaluar su toxicidad integrada.

Por otra parte, la representación gráfica de la red trófica también incluye el flujo de materiales al considerar las especies que fueron objetivo del estudio de la distribución de metales en sus tejidos. De este modo, el sentido de las flechas indica la dirección hacia donde se mueve la energía y/o los materiales (potencialmente contaminantes). Las especies y los metales que son mencionadas en esta representación gráfica corresponden a las seleccionadas en el taller de expertos y que son de interés de la pesca artesanal. Por tal motivo fue utilizado el nombre común en la mayoría de los organismos mencionados.

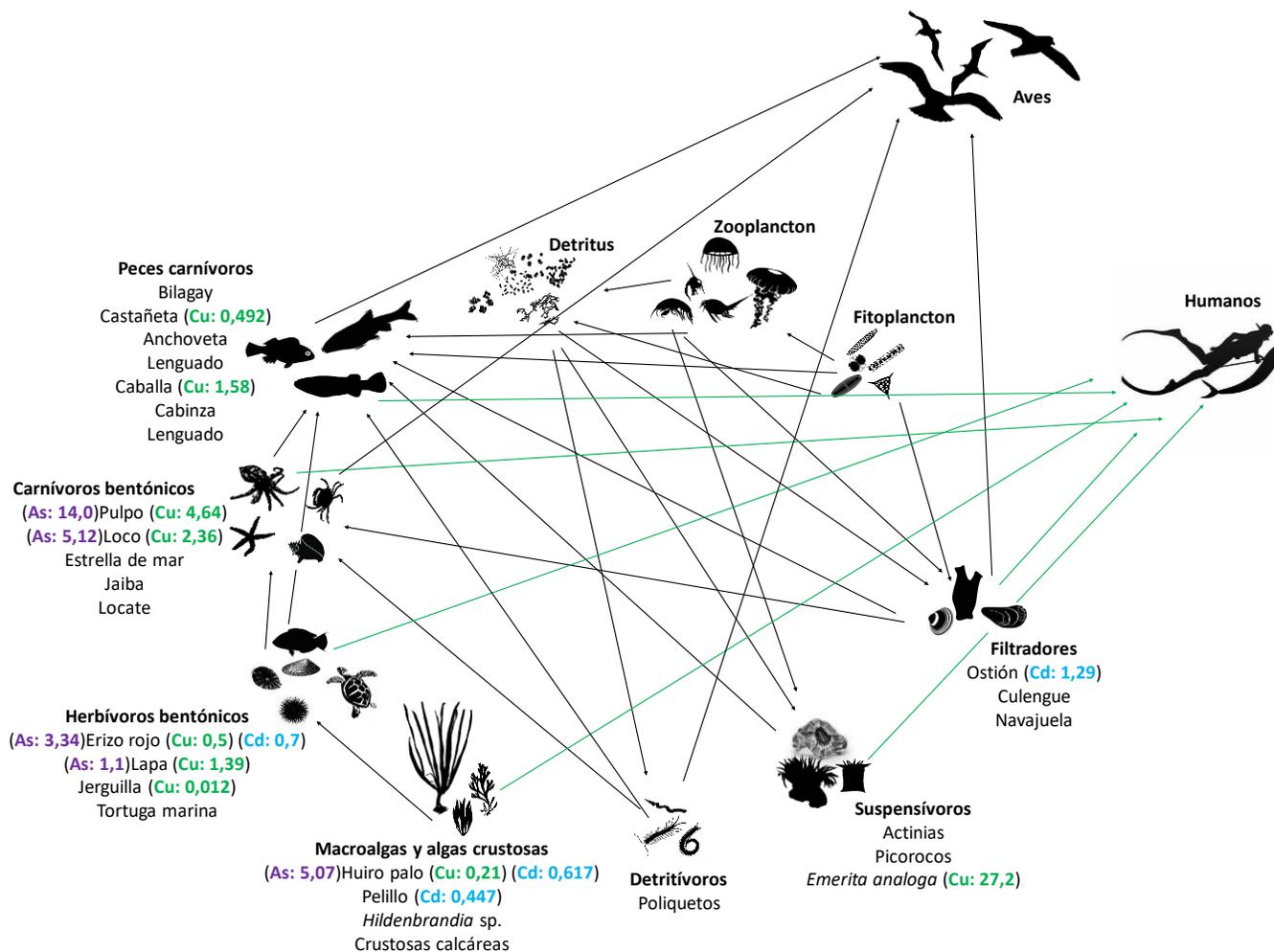


Figura 4.3-16: Malla trófica de la bahía de Mejillones del Sur. En paréntesis se indican las concentraciones de As, Cd y Cu en mg/kg.

La malla trófica muestra la conformación de una parte bentónica, donde se destacan los componentes algas (que incluye los algas verdes, rojas y pardas, indicándose la especie dominante), fitoplancton, zooplancton, detritus, crustáceos bentónicos, otros organismos bentónicos que incluyen poliquetos, filtradores (en este caso se indican las especies más importantes) herbívoros (erizos y fauna herbívora pequeña) carnívoros, y las especies de *Octopus mimus* (pulpo) y *Concholepas* (loco), como los carnívoros que se destacan a nivel específico, considerados como depredadores superiores en el bentos (Figura 4.3-16)

Es de interés destacar que la malla trófica es compleja, que solamente refleja las relaciones de alimentación más importantes, y que como se indicó anteriormente, se elaboró de tal forma que pudiera entregar antecedentes sobre flujos de materiales potencialmente contaminantes hacia la población humana que ocurre en bahía Mejillones. En este contexto, incluye a un grupo importante de los principales organismos que, desde el punto de vista pesquero, se consideran recursos hidrobiológicos, ya que son usados por la población humana.

Con respecto al flujo de materiales y a partir de la distribución de metales en tejidos de organismos de importancia comercial (o recursos hidrobiológicos), se presentan los tres metales más relevantes de acuerdo con la magnitud de las concentraciones en los tejidos y por la relación entre consumidores y presas.

Al respecto, la magnitud del cobre va en aumento desde los productores primarios hacia los carnívoros bentónicos, indicando que el cobre podría estar ingresando a la red trófica a través de las algas (transporte pasivo columna de agua-alga).

El arsénico presentó una concentración creciente desde los herbívoros (Lapa) hacia los depredadores superiores (pulpo). En el caso del cadmio, este presentó la mayor concentración en filtradores (ostión), lo que sugiere que este metal podría estar ingresando a la malla trófica a través del material en suspensión que dichos organismos filtran (ostión).

De acuerdo con lo descrito anteriormente, es muy importante considerar en la interpretación de estos resultados que, durante el estudio en primera instancia, se tomó una decisión en función del alcance acordado con la autoridad. Se priorizó, en primera instancia, realizar mediciones de concentración de metales en un mayor número de especies (generalidad y amplitud) que aumentar la precisión y robustez estadística con menos especies, incorporando réplicas.

En principio entonces, sólo se midió la concentración de metales en un organismo (individuo) para cada una de las especies mencionadas, aunque posteriormente y a la luz de los resultados del estudio de riesgo a la salud, se decidió aumentar el número de muestras para determinados individuos, entre ellos, pejerrey, loco, locate, jaiba, y pulpo (aunque este último no fue encontrado), para fortalecer algunas conclusiones.

El enfoque anterior es considerado como especie-específico, metodología que, si bien permite identificar mediante organismos centinela algún peligro desde el punto de vista de concentraciones, no permite realizar la integración a nivel ecosistémico, donde por ejemplo existen indicadores ambientales de la condición ecosistémica conociendo los niveles de oxígeno disuelto, clorofila, temperatura, entre otros. De forma directa, se ha observado que la DBO₅ y los SST en términos de lo que ingresa a la bahía son elevados en comparación

a otros parámetros, donde estos dos elementos guardan directa relación a la materia orgánica que recibe la bahía y, en consecuencia, se puede inferir que existe una presión desde el punto de vista de consumo de oxígeno.

Este consumo de oxígeno genera una modificación ecosistémica clave que, si bien puede producirse por la Zona Mínima de Oxígeno, resulta determinante el considerar un componente antrópico importante a estudiar en la bahía.

A nivel de literatura, las altas tasas de descarga de materia orgánica se encuentran ligados a un consumo de oxígeno, por lo general en el fondo donde se depositan, en donde el ecosistema se encuentra consumiendo más oxígeno del que genera. Finalmente, esto provoca las llamadas “zonas muertas”, o zonas con concentraciones de oxígeno muy bajo para la sobrevivencia de ciertos organismos sensibles.

Los efectos de esta modificación ecosistémica son variados, entre los cuales se destacan: mortalidad de individuos, efectos en la fecundación e inhibición de esporas, efectos en la adherencia de sustrato, disminución de la biodiversidad y aumento de la abundancia de organismos resistentes, por ejemplo, poliquetos.

El presente estudio ha considerado importante estudiar este componente, por lo cual dentro del monitoreo se consideró de forma adicional el análisis del Redox del fondo marino cercano a la costa, una medición indirecta de la calidad del sedimento. Este punto es abordado en el capítulo 4.2 ligado al monitoreo continuo.

Finalmente, se entrecruzó tal información con las consultas realizadas a los pescadores artesanales, para luego generar un listado de especies prioritarias para el estudio.

La Tabla 4.3-1 muestra el listado de especies informada por los pescadores artesanales de bahía de Mejillones del Sur.

Tabla 4.3-1 Listado de especies mencionadas por los pescadores artesanales, para el análisis asociado al estudio de metales en tejido de biota.

Nombre común	Taxa	Grupo funcional
Caballa	<i>Scomber scombrus</i>	Carnívoro
Cabinza	<i>Isacia conceptionis</i>	Carnívoro
Lenguado	<i>Paralichthys adspersus</i>	Carnívoro
Cabrilla	<i>Paralabrax humeralis</i>	Carnívoro
Lisa	<i>Mugil cephalus</i>	Carnívoro
Bilagay	<i>Cheilodactylus veriegatus</i>	Carnívoro
Baunco	<i>Doydixodon Laevifrons</i>	Carnívoro
Mulata	<i>Graus nigra</i>	Carnívoro
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>	Carnívoro
Pulpo	<i>Octopus mimus</i>	Carnívoro
Jaiba	<i>Cancer sp</i>	Carnívoro
Pejerrey	<i>Odontesthes regia</i>	Carnívoro

Nombre común	Taxa	Grupo funcional
Borrachilla	<i>Scartichthys gigas</i>	Carnívoro
Ostión	<i>Argopecten purpuratus</i>	Filtrador
Choro zapato	<i>Choromytilus chorus</i>	Filtrador
Erizo negro	<i>Tetrapyrgus niger</i>	Herbívoro
Apretador	<i>Chiton sp.</i>	Herbívoro
Pelillo	<i>Gracilaria chilensis</i>	Productor primario
Huiro palo	<i>Lessonia trabeculata</i>	Productor primario

Este listado fue llevado al Taller de Expertos (ver OE-5 Difusión), que incluyó académicos, profesionales del área e instituciones públicas y privadas, de modo tal de validar y/o modificar este listado. La importancia de lo anterior radica en que se tomó la opinión de toda la comunidad, generando una instancia participativa de todos los actores que de forma directa o indirecta guardaban relación con la bahía. En el siguiente acápite se presenta el listado de especies definitivo.

4.3.1.4 Selección de indicadores

Como se mencionó en capítulos anteriores, la selección de indicadores: considerando desde los elementos potencialmente contaminantes, sus vías de exposición y los potenciales receptores, hasta sus efectos, se elaboró un listado de elementos y de organismos, los cuales fueron llevados a un Taller de Expertos realizado en la Universidad de Antofagasta, el 19 de diciembre de 2017. Se contó con la participación de académicos, organismos autónomos y entidades estatales, quienes revisaron, modificaron y validaron los parámetros que finalmente son analizados en detalle en el presente estudio.

De acuerdo con el conocimiento en relación con las toxicidades de ciertos contaminantes, y se decidió por el siguiente listado de contaminantes prioritarios para el estudio: Arsénico, Cadmio, Cromo, Cromo hexavalente, Cobre, Mercurio, Plomo y Zinc. Estos metales fueron utilizados para los análisis posteriores asociados a la Evaluación de Riesgo Ecológico, y la Evaluación de Riesgo a la Salud Humana.

En términos de los organismos seleccionados como indicadores para el estudio de análisis de metales e hidrocarburos en biota, se tomó en consideración el siguiente listado final de organismos.

Tabla 4.3-2 Listado de organismos final como indicadores para el estudio de análisis de metales e hidrocarburos

Organismos seleccionados para análisis de metales en tejido	
Caballa	Erizo negro

Organismos seleccionados para análisis de metales en tejido	
Cabinza	Apretador
Lenguado	Pelillo
Cabrilla	Huiro palo
Lisa	Navajuela
Bilagay	Pulga de mar
Baunco	Anchoveta
Mulata	Lapa
Loco	Almeja
Pulpo	Castañeta
Jaiba	Culengue
Pejerrey	Jerguilla
Borrachilla	Locate
Ostión	Erizo rojo
Choro zapato	

4.3.1.5 Modelo conceptual de riesgo ecológico

En base a toda la información existente del ecosistema, considerando no solo la concentración ambiental existente, sino también los vertidos líquidos tanto de la industria como de la población (emisario de la industria sanitaria), más los alcances en la identificación de las fuentes, vías de exposición y posibles receptores, se ha confeccionado un modelo conceptual de riesgo ecológico para el ecosistema de bahía de Mejillones del Sur.

A su vez, se ha determinado que este sistema se encuentra ya presionado ambientalmente de forma natural, lo cual permite inferir que es un ecosistema sensible, donde las tasas de recuperación en cuanto a la oxigenación de la bahía o degradación de materia orgánica son mucho más limitados en comparación a otras bahías de Chile, por lo tanto, es de esperar que las presiones humanas, cuantitativamente si bien podrían ser bajas, estas ya podrían generar un impacto negativo al medio ambiente. De lo anterior es importante señalar que no se evidenció que la matriz de la columna de agua presente condiciones de concentración de sustancias que representen un riesgo para los organismos que actualmente viven en el sector, sin embargo, ciertas contingencias ambientales de corto plazo no pueden visibilizarse con la información existente, dado que estos eventos son en el corto plazo y ameritan un estudio de fondo en particular.

Por otro lado, existe una porción que se deposita en los sedimentos, existiendo efectivamente una acumulación de sustancias los cuales podrían ser un peligro desde el punto de vista de organismos bentónicos, donde elementos como metales se estarían fijando a la materia orgánica, traduciéndose en un sumidero de sustancias potencialmente peligrosas. Los resultados del monitoreo actual realizado en el sedimento así lo indican, donde existe un cierto porcentaje que supera las normativas nacionales e internacionales comparadas.

Dentro de las fuentes principales, se ha detectado que las emisiones fijas estarían generando una incorporación importante de material orgánico, principalmente desde las centrales termoeléctricas (alta carga de DBO), lo cual incorpora una carga másica considerable e inclusive mucho mayor que la industria sanitaria, por lo que se debe poner especial atención en las cargas másicas de materia orgánica, pues si bien se sabe que sus procesos internos no generan estas sustancias, el origen de esta puede provenir de sus captaciones, generando una transformación de materia orgánica viva a muerta.

El modelo conceptual de riesgo ecológico define la hipótesis de riesgo que se intenta responder en el presente estudio. A su vez se hizo hincapié en considerar no solo agentes contaminantes, sino que observar ciertos procesos ecosistémicos que pudieran generar una alteración. Lo anterior permitió adelantar ciertos resultados que guardan relación a corroborar la hipótesis fundada en este estudio, donde es importante señalar que, si bien el ERE es un proceso secuencial, la recopilación de información es un proceso iterativo.

De esta forma, el modelo de ERE de bahía Mejillones del Sur ha sido simplificado según las fuentes de sustancias que alteran los procesos ecosistémicos (tanto de origen natural como antrópico), en base a un primer modelo que define la fuente terciaria de contaminante: materia orgánica rica en metales.

Un segundo modelo muestra la evaluación del riesgo enfocado a las alteraciones identificadas

Fuente primaria: corresponde a los emisores fijos o difusos identificados en el presente estudio. Estos corresponden principalmente a la industria localizada en bahía de Mejillones del sur, incluyendo la empresa sanitaria.

Mecanismo de liberación: se mencionan los mecanismos físicos de liberación de estos contaminantes hacia algún medio o, en este caso, hacia una fuente secundaria.

Fuente secundaria: corresponden a algún medio físico que transporta los agentes contaminantes a otro medio físico, siendo en este caso liberados en el sedimento superficial marino.

Agente liberado: La ERE del presente estudio ha considerado 7 metales como sustancias potencialmente contaminantes. Adicionalmente, se consideró la emisión de materia orgánica ya que los metales por sí solos, según los niveles encontrados en el agua, no serían un riesgo, no así los metales que quedan retenidos en la materia orgánica depositada en el sedimento. Es por este motivo que han sido mencionados dos agentes liberados, siendo su combinación el real problema encontrado. Así, se menciona como un complemento a la hipótesis de riesgo, la modificación ecosistémica producto de la incorporación de materia orgánica.

Fuente terciaria: en base a la hipótesis anterior, la materia orgánica actúa como un sumidero de metales, traduciéndose en una fuente terciaria de los contaminantes. De la cual se analiza el medio físico contaminado y las vías de exposición identificadas en el estudio.

Medio físico afectado: teóricamente el medio físico a ser contaminado son las aguas marinas de bahía de Mejillones del Sur. Sin embargo, los niveles encontrados son bajos lo cual hace suponer que los procesos hidrodinámicos de circulación conllevan a una dilución o renovación de agua son adecuados para que no exista una acumulación en ese medio. Esto no ocurre comúnmente en el sedimento, donde la materia orgánica queda depositada, más aún a los procesos naturales que ocurren en Mejillones donde existe una incorporación importante debido a los procesos de surgencia. Esto sumado a la materia orgánica que es descargada por la industria a través de emisiones fijas, la materia orgánica localizada en ciertos puntos puede ser mayor, generando cambios en las características fisicoquímicas del agua, como por ejemplo el potencial Redox.

Vías de exposición: las vías de exposición identificadas son principalmente las asociadas a los procesos de digestión y contacto de organismos ante el sedimento con metales. Particularmente organismos sensibles pueden verse perjudicados, mientras que otros adaptados a cargas de estos contaminantes logran bioconcentrar en su interior cantidades de metales que para organismos mayores podría traducirse en bioacumulación.

Potenciales afectados: los potenciales receptores o afectados se reducen a los organismos bentónicos que conviven con la materia orgánica, pero también en base a la malla trófica pueden verse perturbadas ciertas comunidades que se alimentan de

organismos bentónicos, o inclusive de organismos pelágicos que se alimentan de materia orgánica muerta.

Potenciales efectos: los potenciales efectos que hipotéticamente pueden asociarse a los elementos anteriores, desde el punto de vista de modificaciones ecosistémicas, corresponden a acumulación de componentes tóxicos en el sedimento que puedan generar, dependiendo de las condiciones Redox, la biodisponibilidad de sustancias tóxicas en función de su concentración, hacia los propios organismos.

Por otro lado, también se ha considerado como modificación ecosistémica el aumento de ocurrencia de Bloom de microalgas producto de mayor cantidad de nutrientes (derivados de la materia orgánica), mortalidad de organismos sensibles ligados al sedimento (reducción crítica del oxígeno disuelto), desplazamiento de organismos con mayor movilidad (zonas en la bahía que no son aptas para la vida, organismos con mayor movilidad pueden desplazarse), mayor demanda bioquímica de oxígeno (debido a que el sistema no es capaz de producir el mismo oxígeno que produce. Este último efecto se encuentra netamente ligado a los anteriores.

A continuación se presenta el modelo (esquema lineal) del riesgo ecológico del estudio enfocado a la modificación ecosistémica (ver Figura 4.3-17), como también se presenta un segundo esquema de riesgo ecológico, enfocado a considerar las alteraciones identificadas de mayor relevancia en los procesos de la bahía, bajo un esquema clásico del ERE de **fFuente->vías de exposición->efectos** (ver Figura 4.3-18)

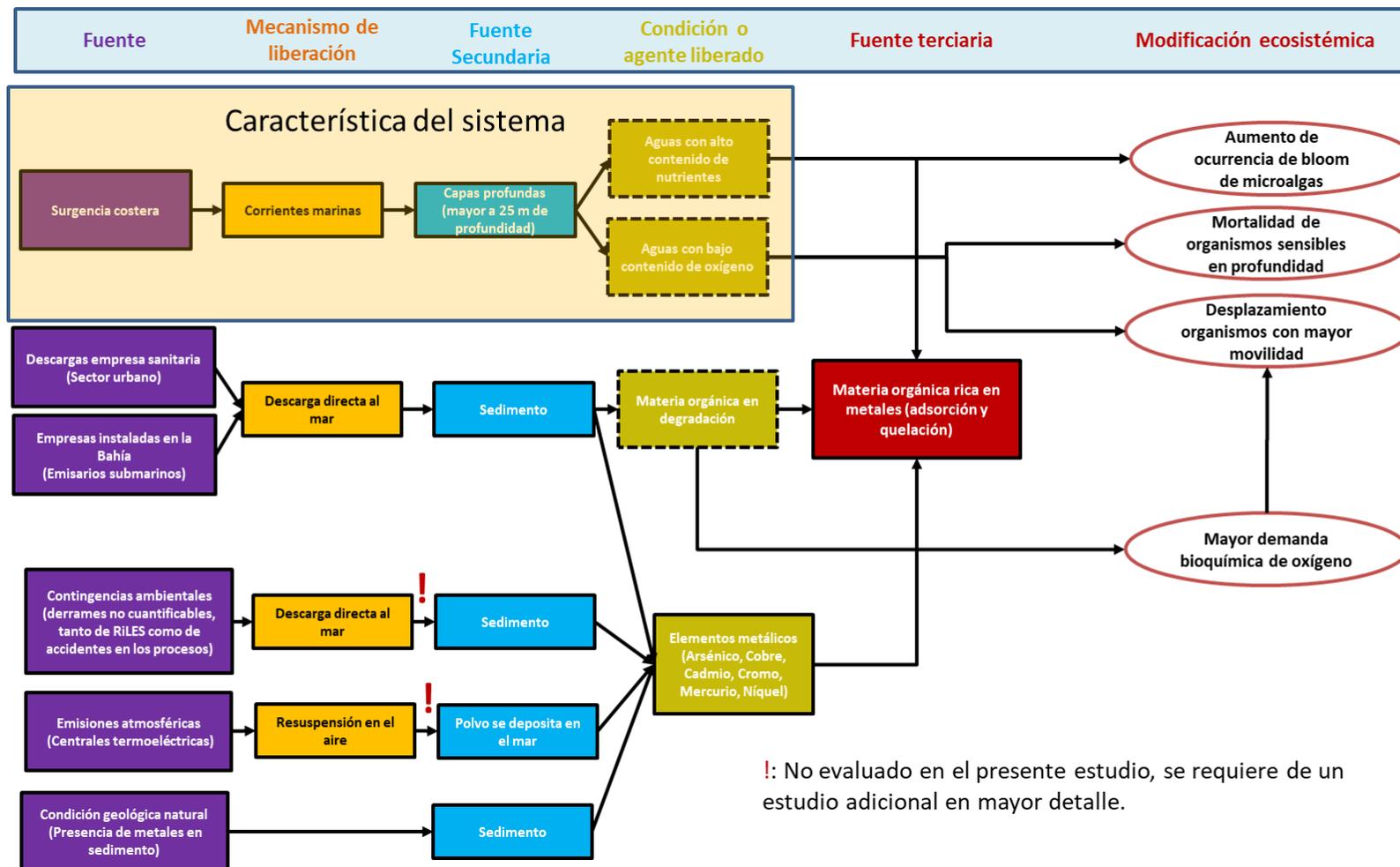
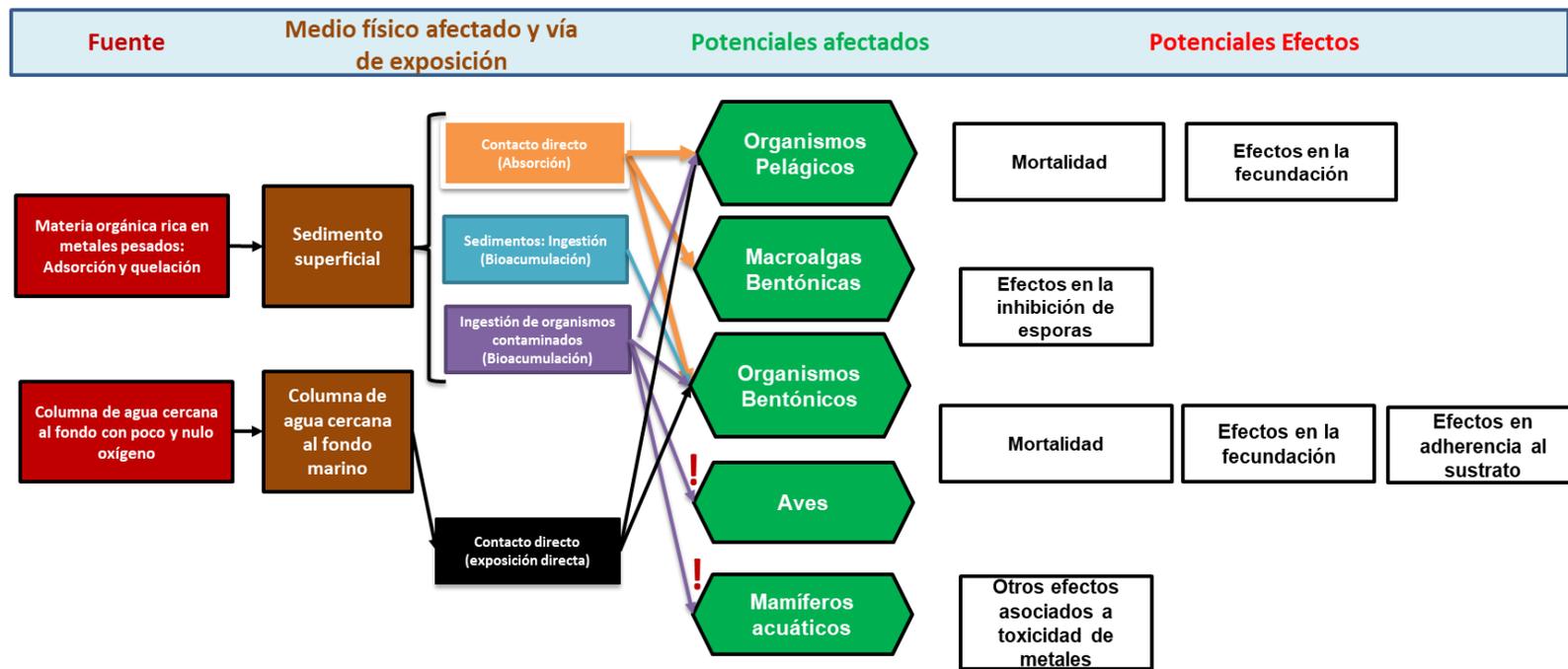


Figura 4.3-17 Modelo conceptual de Riesgo ecológico para la Bahía de Mejillones del Sur. Fuente: Elaboración propia.



! : No evaluado en el presente estudio, se requiere de otro estudio en detalle.

Figura 4.3-18 Modelo conceptual de riesgo ecológico enfocado a las alteraciones identificadas. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.6 Fase 2: Análisis del riesgo ecológico

A continuación, se presentan los resultados asociados a la fase 2 del ERE, en donde se analizaron más en detalle las concentraciones ambientales y las concentraciones con efectos. Dentro de estos dos puntos, el análisis de la exposición fue desarrollado por un lado analizando la totalidad de los datos de concentración ambiental (PEC), y por otro lado se analizan los flujos de emisiones de los RILES que componen el sistema ambiental. De este modo se puede proyectar cómo se comportan de manera integrada las plumas de contaminantes de los agentes de interés ambiental seleccionados en el presente estudio, y con ello identificar ciertas zonas donde eventualmente estos elementos podrían estar depositándose. Así, se determina si la exposición puede estar localizada en ciertas zonas de la bahía, o si de forma generalizada se estarían acumulando algunos agentes en el sedimento.

En segundo lugar, se analizaron los efectos que podrían tener estos agentes por medio de la elaboración de una base de datos ecotoxicológica, información basada en la literatura nacional y en las bases de datos internacionales, donde se cuenta con una variada cantidad de datos asociados a efectos para organismos marinos, tanto en el componente agua como sedimento.

4.3.1.6.1 Análisis de la exposición según concentración ambiental (PEC)

La primera fase de la evaluación de riesgo incluye la caracterización de la exposición, es decir, de las concentraciones a las cuales son expuestas las entidades ecológicas. En este sentido, es necesario establecer que las características de la calidad ambiental de las aguas y sedimento, con un enfoque estadístico que permita realizar ajustes probabilísticos, esenciales para la estimación de niveles de protección ambiental.

Es necesario establecer que gran parte de los registros de sustancias a estudiar (antecedentes POAL, datos SEIA y PVA empresas) corresponden a concentraciones totales con una gran frecuencia de datos bajo el límite de detección en el caso del cromo y mercurio, lo que indica una baja sensibilidad en las técnicas analíticas utilizadas. Por otro La Tabla 4.3-3 y Tabla 4.3-4 muestran el número de datos bajo el límite de detección para la matriz agua y sedimento, respectivamente. Cabe señalar que dentro de estas tablas también han sido incluidos los datos de las campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Los resultados dan cuenta de cifras bajo el límite de detección, por lo cual, para efectos de la estimación de los estadísticos de las concentraciones ambientales, se considerará como criterio el valor del límite de detección en caso de que el valor se encuentre por debajo de éste.

Tabla 4.3-3 Número de datos bajo el límite de detección para los metales seleccionados sobre la matriz agua, en bahía Mejillones del Sur Fuente: *Elaboración propia*

Parámetro	Total de datos	Bajo el límite de detección	% bajo el límite de detección
Arsénico Total	455	46	10%
Arsénico Disuelto	184	69	38%
Cadmio Total	566	44	8%
Cadmio disuelto	165	40	24%
Cromo Total	383	114	30%
Cromo Disuelto	212	88	42%
Cobre Total	503	129	26%
Cobre Disuelto	212	88	42%
Mercurio Total	542	283	52%
Mercurio Disuelto	223	154	69%
Plomo Total	446	74	17%
Plomo Disuelto	264	55	21%
Zinc Total	409	23	6%
Zinc disuelto	261	17	7%

Tabla 4.3-4 Número de datos bajo el límite de detección para los metales seleccionados sobre la matriz sedimentos, en bahía de Mejillones del Sur. Fuente: *Elaboración propia*

Parámetro	Total de datos	Bajo el límite de detección	% bajo el límite de detección
Arsénico	222	154	69%
Cadmio	446	348	78%
Cromo	399	297	74%
Cromo hexavalente	53	31	58%
Cobre	431	322	75%
Mercurio	447	354	79%
Plomo	460	363	79%
Zinc	364	274	75%

4.3.1.6.1.1 Recopilación de datos de calidad ambiental

A continuación, las Tabla 4.3-5, Tabla 4.3-6 y Tabla 4.3-7 dan cuenta de los estadígrafos representativos de la información de calidad ambiental en agua y sedimento recopilada de los datos históricos y de las campañas de terreno del presente estudio, para la fracción disuelta, total y en el sedimento, de los agentes seleccionados en la formulación del problema.

Tabla 4.3-5 Estadígrafos de toda la información recopilada de calidad ambiental en el agua de bahía Mejillones del Sur, de los agentes potencialmente contaminantes en su fracción disuelta

Parámetro	Arsénico disuelto	Cadmio disuelto	Cromo disuelto	Cobre disuelto	Mercurio disuelto	Plomo disuelto	Zinc disuelto
Número de datos	175	146	193	367	204	245	252
Promedio	6,8	8,5	4,4	5,3	0,8	21,2	40,4
Máximo	88,7	39,0	20,0	70,0	3,0	371,0	750,0
Mínimo	0,25	0,047	0,025	0,003	0,00025	0,024	0,025
Desv. Estándar	14,1	11,9	8,0	11,0	0,8	72,0	101,4
Percentil	Valor percentil [ug/l]						
0	0,25	0,047	0,025	0,003	0,00025	0,024	0,025
10	1	0,064	0,025	0,01	0,009	0,025	0,542
20	1	0,0797	0,05	0,01	0,01	0,05	1,289
30	1	0,0936	0,154	0,0116	0,5	0,117	2
40	1,28	0,1129	0,22	0,12	0,5	0,275	3
50	1,71	0,5	0,27	0,5	1	0,49	3,585
60	2	0,5	0,5	0,974	1	0,645	6,384
66	2	20	0,5088	1,1072	1	1,25	12,46
70	2	20	0,662	1,354	1	1,25	27
80	8	20	20	6,2	1	20	38,1
90	24,7	20	20	20	1	20	116,5
95	34,95	35	20	20	3	88,25	204,5
100	88,7	39	20	70	3	371	750

Tabla 4.3-6 Estadígrafos de toda la información recopilada de calidad ambiental en el agua de bahía Mejillones del Sur, de los agentes potencialmente contaminantes en su fracción total

Parámetro	Arsénico total	Cadmio total	Cromo total	Cobre total	Mercurio total	Plomo total	Zinc total
Número de datos	455	533	363	484	539	446	397
Promedio	1,9	43,6	23,9	36,2	0,6	163,2	35,1
Máximo	20,0	631,0	225,0	124,0	5,8	783,0	219,0
Mínimo	0,001	0,024	0,025	0,07	0,01	0,01	0,5
Desv. Estándar	3,1	61,8	33,9	34,3	0,5	190,1	40,4
Percentil	Valor percentil [ug/l]						
0	0,001	0,024	0,025	0,07	0,01	0,01	0,5
10	0,001	0,05	0,11	1,037	0,2	0,0653	1,394
20	0,001	0,1844	0,511	3,161	0,2	2,149	3,524
30	0,2	1	1,178	6,749	0,2	5	10
40	1	5	2,5	10	0,5	10	20
50	1	30	5	10	0,5	50	26
60	1,565	44	10	50	1	194,1	30
66	1,868	48	10	54	1	222,72	32
70	2	52	35,2	58,3	1	289,4	35
80	2,34	78,9	58	69,7	1	338	52,3
90	3,82	127,2	75	86	1	439,1	100
95	8	166,85	85	100,3	1	519,2	134
100	20	631	225	124	5,84	783	219

Tabla 4.3-7 Estadígrafos de toda la información recopilada de calidad ambiental en el sedimento de bahía Mejillones del Sur, de los agentes potencialmente contaminantes en su fracción total

Parámetro	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cromo hexavalente	Cobre	Mercurio	Plomo	Zinc
Número de datos	95	451	403	53	439	448	460	364
Promedio	3,8	2,2	13,3	4,9	12,2	2,5	5,4	33,1
Máximo	13	50	87,8	30	66,9	103	404,38	1312
Mínimo	0,2	0	0,006	0,01	0,01	0,001	0,01	0,1
Desv. Estándar	3,0	3,2	11,0	9,6	8,4	13,6	20,2	110,7
Percentil	Valor percentil [mg/kg]							
0	0,2	0	0,006	0,01	0,01	0,001	0,01	0,1
10	0,2	0,05	2,78	0,01	4,2744	0,005	0,2	9,79
20	0,2	0,2	5,982	0,1	5,805	0,005	0,25	12,2
30	1,55	0,5024	8,332	0,1	8,076	0,00796	0,5	14
40	2,78	0,9	10,87	0,1	9,163	0,01	0,7	15

Parámetro	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cromo hexavalente	Cobre	Mercurio	Plomo	Zinc
Número de datos	95	451	403	53	439	448	460	364
Promedio	3,8	2,2	13,3	4,9	12,2	2,5	5,4	33,1
Máximo	13	50	87,8	30	66,9	103	404,38	1312
Mínimo	0,2	0	0,006	0,01	0,01	0,001	0,01	0,1
Desv. Estándar	3,0	3,2	11,0	9,6	8,4	13,6	20,2	110,7
Percentil	Valor percentil [mg/kg]							
50	3,95	1,33	12	0,2	10,01	0,02	1,2	16
60	5	2,144	13,23	0,2	11,8	0,03381	1,655	17
66	5,0	2,7	14,1	1,0	12,7	0,1	3,0	17,7
70	5	2,9	14,8	1	13,98	0,05	4,3	18,727
80	5,695	3,6	17,268	10	17	0,069	7,785	22,904
90	7,33	5,024	21,24	30	21,882	0,2	13,1	32,99
95	8,82	6,597	32,685	30	27,82	0,9915	22,9	54,06
100	13,1	49,7	87,8	30	66,9	103	404,38	1312

4.3.1.6.1.2 Ajustes estadísticos en la matriz agua

A continuación, se efectúan regresiones estadísticas de la información para cada uno de los metales seleccionados. Se utilizaron todas las distribuciones estadísticas disponibles con el software Matlab® (12 estadísticos), y se seleccionaron las que presentaran un mejor ajuste según el criterio de información Bayesiano y un mejor ajuste de los valores mínimos y máximos de cada serie y su representatividad en el conjunto, teniendo en consideración los cambios producto de la cantidad de valores bajo los límites de detección.

Estos ajustes son utilizados para la generación de series sintéticas en la estimación del cociente de Riesgo en la Fase 3: Caracterización del Riesgo.

4.3.1.6.1.2.1 Arsénico

Las Figura 4.3-19 y Figura 4.3-20 muestran las regresiones ajustadas para las concentraciones de arsénico disuelto y total. Se observa que existe un adecuado ajuste a ciertas regresiones realizadas.

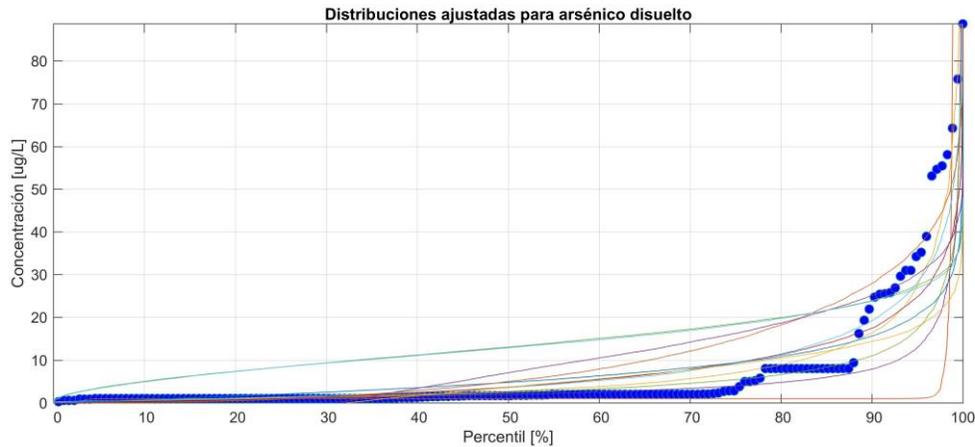


Figura 4.3-19 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de arsénico disuelto en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

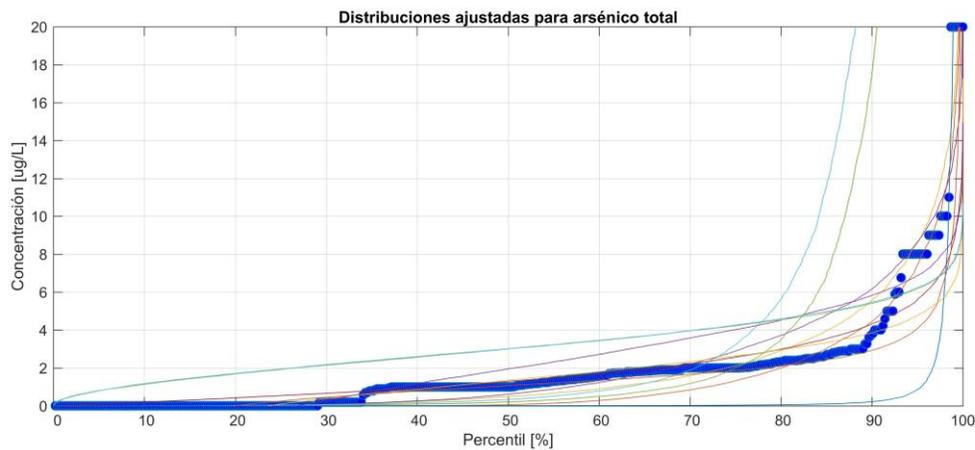


Figura 4.3-20 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de arsénico total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.2 Cadmio

Las Figura 4.3-21 y Figura 4.3-22 muestran las regresiones ajustadas para las concentraciones de cadmio disuelto y total respectivamente. Se logra distinguir el efecto de límites de detección sobre la fracción disuelta, apreciables por medio de una tendencia recta sin variaciones en los percentiles, desde el percentil 0 al 60 con niveles cercanos a 1 ug/l, y luego del percentil 60 al 90 con valores iguales a 20 ug/l. Lo anterior permite inferir que los métodos de detección no son lo suficientemente precisos para detectar bajos niveles de cadmio disuelto. Por otro lado, el cadmio total presenta niveles 1 orden de magnitud más

altos que su fracción disuelta, por lo que se puede apreciar una curva desde el percentil 50, permitiendo un ajuste estadístico más representativo a diferencia de su fracción disuelta.

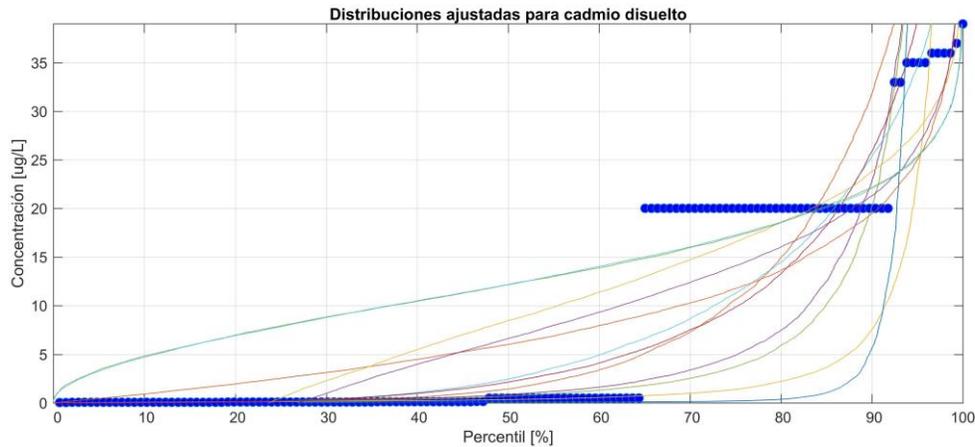


Figura 4.3-21 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cadmio disuelto en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

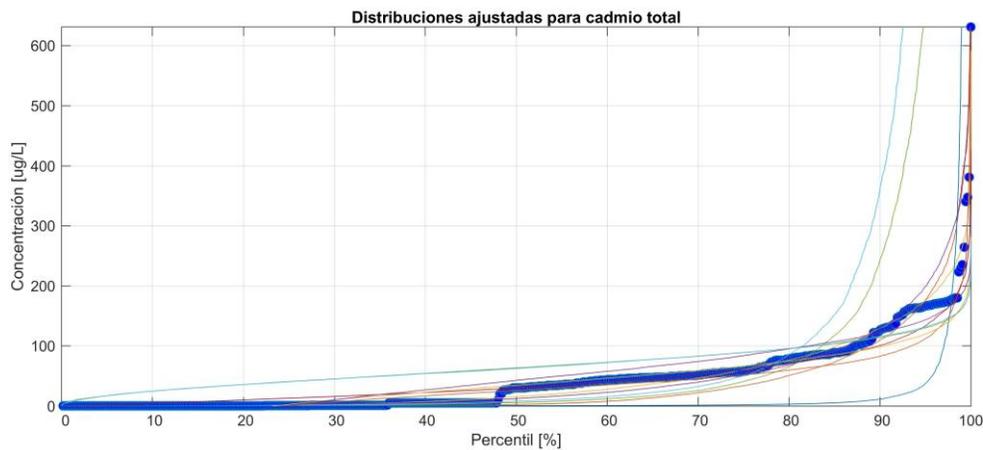


Figura 4.3-22 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cadmio total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.2.3 Cromo

Las Figura 4.3-23 y Figura 4.3-24 muestran el ajuste para las concentraciones de cromo disuelto y total respectivamente. Dada la gran diferencia en los niveles registrados en la fracción disuelta, se prefirió por generar un gráfico en escala logarítmica en el eje de las

abscisas para mejorar su visualización. Se aprecian valores en su mayoría de 1 orden de magnitud hasta el percentil 80, para luego aumentar hasta un nivel prácticamente fijo, lo cual se puede deber a límites de detección elevados. Por otro lado, la fracción total si bien presenta concentraciones de 1 orden de magnitud hasta aproximadamente el percentil 40, aumenta notoriamente hacia percentiles mayores. Esta última curva permite un adecuado ajuste de las regresiones utilizadas.

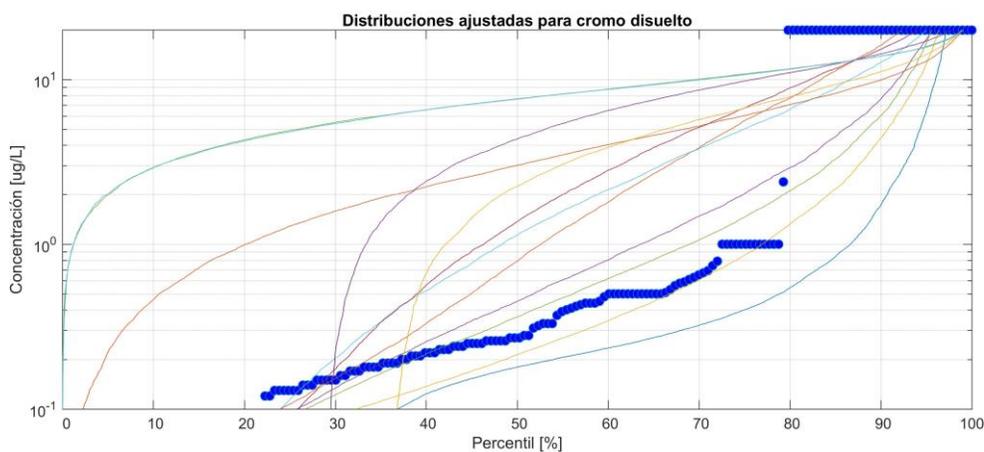


Figura 4.3-23 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cromo disuelto en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

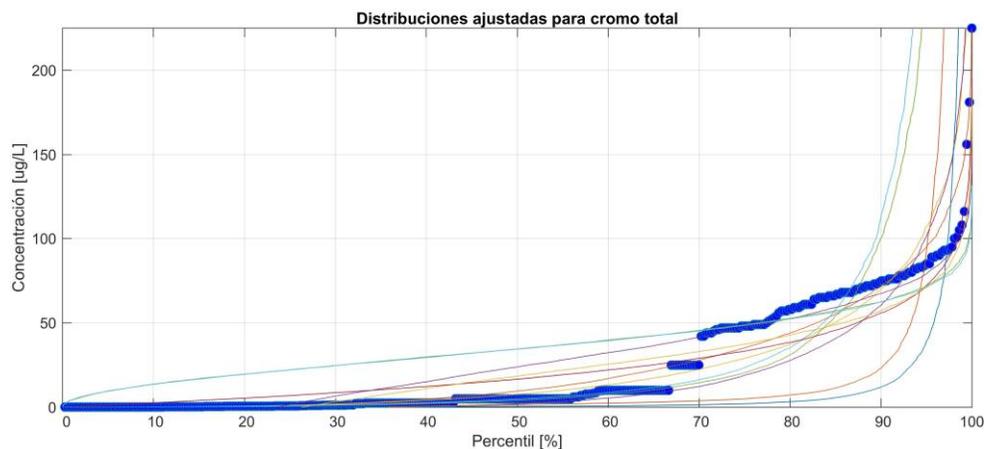


Figura 4.3-24 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cromo total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.2.4 **Cobre**

Las Figura 4.3-25 y Figura 4.3-26 muestran las regresiones ajustadas para las concentraciones de cobre disuelto y total respectivamente. Para la fracción disuelta se aprecian concentraciones de 1 orden de magnitud hasta aproximadamente el percentil 80, donde luego se puede observar una línea recta en los 20 ug/l lo donde se infiere la existencia de registros con técnicas analíticas de un nivel de detección alto. No obstante, se aprecia luego concentraciones entre los 50 ug/l sobre estos límites. Para la fracción total hasta el percentil 50 existen niveles bajo los 10 ug/l, para luego aumentar notoriamente hasta los 40 ug/l, con un aumento aproximadamente lineal hasta el percentil 90, duplicando sus concentraciones.

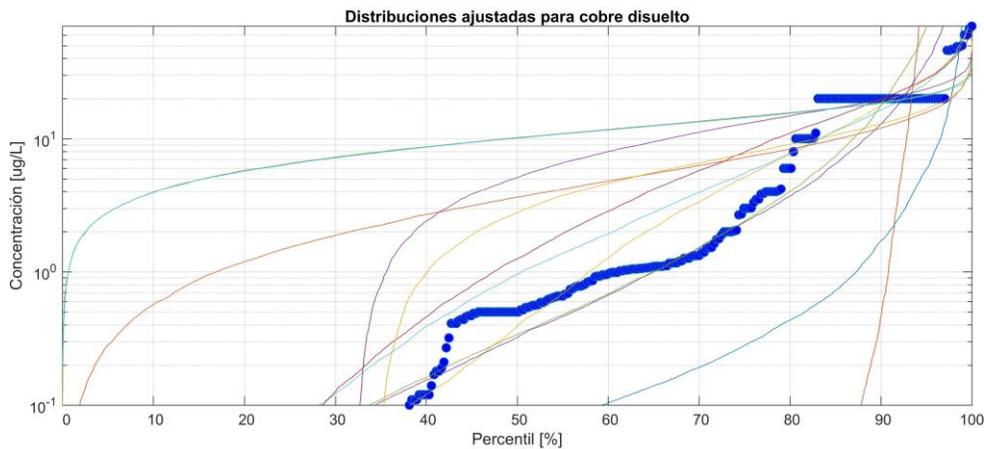


Figura 4.3-25 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cobre disuelto en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

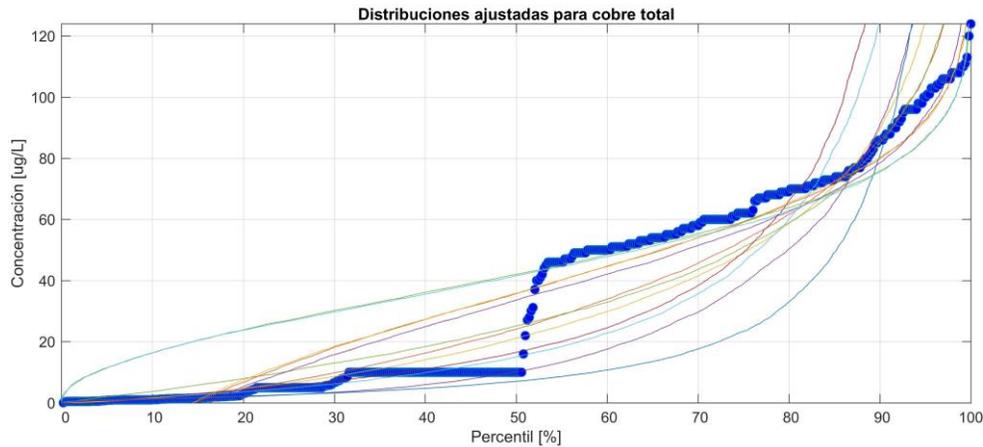


Figura 4.3-26 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cobre total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.2.5 Mercurio

Las Figura 4.3-27 y Figura 4.3-28 muestran el ajuste estadístico para las concentraciones de mercurio disuelto y total respectivamente. Si bien para el mercurio existe una gran cantidad de registros, se aprecia una serie escalonada de datos para la fracción disuelta, lo cual indica que la mayoría de la información se encontraría asociada a límites de detección, generando una serie de datos entre los 0,01 ug/l, 0,5 ug/l, 1 ug/l y 3 ug/l. Para el caso de la fracción total sucede algo similar, no obstante, se detectaron algunos valores sobre los límites de detección en los últimos percentiles. Todo lo anterior indica que los niveles de mercurio en el agua son bajos para las técnicas analíticas utilizadas.

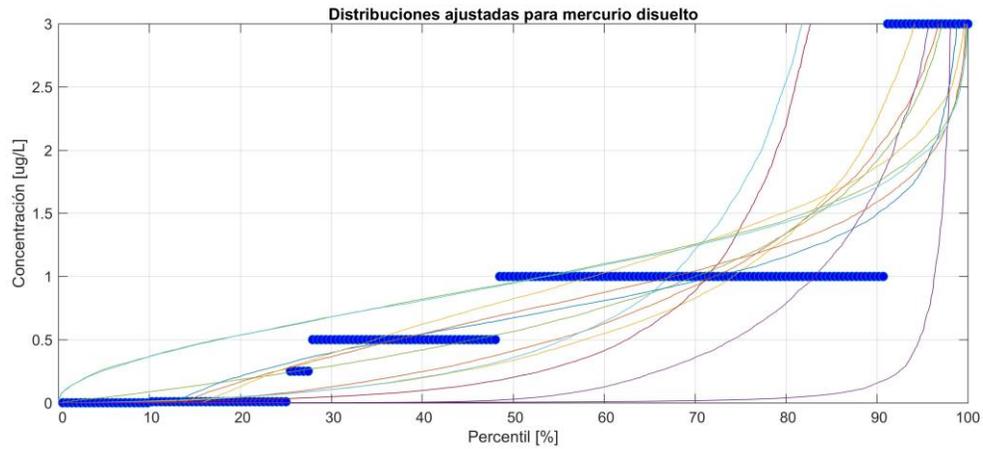


Figura 4.3-27 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de mercurio disuelto en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

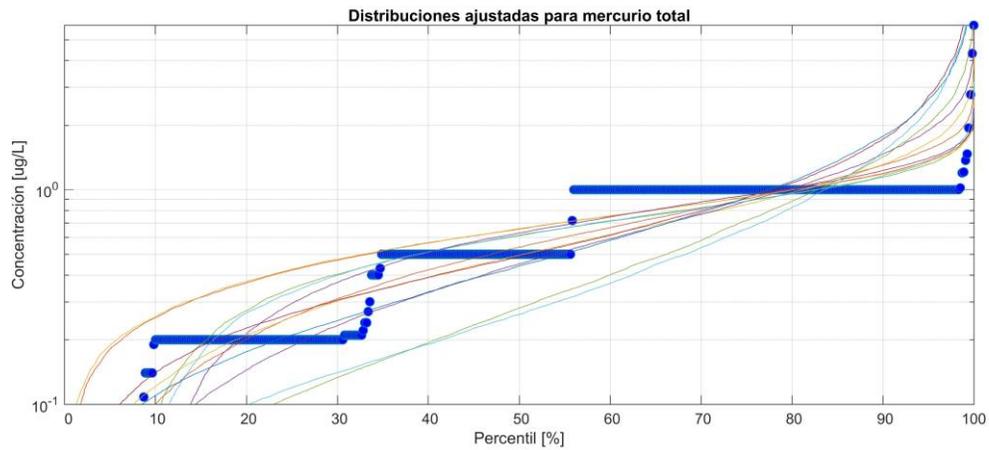


Figura 4.3-28 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de mercurio total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.2.6 Plomo

Las Figura 4.3-29 y Figura 4.3-30 dan cuenta de la estimación estadística para las concentraciones de plomo disuelto y total. Para la fracción disuelta se aprecia que la mayoría de los datos presentan cifras bajo los límites de detección hasta el percentil 95. Sin embargo, en la fracción total se aprecia un comportamiento diferente, con niveles mucho mayores de concentración de plomo desde el percentil 50, aumentando exponencialmente las concentraciones hasta valores sobre los 800 ug/l de plomo total.

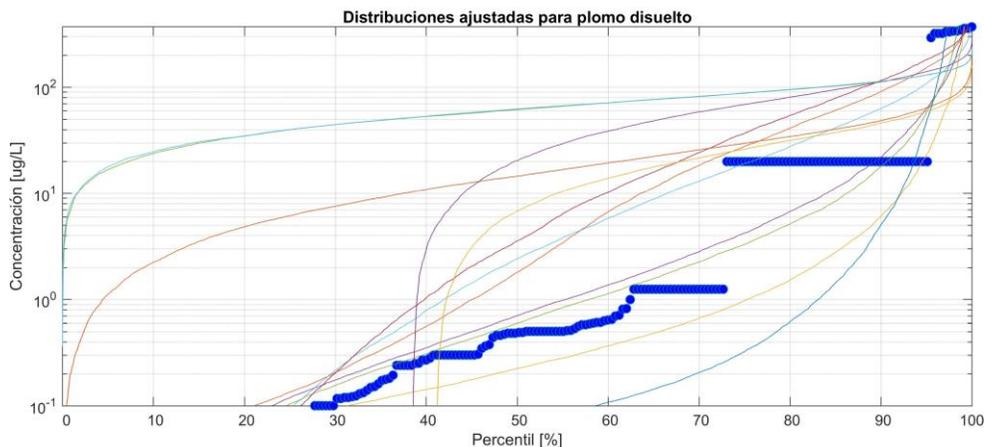


Figura 4.3-29 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de plomo disuelto en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

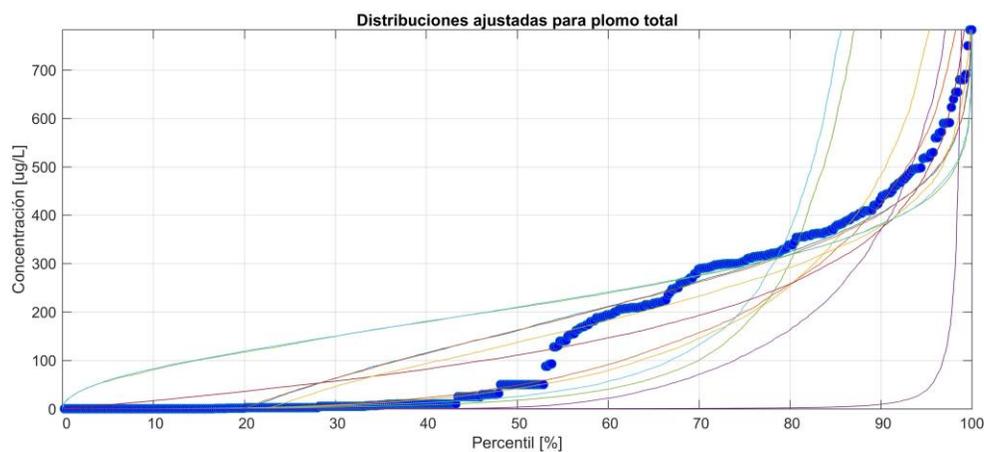


Figura 4.3-30 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de plomo total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

4.3.1.6.1.2.7 Zinc

Las Figura 4.3-31 y Figura 4.3-32 da cuenta de la estimación estadística para las concentraciones de zinc disuelto y total respectivamente. La fracción disuelta da cuenta de valores cuantificables, en el sentido de que no se observan cifras escalonadas como en los casos anteriores. Hasta aproximadamente el percentil 65 los valores se encuentran por debajo de los 10 ug/l y con valores sobre 100 ug/l a partir del percentil 90. Se aprecia una tendencia a seguir una función logarítmica, lo cual responde a una tendencia lineal en la escala logarítmica en el eje de las coordenadas.

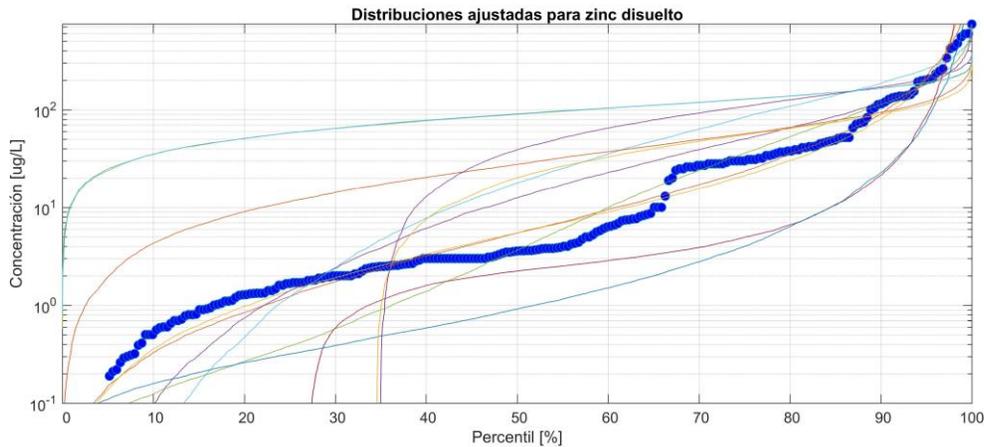


Figura 4.3-31 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de zinc disuelto en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

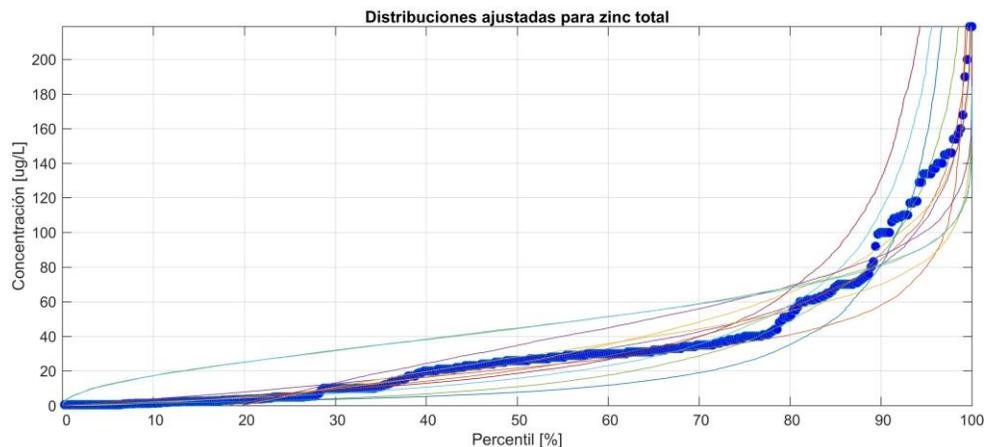


Figura 4.3-32 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de zinc total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

4.3.1.6.1.3 Ajustes estadísticos en matriz sedimento

Del mismo modo que para la matriz agua, se generaron estadísticos representativos de la información recopilada más los resultados de las campañas del presente estudio.

Cabe señalar que se cuenta con una menor cantidad de información, no obstante, de igual forma se estiman estadísticos, tomando especial cuidado en la representatividad de la curva.

4.3.1.6.1.3.1 Arsénico

La Figura 4.3-33 muestra los tres mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el arsénico total.

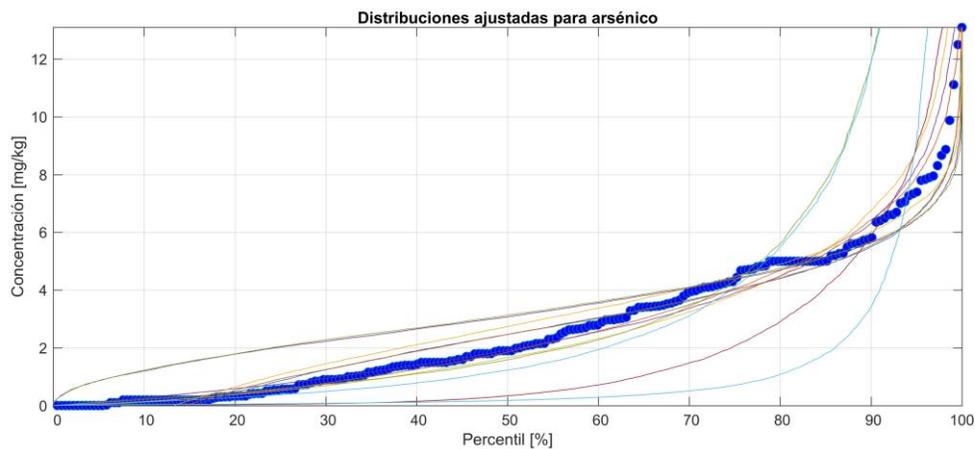


Figura 4.3-33 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de arsénico total en la matriz sedimento. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.2 Cadmio

La Figura 4.3-34 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el cadmio total. Nótese que se graficó en escala logarítmica producto de que los valores máximos y mínimos presentaron rangos muy distintos.

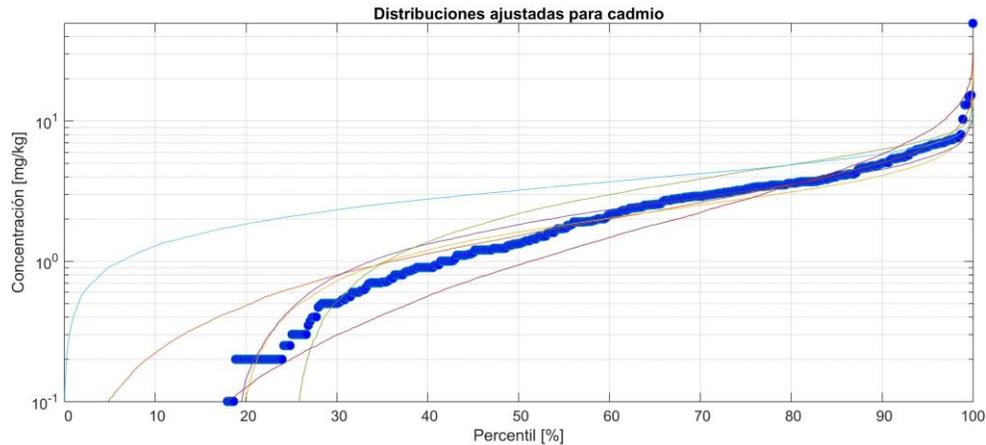


Figura 4.3-34 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cadmio total en la matriz sedimento. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.3 Cromo

Las Figura 4.3-35 muestra los tres mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el cromo total.

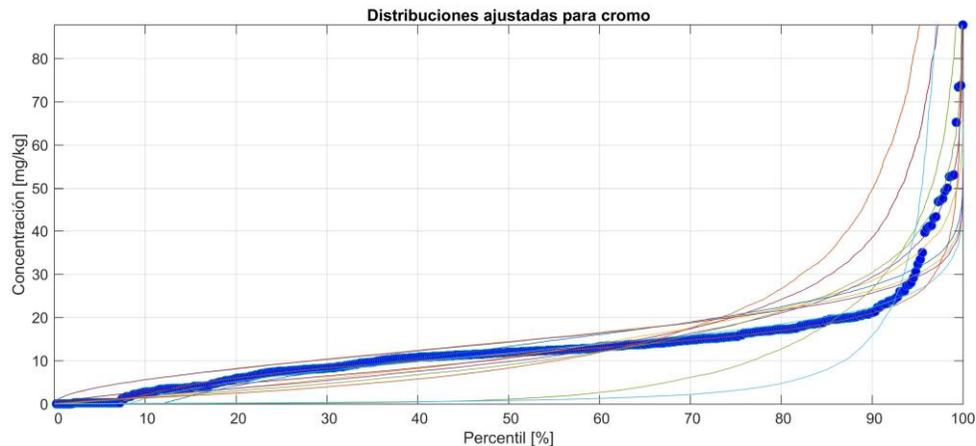


Figura 4.3-35 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cromo total en la matriz sedimento. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.4 Cromo hexavalente

Las Figura 4.3-35 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el cromo hexavalente. Los resultados indican un comportamiento escalonado, lo cual se explica en el hecho de que los datos estarían asociados a valores bajo los límites de detección, los que no fueron identificados inicialmente por cuanto los documentos revisados no informaban si el dato correspondía a valores bajo los límites, por lo que se puede inferir que el porcentaje de datos bajo tales límites es superior a lo que indica la Tabla 4.3-7.

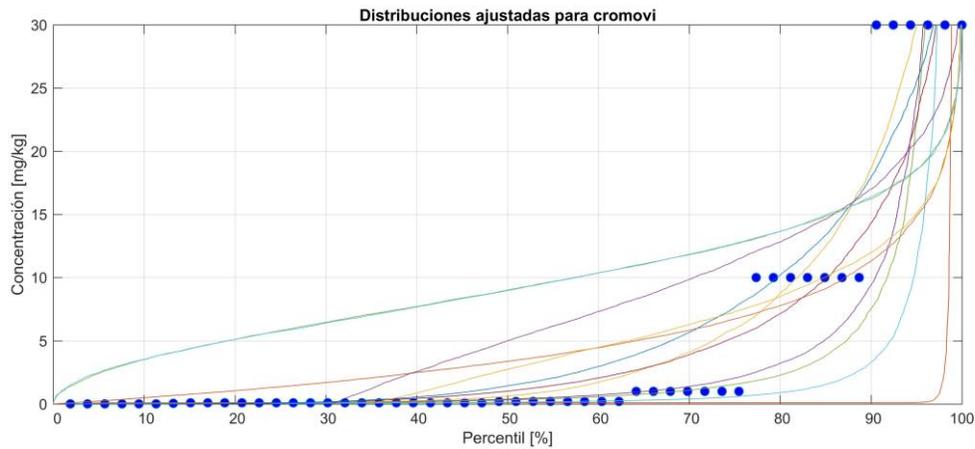


Figura 4.3-36 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cromo total en la matriz sedimento. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.5 Cobre

La Figura 4.3-37 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el cobre total. Se aprecia que gran parte de la información se encuentra sobre los límites de detección, y adicionalmente, se cuenta con una gran cantidad de datos, lo que permite generar una curva de excedencia uniforme y, por lo tanto, es posible ajustar un estadístico representativo a los datos.

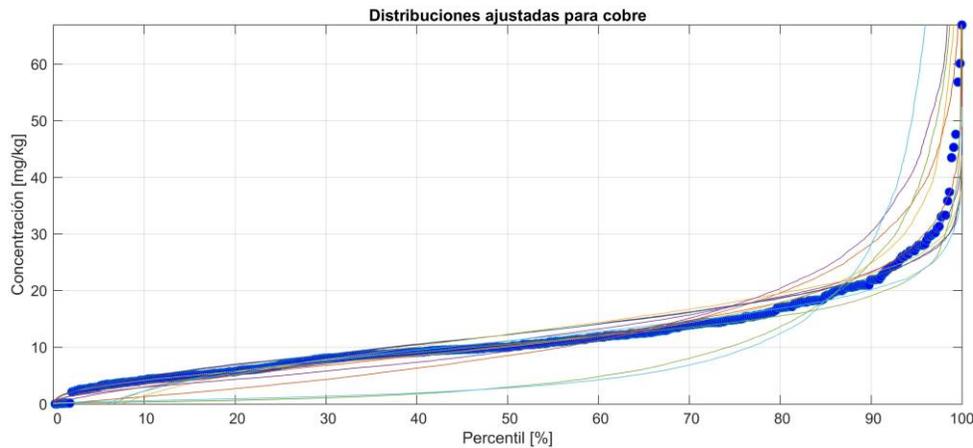


Figura 4.3-37 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de cobre total en la matriz sedimento. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.6 Mercurio

La Figura 4.3-38 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el mercurio total. El eje de las ordenadas se graficó en escala logarítmica por el amplio rango de valores encontrados, entre 0,001 hasta 103 mg/kg. Se observa que el 90% de los datos se encuentra por debajo de 0,1 mg/kg.

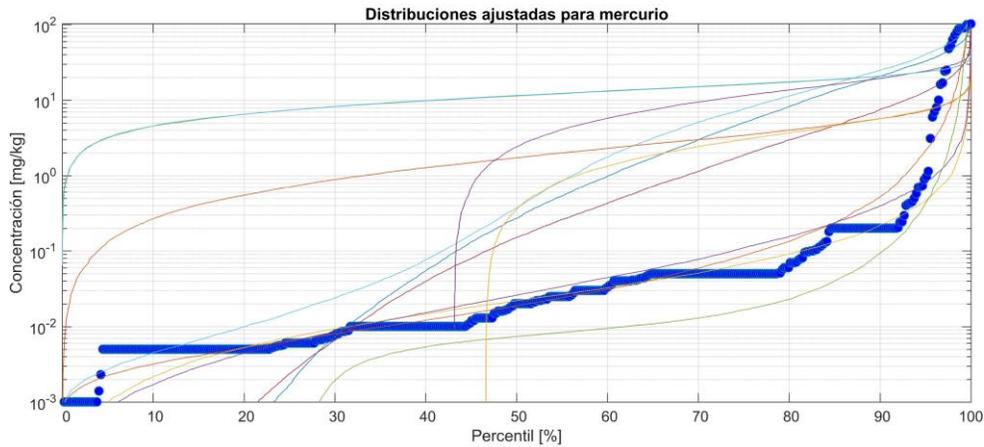


Figura 4.3-38 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de mercurio total en la matriz sedimentaria. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.7 Plomo

La Figura 4.3-38 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el plomo total. Al igual que el metal traza mercurio, el plomo se graficó en escala logarítmica indicando su amplio rango de magnitudes detectada. Por otro lado, destaca una tendencia lineal en el gráfico, lo que implica una tendencia exponencial en la distribución.

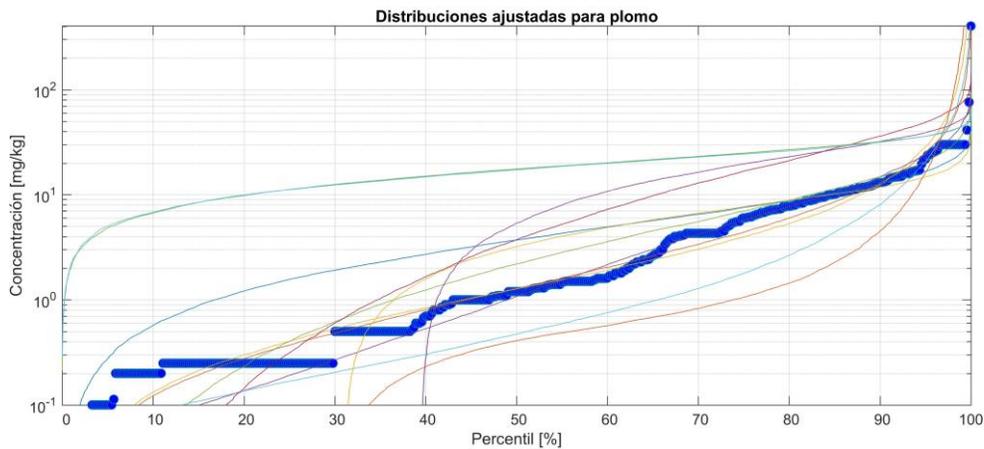


Figura 4.3-39 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de mercurio total en la matriz sedimentaria. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.1.6.1.3.8 Zinc

La Figura 4.3-40 muestra los mejores ajustes estadísticos, generados con las series de información para el zinc total. La curva da cuenta de una distribución log normal, con pocos valores bajo los límites de detección, con cerca del 80% de los datos con valores entre 10 y 50 mg/kg.

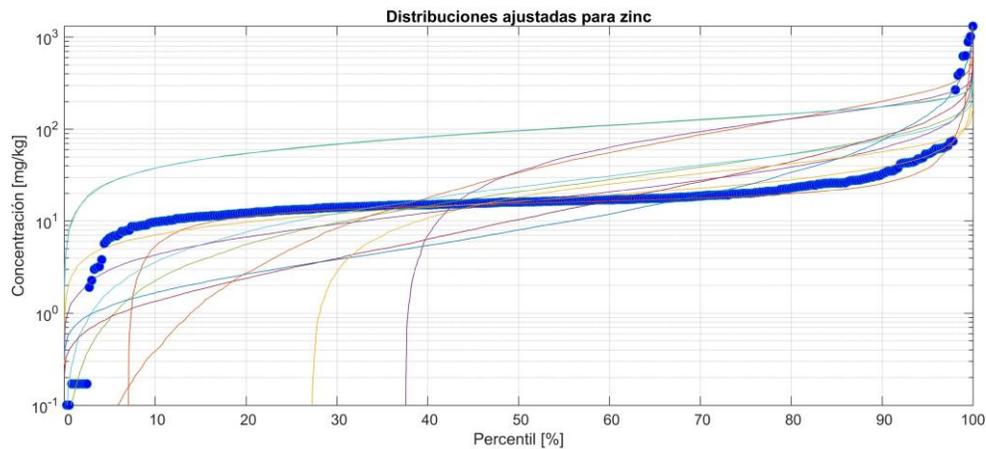


Figura 4.3-40 Ajuste de distribución estadística para los datos de calidad de zinc total en la matriz sedimento. Fuente: Elaboración propia

4.3.1.6.1.4 Síntesis de resultados

De las distribuciones estadísticas adecuadas para cada base de datos, si bien algunas no lograron adecuarse de la mejor forma debido principalmente a la falta de más información, estos resultados son de utilidad para estimar series sintéticas (Análisis de Montecarlo). La Tabla 4.3-8 y Tabla 4.3-9 muestran los estadísticos seleccionados para cada serie de datos, para la matriz agua y sedimento respectivamente.

Tabla 4.3-8 Mejor estadístico para los elementos en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Regresión
Arsénico disuelto	Gaussiana inversa
Arsénico total	Gamma
Cadmio disuelto	Gaussiana inversa
Cadmio total	Nakagami
Cromo disuelto	Gaussiana inversa*
Cromo total	Nakagami
Cobre disuelto	Birnbaum Saunders
Cobre total	Nakagami
Mercurio disuelto	Nakagami
Mercurio total	Exponencial
Plomo disuelto	Log normal
Plomo total	Nakagami
Zinc disuelto	Lognormal
Zinc total	Nakagami

*: Mejor ajuste, pero poca representatividad por disponer de bajo los límites de detección.

Tabla 4.3-9 Mejor estadístico para los elementos en la matriz sedimento.

Parámetro	Regresión
Arsénico	Nakagami
Cadmio	Exponencial
Cromo	T-location-scale
Cromo VI	Birnbaum Saunders
Cobre	Gamma
Mercurio	Loglogística
Plomo	Lognormal
Zinc	T-location-scale

4.3.1.6.2 Análisis de la exposición según flujo de contaminantes (Simulación numérica)

Se desarrolló una modelación hidrodinámica de la bahía de Mejillones, a modo de caracterizar la dinámica de corrientes y las variaciones de la estructura de la columna de agua de la bahía, las cuales son responsables de la movilización y mezcla de cualquier agente que sea descargado en la bahía, tanto de forma local como indirecta. De manera posterior, se incluyeron las fuentes de descarga según sus Riles que pudiesen tener influencia en el área de estudio, de manera tal de estimar zonas de riesgo potencial en términos de su acumulación y presencia en el dominio de la modelación.

4.3.1.6.2.1 Descripción general de la simulación

Como parte del estudio se desarrolló una simulación de 2 años considerando las condiciones iniciales y de borde mencionadas en los acápite anteriores, repitiendo las condiciones de borde entre años para así eliminar el efecto de las condiciones iniciales establecidas para la simulación, considerando un espaciamiento de tiempo de 60 segundos y un periodo de registros de 1 hora.

4.3.1.6.2.2 Descripción del área de estudio

La zona que comprendió el estudio se localiza en la región de Antofagasta, comuna de Mejillones, y corresponde a la bahía Mejillones del Sur, entre los sectores de Punta Angamos ($23^{\circ}1.7'S$ & $70^{\circ}30.6'W$) por el sur y Punta Chacaya ($22^{\circ}58'S$ & $70^{\circ}19.5'W$) por el norte (Figura 4.3-41), extendiéndose por aproximadamente 21 km.



Figura 4.3-41: Ubicación geográfica de la bahía Mejillones del Sur, Región de Antofagasta.

4.3.1.6.2.3 Antecedentes del modelo AEM3D

AEM3D es una herramienta de modelación numérica desarrollada por HydroNumerics, empresa australiana que presta servicios de ingeniería. El modelo, está basado en el internacionalmente reconocido modelo ELCOM-CAEDYM, desarrollado por el Centre for Water Research (CWR) de la University of Western Australia, el cual ha sido ampliamente validado en el estudio de lagos, estuarios y zonas costeras, siendo actualmente uno de los modelos hidrodinámicos con mayor número de publicaciones y citas científicas (Trolle et al., 2012). Cabe señalar que el equipo de trabajo de HydroNumerics, fue integrante base del equipo de desarrollo de ELCOM-CAEDYM, por lo que cuenta con las mismas prestaciones. El nombre del software AEM3D viene de la sigla en inglés de “Aquatic Ecosystem Model 3D”, y se utiliza para predecir la velocidad, temperatura, salinidad, nutrientes y bioquímica de cuerpos de agua sometidos a forzantes ambientales o antrópicas como el viento, la marea, calentamiento y enfriamiento superficial por radiación, caudales

afluentes y efluentes, extracciones, etc. El método de solución hidrodinámica de este modelo es a través de la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible, y utilizando la hipótesis hidrostática de presión, permitiendo así la simulación numérica de procesos que incluyen una respuesta baroclínica y barotrópica, efectos de rotación terrestre, efectos de marea y efectos del viento (Hodges & Dallimore, 2016).

4.3.1.6.2.4 Datos de entrada para la modelación

A continuación, se detalla la información requerida como datos de entrada para el modelo numérico, correspondiente a información geométrica del sistema a modelar, las condiciones de borde que forzarán el sistema y las condiciones iniciales de simulación.

4.3.1.6.2.4.1 **Batimetría bahía Mejillones**

El modelo numérico requiere información batimétrica para construir una grilla tridimensional que defina geoméricamente el dominio en estudio. Para ello se utilizó información batimétrica obtenida a partir de la información de cartas náuticas generadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), las cuales se adjuntan en la Tabla 4.3-10. La información extraída corresponde a veriles y mediciones puntuales de profundidad.

Tabla 4.3-10: Cartas SHOA utilizadas en la generación de batimetría.

Nombre	Carta	Escala	Año Edición
BAHÍA MEJILLONES DEL SUR A PUERTO CALDERA	2000	1:500.000	1979 c/c 2004
PUERTO DE TOCOPILLA A RADA DE ANTOFAGASTA	1300	1:200.000	1993
BAHÍA MEJILLONES DEL SUR Puerto Mejillones	1331	1:25.000	2011

4.3.1.6.2.4.1.1 Dominio bahía Mejillones

El dominio utilizado para la simulación de la bahía Mejillones se ubica entre las coordenadas 338.650 m y 367.900 m Este, y 7.444.250 m y 7.467.500 m Norte huso 19K, correspondiente a un área efectiva de 680 km². La grilla planimétrica posee una resolución espacial de 150 m x 150 x. La resolución vertical adoptada fue variable, desde 100 m en profundidad, hasta 0.5 m en superficie. La Figura 4.3-42 muestra la batimetría circundante en el área efectiva del modelo numérico, bajo la resolución espacial mencionada.

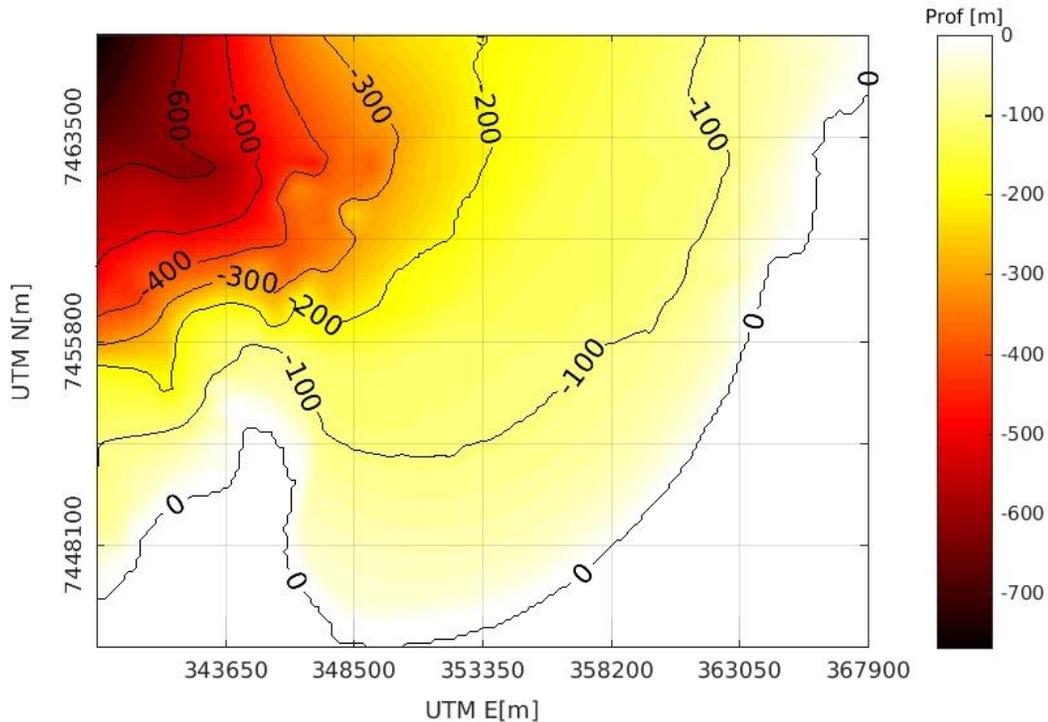


Figura 4.3-42: Batimetría utilizada en la modelación de bahía Mejillones del Sur.

4.3.1.6.2.4.2 Condiciones de borde

Las condiciones de borde requeridas por el modelo numérico corresponden a las condiciones meteorológicas y altura de marea en los bordes de la grilla, que funcionan como forzantes del modelo al imponer condiciones de energía en las celdas del dominio, además de la información de RILES como caudales y concentraciones de sustancias que entran a la Bahía. Cada una de estas condiciones de borde, representadas por variables temporales, son explicadas y presentadas a continuación.

4.3.1.6.2.4.2.1 Meteorología

Una de las forzantes principales de los modelos numéricos corresponde a las variables atmosféricas, pues están involucradas tanto en la interacción existente en la interfaz de la superficie libre del agua con en el aire, como también en los procesos químico-biológicos asociados con la disponibilidad de luz y con la turbulencia existente en la columna de agua, parámetros que tienen implicancias en el desarrollo del fitoplancton.

Así, la información relativa a condiciones meteorológicas se recopiló a partir de estaciones pertenecientes a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) y al instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), que se adjuntan en la Tabla 4.3-11. A su vez, la cobertura de nubes se obtuvo a partir de información del modelo

de reanálisis NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), que cuenta con datos horarios de simulaciones con reanálisis de datos.

Tabla 4.3-11: Estaciones meteorológicas utilizadas.

Institución	Nombre Estación	Tipo	WGS84, UTM Huso 19K		Elevación (msnm)
			E (m)	N(m)	
DIRECTEMAR	Capitanía de Puerto Mejillones	Meteorológica	351.214,68	7.444.792,07	5
INIA	Altos la portada, Antofagasta	Meteorológica	356.577,89	7.399.972,75	105

De la estación DIRECTEMAR se obtuvo los registros de información correspondientes a las variables de temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión atmosférica y humedad relativa. De la estación meteorológica INIA utilizó los registros de Radiación de onda corta para un año calendario.

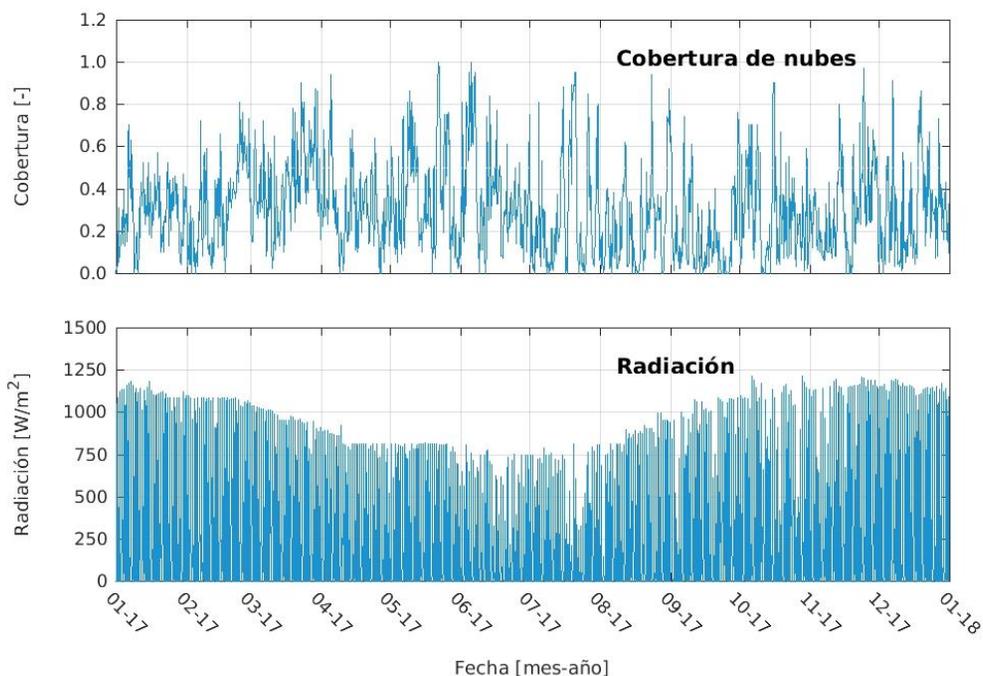


Figura 4.3-43: Series de tiempo de Cobertura de nubes (panel superior) y radiación de onda corta incidente (panel inferior) utilizadas como condición de bode en modelación.

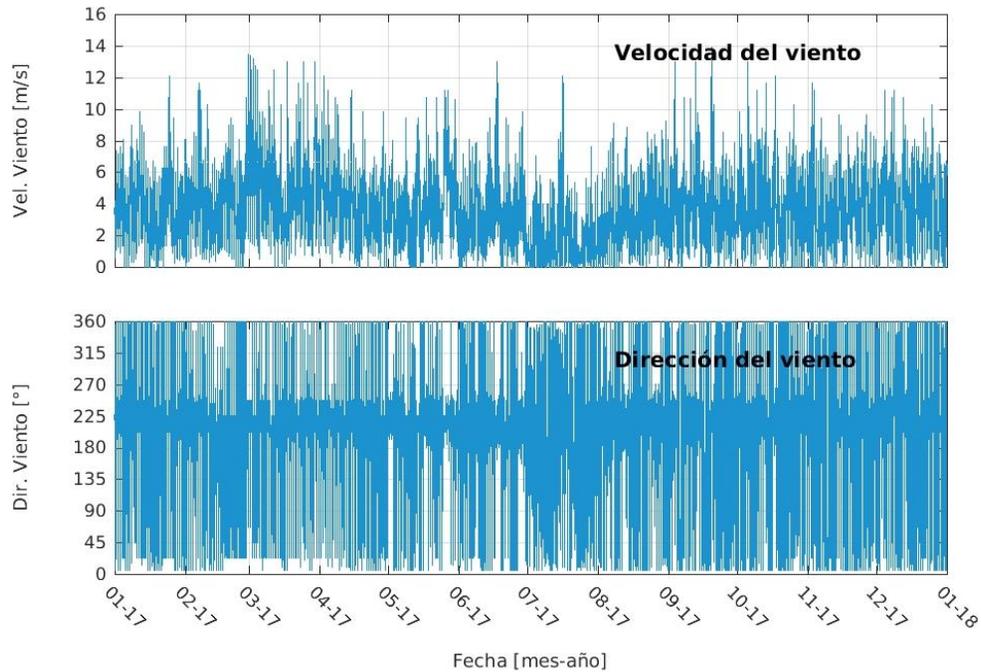


Figura 4.3-44: Series de tiempo de Velocidad del viento (panel superior) y Dirección del viento (panel inferior) utilizadas como condición de bode en modelación.

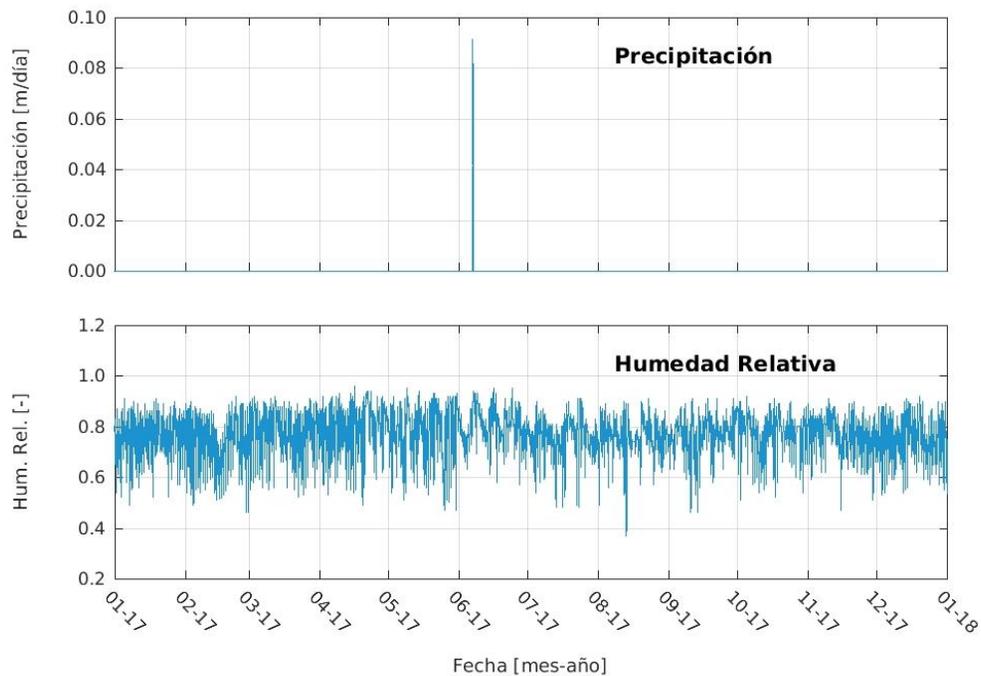


Figura 4.3-45: Series de tiempo de Precipitación (panel superior) y Humedad relativa (panel inferior) utilizadas como condición de bode en modelación.

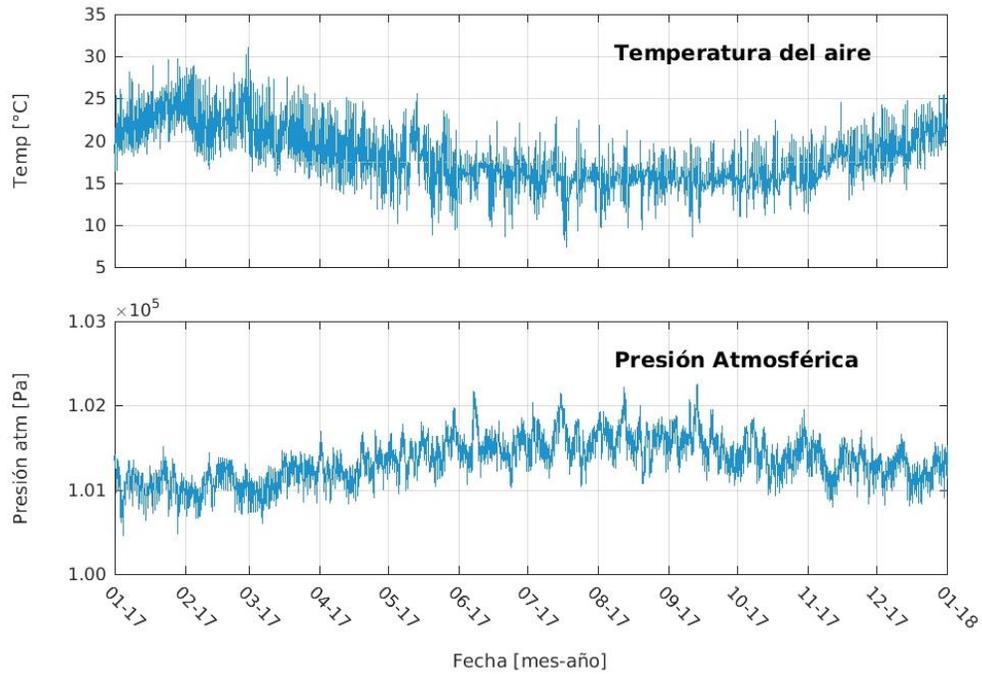


Figura 4.3-46: Series de tiempo de Temperatura del aire (panel superior) y Presión atmosférica (panel inferior) utilizadas como condición de bode en modelación.

4.3.1.6.2.4.2.2 Datos de Marea

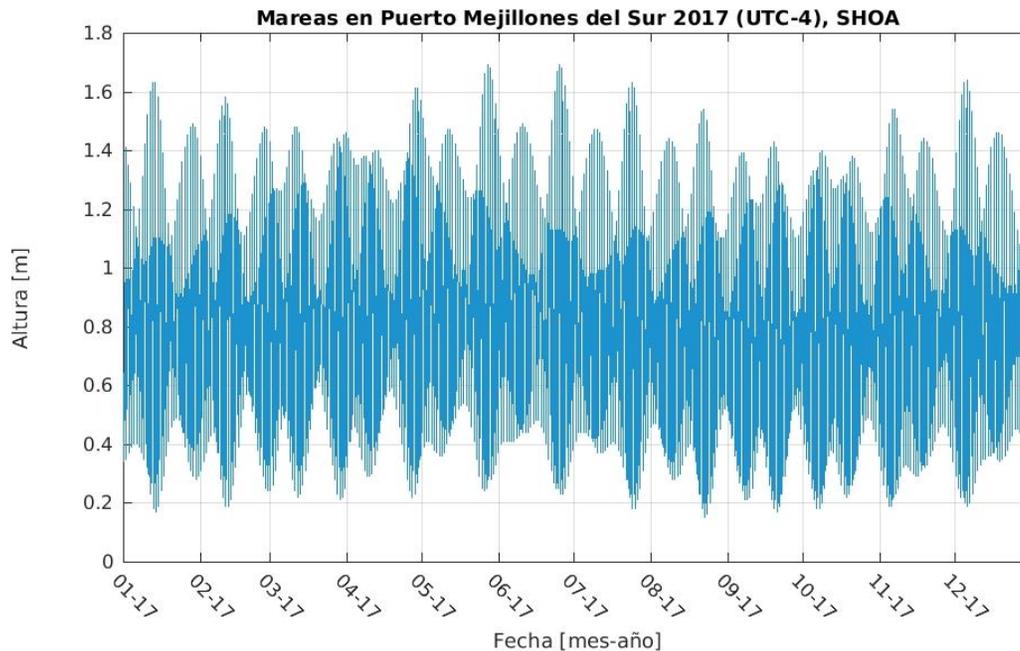


Figura 4.3-47: Mareas obtenidas para Puerto Patrón Mejillones del Sur, a partir de tablas de marea SHOA 2017.

Para poder modelar la dinámica de mareas en la bahía, se consideró ingresar las variaciones de altura en los márgenes norte y poniente del dominio considerado. Los valores utilizados correspondieron a las mareas entregadas por SHOA en su publicación “Tablas de marea de la costa de Chile 2017”, Puerto Patrón Mejillones del Sur, corregidos por los registros de presión atmosférica de la estación meteorológica “Capitanía de Puerto Mejillones” de la Tabla 4.3-11, según las correcciones presentadas por SHOA de la Tabla 4.3-12, y por el Nivel de Reducción de Sonda del puerto Patrón “Mejillones del Sur” (NRS=0,81 m). Cabe mencionar que cuando las lecturas de Presión atmosférica se ubican entre dos mediciones de Hectopascales, se consideró un ajuste lineal entre los extremos del Intervalo considerado.

Tabla 4.3-12: Tabla de correcciones para sumar o restar a las alturas de marea en función de la presión atmosférica.

Presión Atmosférica		Corrección (m)
Hectopascales (hPa)	Milímetros de mercurio (mmHg)	
963	722	0,50
968	726	0,45
973	730	0,40
978	734	0,35
983	738	0,30
988	741	0,25

Presión Atmosférica		Corrección (m)
Hectopascales (hPa)	Milímetros de mercurio (mmHg)	
993	745	0,20
998	749	0,15
1003	752	0,10
1008	756	0,05
1013	760	0,00
1018	764	-0,05
1023	768	-0,10
1028	771	-0,15
1033	775	-0,20
1038	779	-0,25

Dado que el tamaño del dominio es pequeño, no se consideró variaciones en los valores de altura de marea en función de las coordenadas E y N según UTM 19K, por lo que se utilizó la misma condición de borde para las celdas de los bordes Norte y Poniente.

4.3.1.6.2.4.2.3 RILES

Para modelar las descargas en la bahía se consideraron las fuentes de emisión que se adjuntan en la Tabla 4.3-13, que se obtuvieron a partir de la recopilación de información de las fuentes SMA y SISS.

Cada una de las descargas fue caracterizada por un valor de caudal y concentración para cada una de las componentes acordadas: *Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Cromo Hexavalente, Mercurio, Plomo y Zinc*, además de la *Temperatura*.

Para la estimación de caudal se llevó a cabo un análisis de recurrencia de los datos registrados debido a la envergadura de los datos, obteniéndose la probabilidad acumulada para cada uno de los valores de caudales (**Figura 4.3-48**), para cada una de las fuentes de emisión. Posteriormente, se consideró como valor representativo el más cercano a la probabilidad de 50%. En cuanto al valor característico de los parámetros de calidad de agua, se observó que el número total de registros fue entre 3 y 145, por lo que se consideró el promedio aritmético como valor representativo de cada componente presente en la descarga. Así, los valores de concentraciones considerados para cada uno de los parámetros y los caudales característicos se adjuntan en la Tabla 4.3-14.

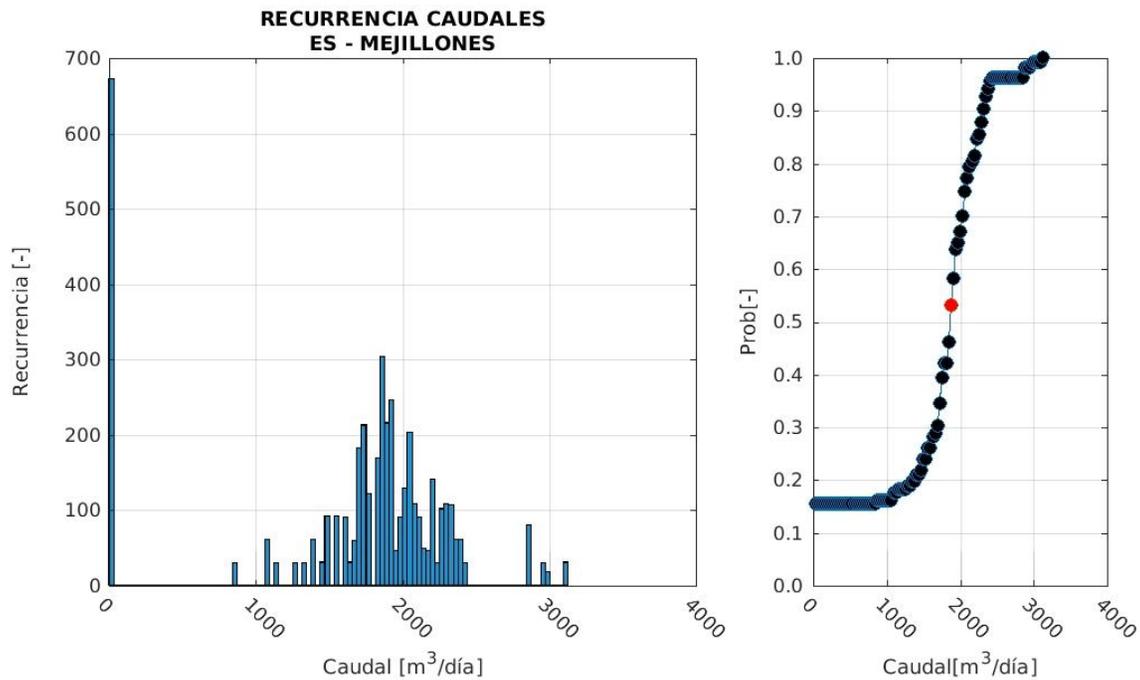


Figura 4.3-48: Análisis de recurrencia de caudales (panel izquierdo) llevado a cabo para Planta Es-Mejillones de Aguas Antofagasta S.A y probabilidad acumulada de caudales (panel derecho) en función del análisis anterior. En rojo se destaca el valor considerado como representativo de las descargas de esta fuente.

Tabla 4.3-13: Plantas asociadas a descargas en bahía Mejillones del Sur.

Razón social	Rut	Planta	Ducto	UTM Norte	UTM Este
Gas Atacama Chile S.A.	78932860-9	CENTRAL ATACAMA	CC1	7.445.744	354.735
Gas Atacama Chile S.A.	78932860-9	CENTRAL ATACAMA	CC2	7.445.744	354.735
Gas Atacama Chile S.A.	78932860-9	CENTRAL ATACAMA	NORIAS	7.445.744	354.735
Central Termoeléctrica Andina S.A.	76708710-1	CENTRAL TERMICA ANDINA	ANDINA	7.446.299	355.799
Central Termoeléctrica Andina S.A.	76708710-1	CENTRAL TERMICA ANDINA	HORNITO	7.446.299	355.799
E-CL S.A.	88006900-4	CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES	UNIDAD.1	7.445.882	355.392
E-CL S.A.	88006900-4	CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES	UNIDAD.2	7.445.882	355.392
E-CL S.A.	88006900-4	CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES	UNIDAD.3	7.445.882	355.392
Eléctrica Angamos S.A.	76004976-K	CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANGAMOS	T.ANGAMOS	7.444.843	351.959
AES Gener S.A.	76085254-6	CENTRAL TERMOELÉCTRICA COCHRANE	PUNTO 1 BAHIA MEJILLONES	7.448.928	358.830
Complejo Industrial Molydor S.A.	76016222-1	COMLEJO INDUSTRIAL MOLYNOR	MOLYNOR.C.MEJILLONES	7.449.142	359.230
Aguas Antofagasta S.A.	76418976-0	ES - MEJILLONES	ES - MEJILLONES	7.446.019	350.747
Interacid Trading Chile S.A.	78378860-8	INTERACID TRADING CHILE S.A., MEJILLONES	INTER.MEJILLONES	7.447.837	357.446
Moly-Cop Chile S.A.	92244000-K	MOLY COP CHILE PLANTA MEJILLONES	MOLY.COP	7.446.435	356.128
Corpesca S.A.	96893820-7	PLANTA MEJILLONES	C.MEJILLONES	7.446.330	354.012
Enaex Chile S.A.	90266000-3	PRILLEX AMÉRICA	PANNA.3	7.445.340	353.616
Enaex Chile S.A.	90266000-3	PRILLEX AMÉRICA	PANNA.4	7.445.340	353.616
Complejo Portuario Mejillones S.A.	96819040-7	TERMINAL 1 COMPLEJO PORTUARIO MEJILLONES	P.ANGAMOS	7.448.164	358.030

Tabla 4.3-14: Valores de concentración de parámetros, en $\mu\text{g/l}$, y caudales característicos para cada una de las descargas consideradas.

	Arsénico	Cadmio	Cobre	Cromo Total	Cromo Hexavalente	Mercurio	Plomo	Zinc	Temperatura	Q m ³ /día
CENTRAL ATACAMA									20.68	134400
CENTRAL TERMICA ANDINA	0.0020	0.1129	0.2050	0.0667	0.0500	0.0010	0.0100	0.0950	24.65	593910
CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANGAMOS	0.0037							0.0770	25.28	97680
CENTRAL TERMOELÉCTRICA COCHRANE	0.0074	0.0011	0.0197	0.0058	0.0100	0.0010	0.0100	0.0155	24.71	85388
CENTRAL TÉRMICA MEJILLONES									25.74	466860
COMLEJO INDUSTRIAL MOLYNOR	0.0071							0.2177	17.26	531
ES – MEJILLONES										1878
INTERACID TRADING CHILE S.A., MEJILLONES										28
MOLY COP CHILE PLANTA MEJILLONES									26.78	419
PLANTA MEJILLONES								0.1129		14504
PRILLEX AMÉRICA	0.0261	0.0074	0.0938	0.0509				0.0843	25.04	7720
TERMINAL 1 COMPLEJO PORTUARIO MEJILLONES	0.0025	0.1170							19.17	252

En cuanto a la modelación de cada uno de ellos, se consideró modelar como trazador cada uno de los parámetros mencionados, normalizando las concentraciones de cada componente por el mayor valor registrado en las distintas fuentes de emisión. Estos valores se destacan en verde en la Tabla 4.3-14, y corresponden a C_0 en los resultados de la modelación.

4.3.1.6.2.4.2.4 Condiciones iniciales

Como condiciones iniciales se consideraron los valores de los parámetros de la Tabla 4.3-15.

Los valores de temperatura, oxígeno disuelto y salinidad se obtuvieron a partir de promediar los registros obtenidos en las distintas campañas de terreno.

Tabla 4.3-15: Condiciones iniciales isotrópicas para el dominio considerado.

Parámetro	ID Modelo	Valor	Unidad
Altura superficial del agua	HEIGHT	0,69	msnm
Magnitud de viento	WIND_SPEED	0.0	m/s
Dirección de viento	WIND_DIR	0.0	°
Temperatura del agua	WTR_TEMP	13.8	°C
Salinidad	SALINITY	35.0	mg/l
Diatomeas	FDIAT	0.0	µg/L
Cianobacterias	CYANO	0.0	µg/L
Sólidos suspendidos totales en sedimento	SSOL1_SED	0.0	mg/L
Oxígeno disuelto	DO	9.0	mg/L
Nitrato	NO3	0.0	mg/L
Fósforo	PO4	0.0	mg/L
Sílice	SiO2	0.0	mg/L
Sólidos suspendidos totales	SSOL1	0.0	mg/L
Amonio	NH4	0.0	mg/L

4.3.1.6.2.5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas desarrolladas para bahía Mejillones. Los resultados son entregados considerando un análisis de la hidrodinámica del sistema en el tiempo, representando la componente física del sistema. Luego se entregan los resultados de la dinámica de trazadores utilizados en la modelación de componentes químicas de RILES.

4.3.1.6.2.5.1 Campo de velocidades y tiempos de retención en la Bahía Mejillones

De los resultados del modelo, se consideraron la capa promedio, que entrega los valores de las componentes promediadas en la vertical, y la capa superficial. Estos valores se separaron en periodos estacionales de verano, otoño, invierno y primavera, que a su vez se separaron de manera sinóptica en rangos horarios 00:00-06:00 hr, 06:00-12:00 hr, 12:00-

18:00 hr y 18:00-24:00 hr. En las Figura 4.3-49 y Figura 4.3-50 se adjuntan los resultados de campos de velocidad, para las capas promedio y superficial respectivamente, representados por vectores blancos en cada una de las subfiguras, mientras que en escala de colores se adjuntan los valores de magnitud de velocidad.

De la Figura 4.3-49 se destaca una zona de baja circulación presente durante todo el año en la zona sur de la bahía, donde en las estaciones de invierno y primavera, se ve acrecentada la diferencia de magnitudes de velocidad, al producirse una corriente W-E en la zona de la saliente ubicada en las coordenadas 345962 E,7450062 N. En la estación de verano se observó una corriente NE-SW en la zona costera que se mantuvo en todos los rangos horarios, siendo más clara entre las 06:00 hr y las 18:00 hr. Entre las 18:00 hr y las 24:00 hr se observó la presencia de 2 circulaciones que modifican el patrón de corrientes observado en el rango horario anterior. En otoño se ve una disminución de la corriente costera NE-SW al tomar mayor relevancia el campo de velocidades proveniente del W por la saliente de tierra (Punta Cuartel). En invierno se destaca la desaparición de la corriente costera SW debido a la predominancia del flujo E. De esta forma, aparece solo un flujo E-NE que lleva las aguas desde la bahía al norte del dominio. En primavera, nuevamente aparece la corriente costera NE-SW que decae en importancia en el rango horario 18:00 hr y 24:00 hr. En cuanto al comportamiento superficial observado, en la Figura 4.3-50 se destaca un movimiento S-N en los rangos horarios 00:00-12:00 hr y 18:00-24:00 hr fuertemente influenciado por el viento presente en el área de estudio, mientras que en el rango horario 12:00 – 18:00 hr se observó un cambio en el patrón de flujo, al aparecer una corriente con una fuerte componente N-S.

Por otro lado, se calculó un tiempo de residencia de las partículas de agua en una celda del dominio en el plano x-y, al considerar la expresión:

$$TR = \left(\frac{V_x}{dx} + \frac{V_y}{dy} \right)^{-1}$$

La Figura 4.3-51 y Figura 4.3-52 grafican los resultados obtenidos de este parámetro para el dominio en estudio. Al igual que para el campo de velocidades, se llevó a cabo un análisis temporal al considerar las distintas estaciones del año y rangos horarios para cada una de ellas, en las capas promedio y superficial arrojadas por la modelación.

De los resultados de la capa promedio (Figura 4.3-51), se destaca la presencia de tiempos de retención desde 0 a 10 horas, donde los mayores valores se obtuvieron en la zona de baja circulación presente en el sector sur de bahía mejillones. Este patrón de altos valores del tiempo de residencia también se observó a lo largo de la costa de la bahía. En cuanto al comportamiento por rango horario, entre las 06:00 hr y 12:00 hr se tuvo los menores valores en cada una de las estaciones de estudio, representando el periodo más calmo de la bahía, mientras que entre las 12:00 y 18:00 hr se obtuvieron los menores valores de este parámetro. Al comparar estacionalmente los resultados obtenidos, se observa un comportamiento general donde los mayores tiempos de residencia se tuvieron en la estación de otoño, disminuyendo de manera sostenida hasta primavera, para aumentar nuevamente en verano.

En cuanto a los resultados de la capa superficial (Figura 4.3-52), se observó un patrón general donde los mayores valores se obtuvieron en la costa, entre las 00:00 hr y 12:00 hr. Entre las 12:00 hr y 24:00 hr se observó una disminución de los tiempos de residencia, que están asociados al aumento en las magnitudes de velocidad del viento. En cuanto al comportamiento estacional, en invierno se destaca un aumento en la zona aledaña a la costa con altos valores de tiempos de residencia, mientras que en verano se observó una zona reducida con altos valores de este parámetro.

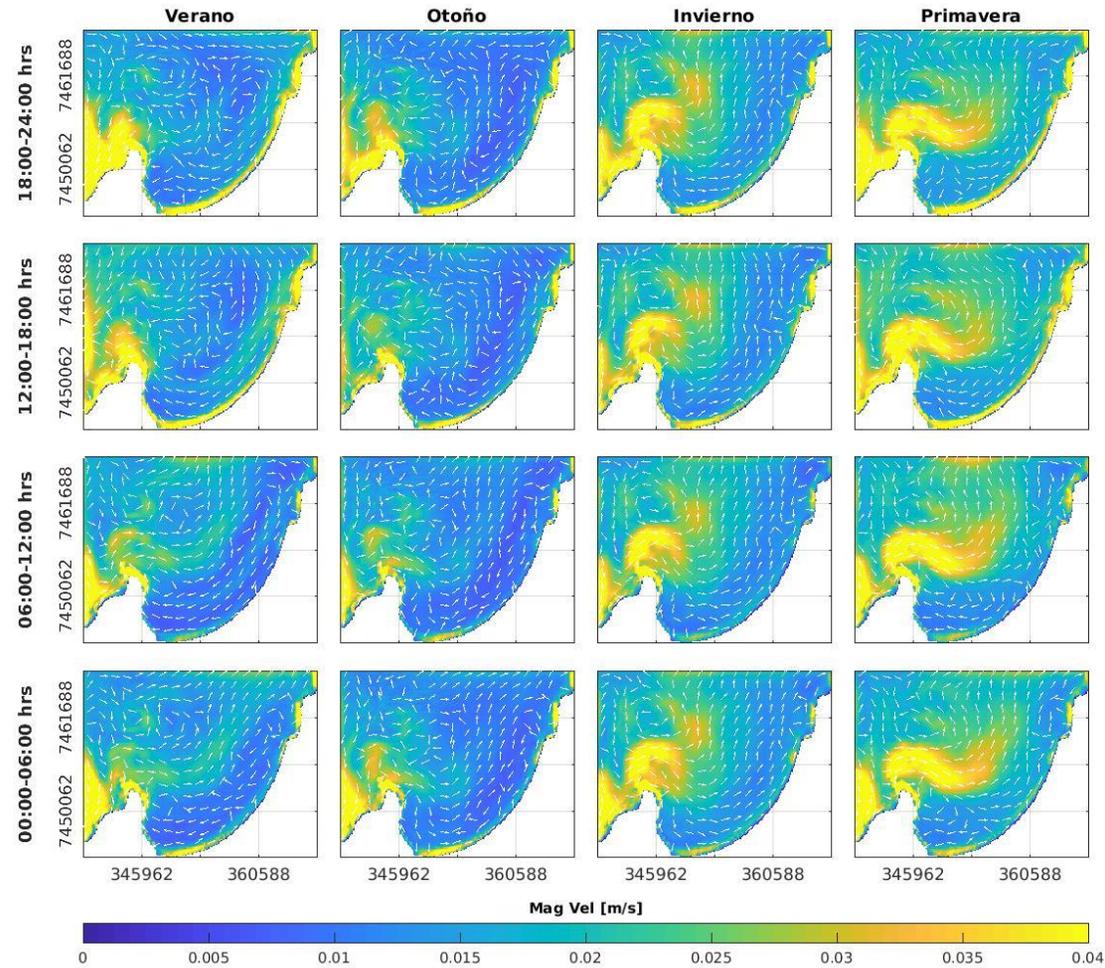


Figura 4.3-49: Campo de velocidades medias en bahía Mejillones, separadas por estación y rango horario, para capa promediada en la vertical.

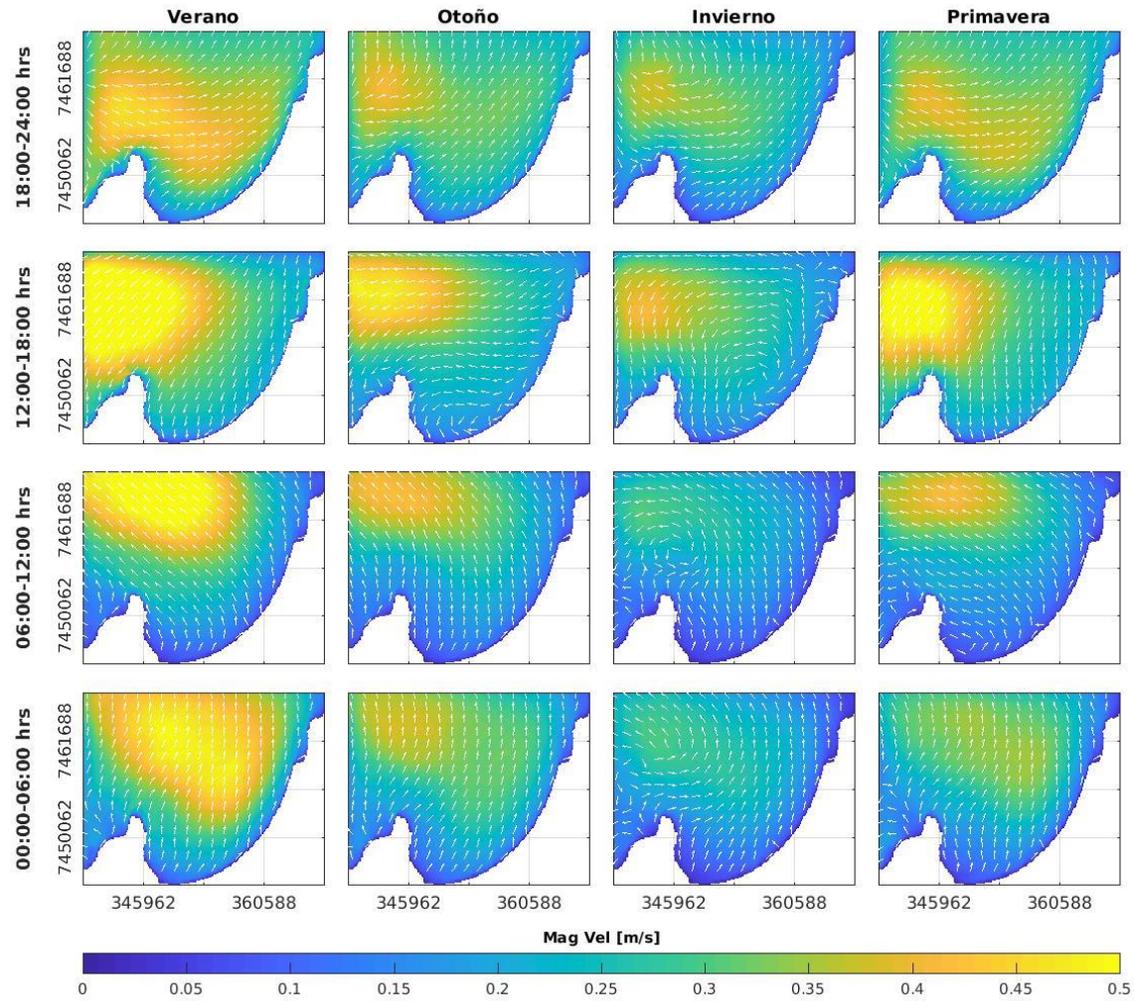


Figura 4.3-50: Campo de velocidades medias en bahía Mejillones, separadas por estación y rango horario, para capa superior del dominio.

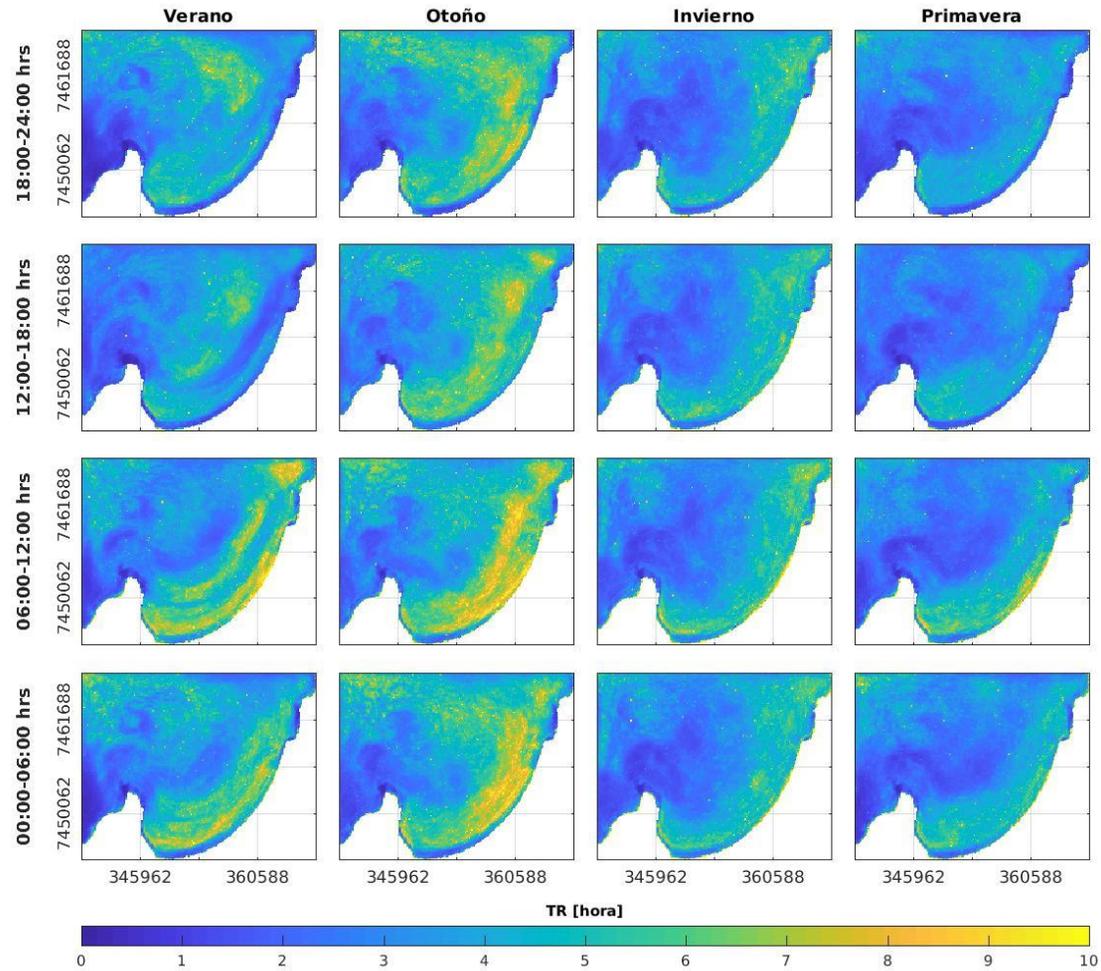


Figura 4.3-51: Tiempos de residencia obtenidos para la capa promediada en la vertical, separados por estación y rango horario.

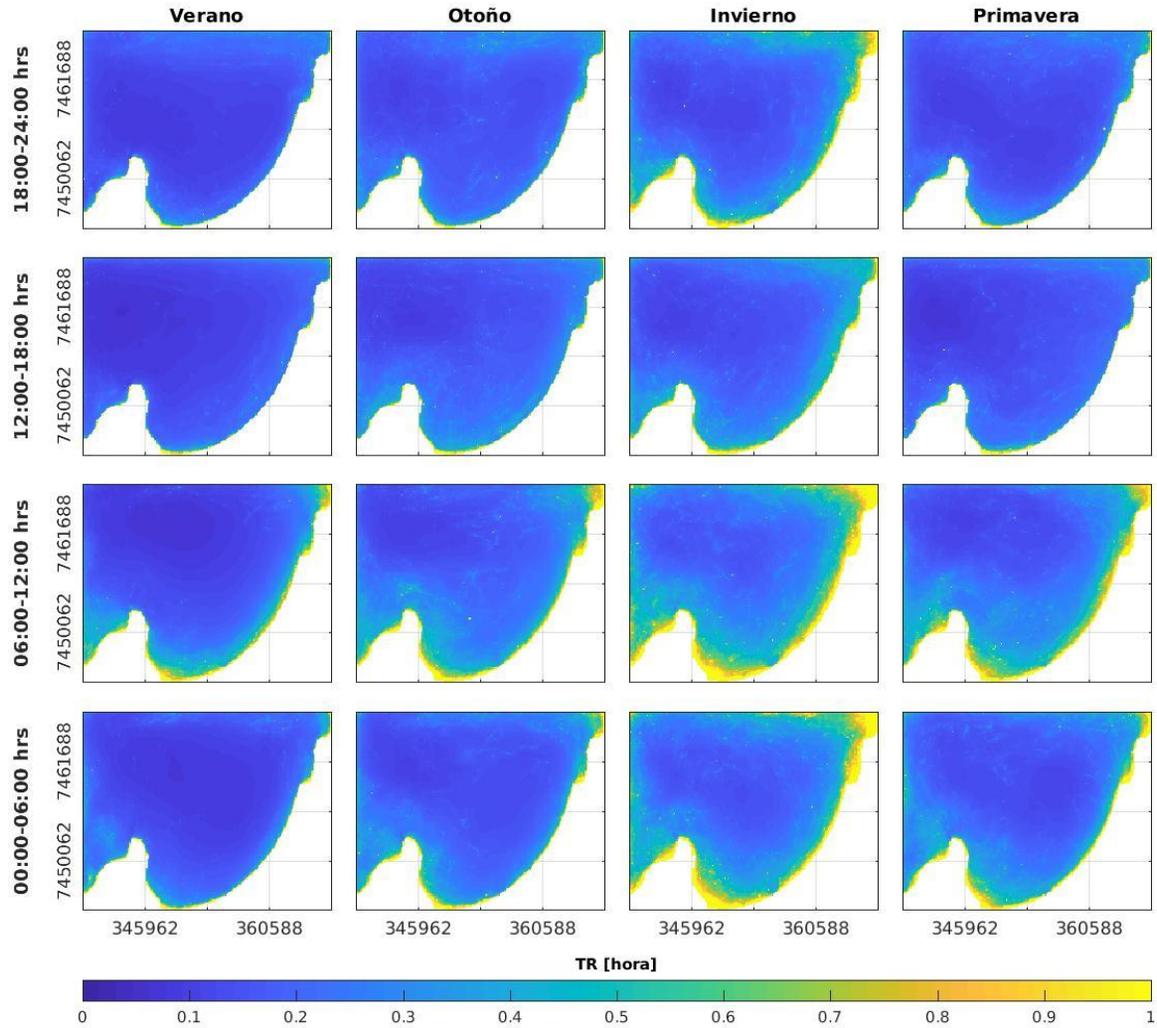


Figura 4.3-52: Tiempos de residencia obtenidos para la capa superficial del dominio, separados por estación y rango horario.

4.3.1.6.2.5.2 Distribución de componentes químicas de RILES en la bahía.

De los resultados de las simulaciones, se promedió anualmente la concentración presente en las distintas capas obtenidas, superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio, para cada una de las componentes de la Tabla 4.3-14, entregando un mapa de concentración normalizada (C/C_0) para el arsénico (Figura 4.3-53), cadmio (Figura 4.3-54), cobre (Figura 4.3-55), cromo total (Figura 4.3-56), cromo hexavalente (Figura 4.3-57), mercurio (Figura 4.3-58), plomo (Figura 4.3-59) y zinc (Figura 4.3-60).

Los elementos arsénico y zinc, presentaron un menor valor de concentración en la bahía en comparación a la distribución de concentración alcanzada por el resto de las componentes estudiadas. Además, se destaca un comportamiento general con las mayores áreas de altas concentraciones en la capa superficial de estudio, mientras que la de fondo y promedio solo presentan un área reducida con mayores concentraciones en la costa.

En cuanto a la distribución espacial de cada uno de los elementos, se desprende que depende fuertemente del punto de descarga (ubicación) de cada uno de ellos, debido a que se encuentran en la zona de baja circulación descrita en el acápite anterior (Figura 4.3-49) y con altos tiempos de residencia.

Arsénico

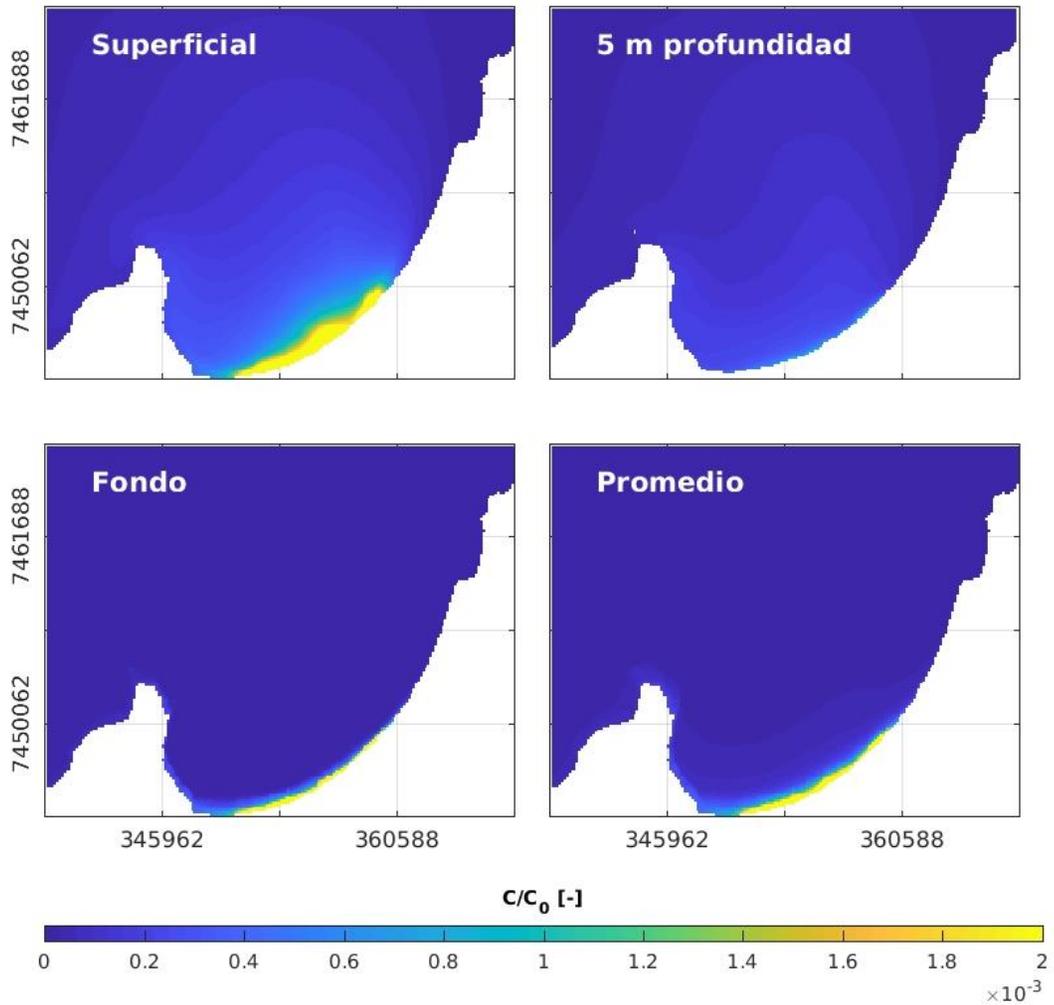


Figura 4.3-53: Concentración normalizada promedio anual de arsénico para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Cadmio

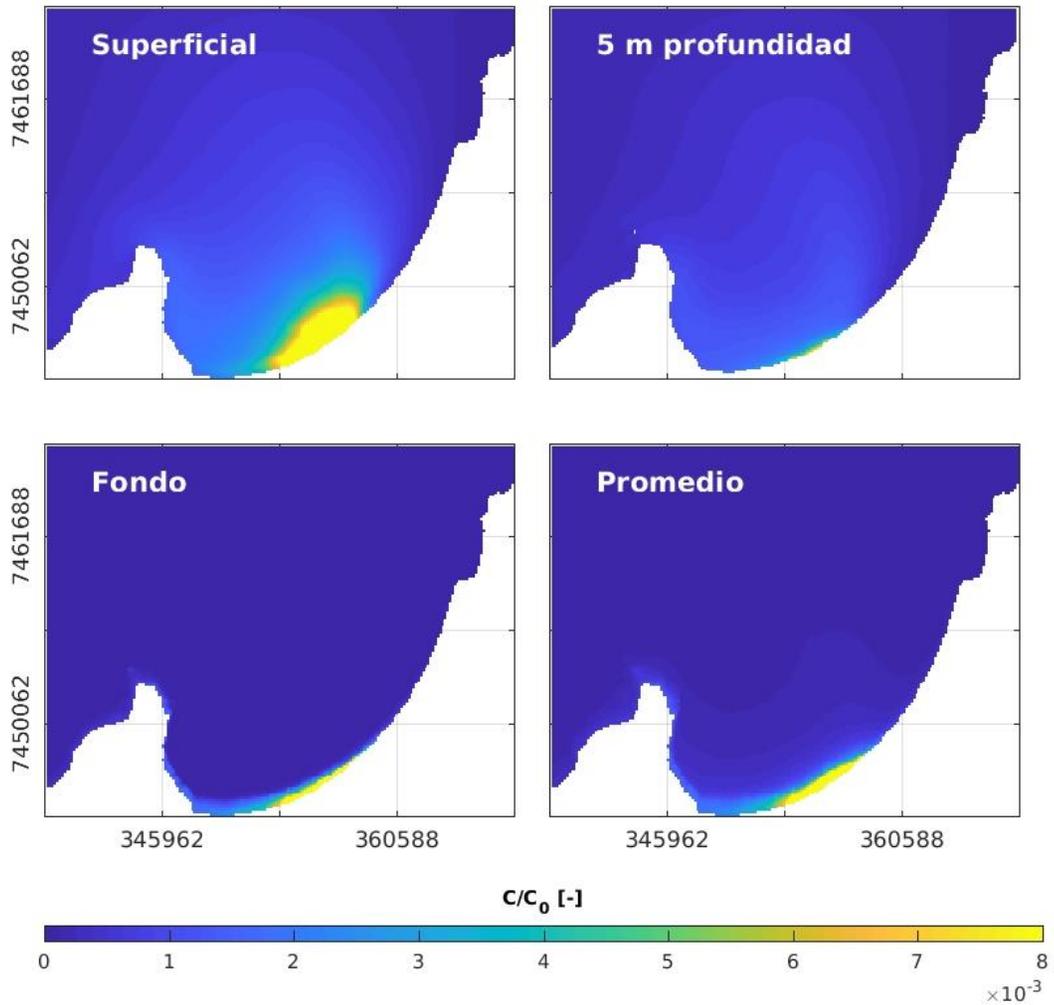


Figura 4.3-54: Concentración promedio anual de cadmio para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Cobre

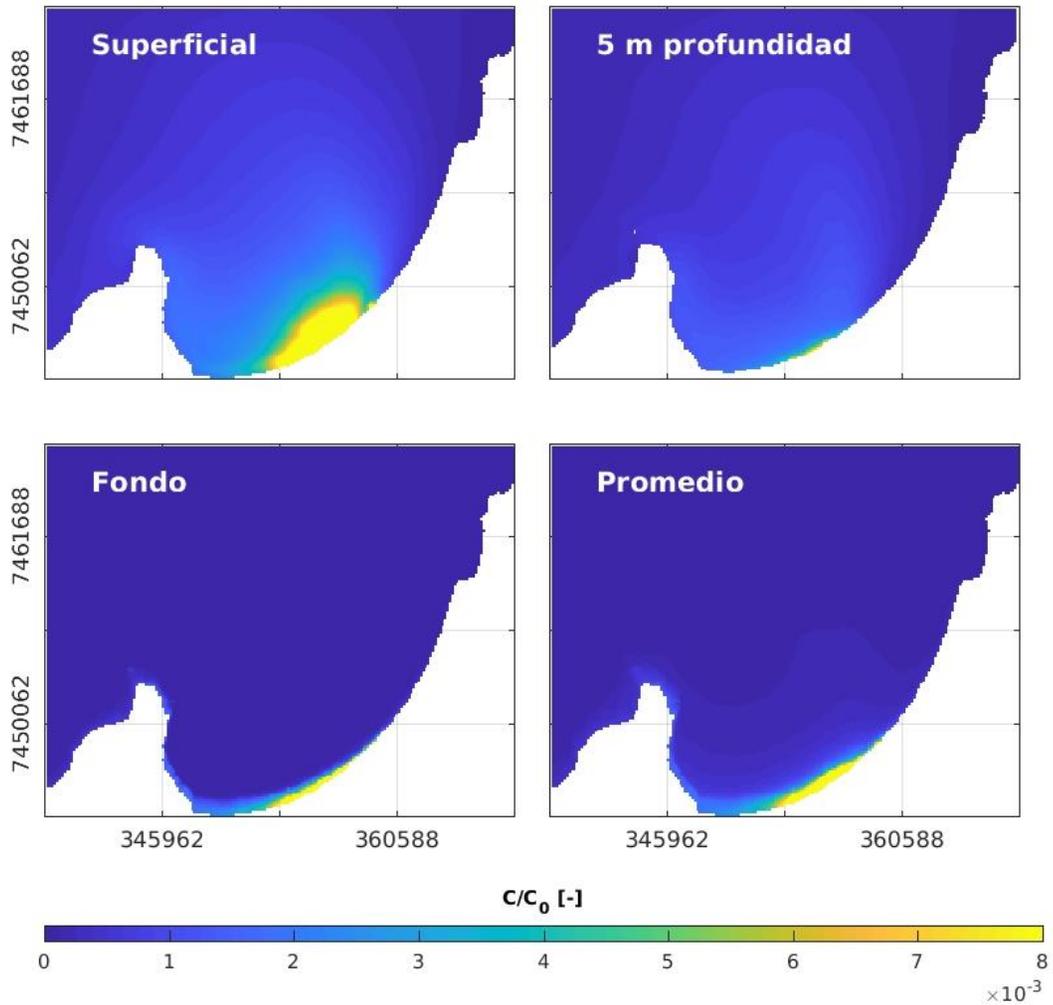


Figura 4.3-55: Concentración promedio anual de cobre para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Cromo tot

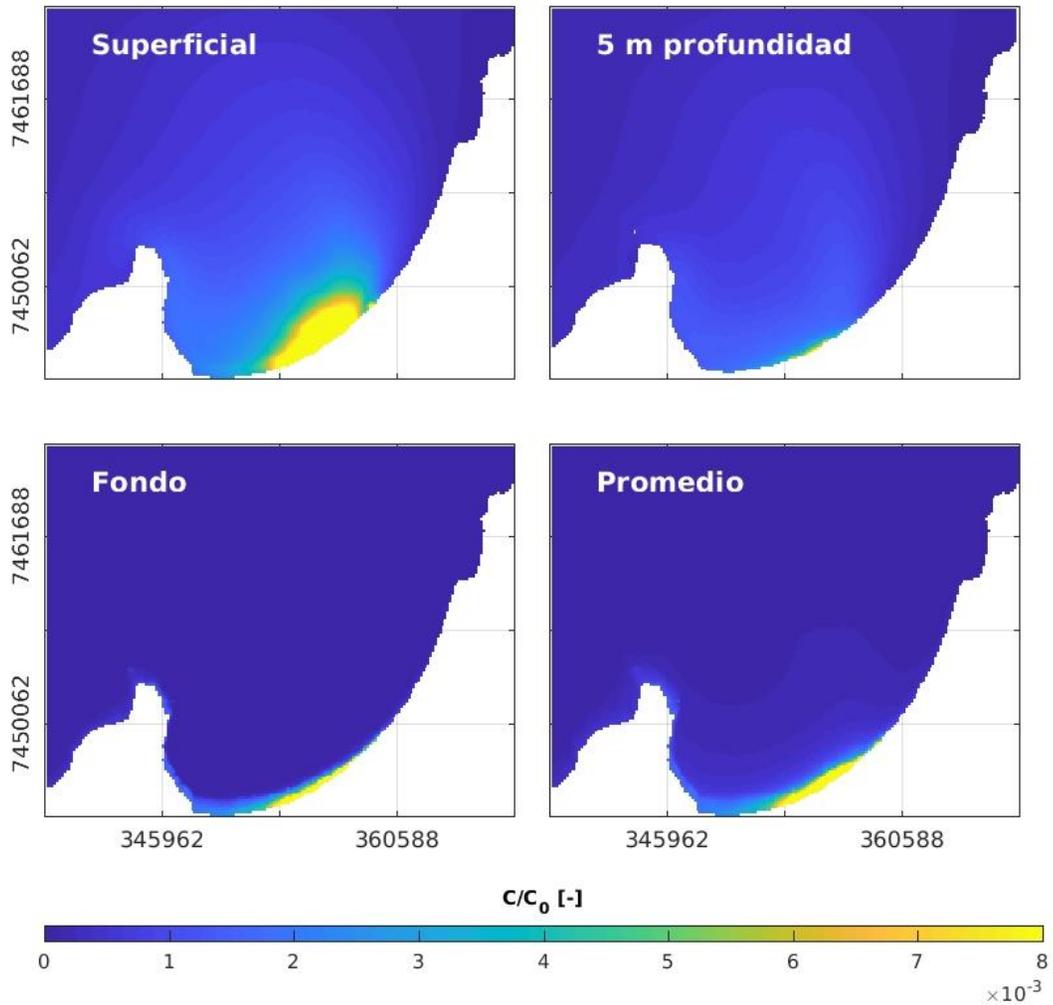


Figura 4.3-56 Concentración promedio anual de cromo total para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Cromo hexa

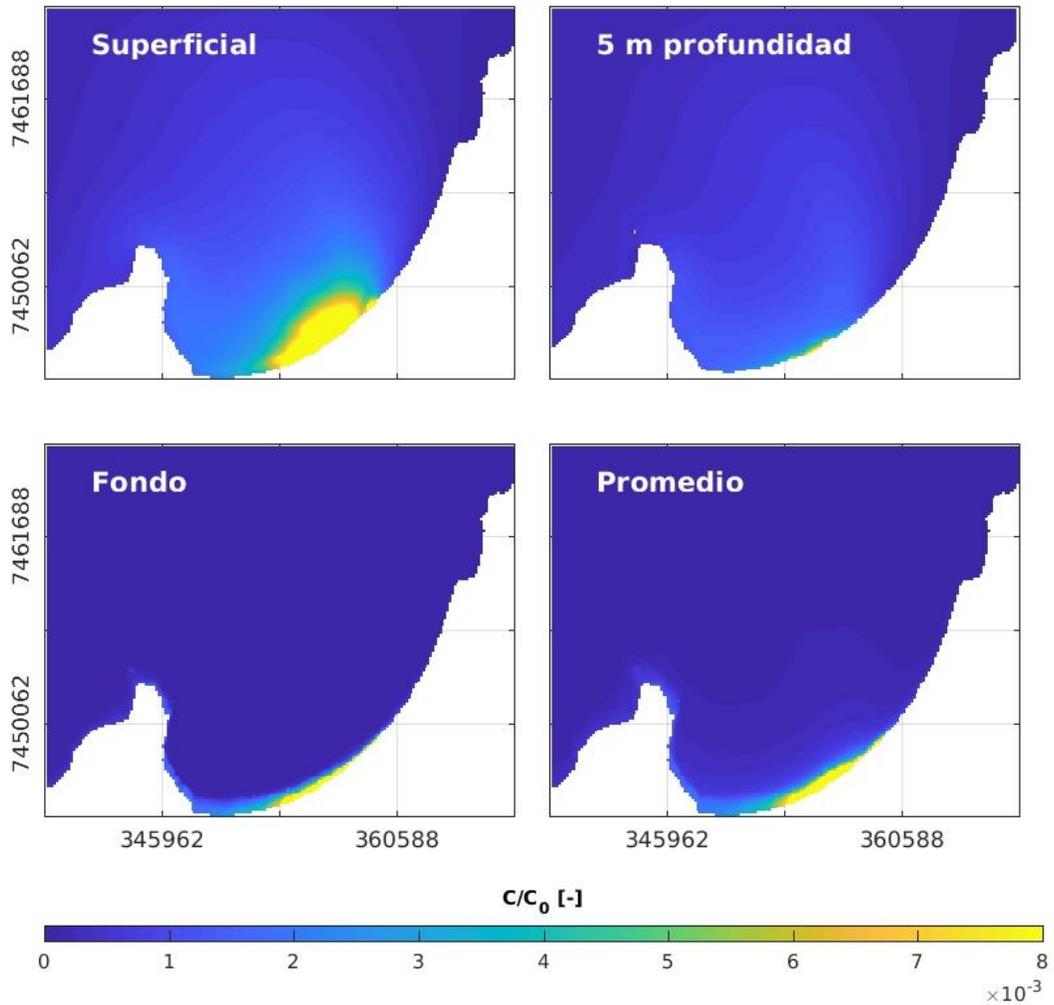


Figura 4.3-57: Concentración promedio anual de cromo hexavalente para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Mercurio

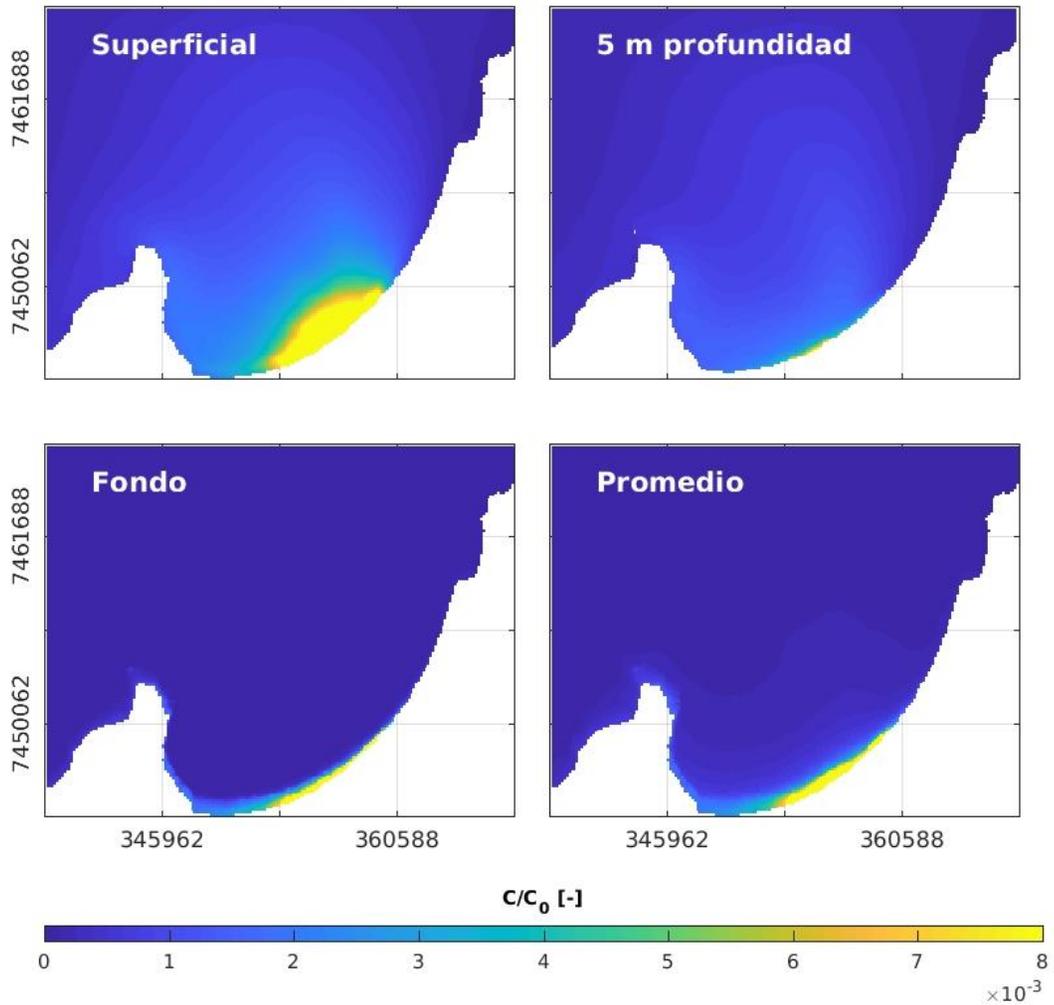


Figura 4.3-58: Concentración promedio anual de mercurio para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

Plomo

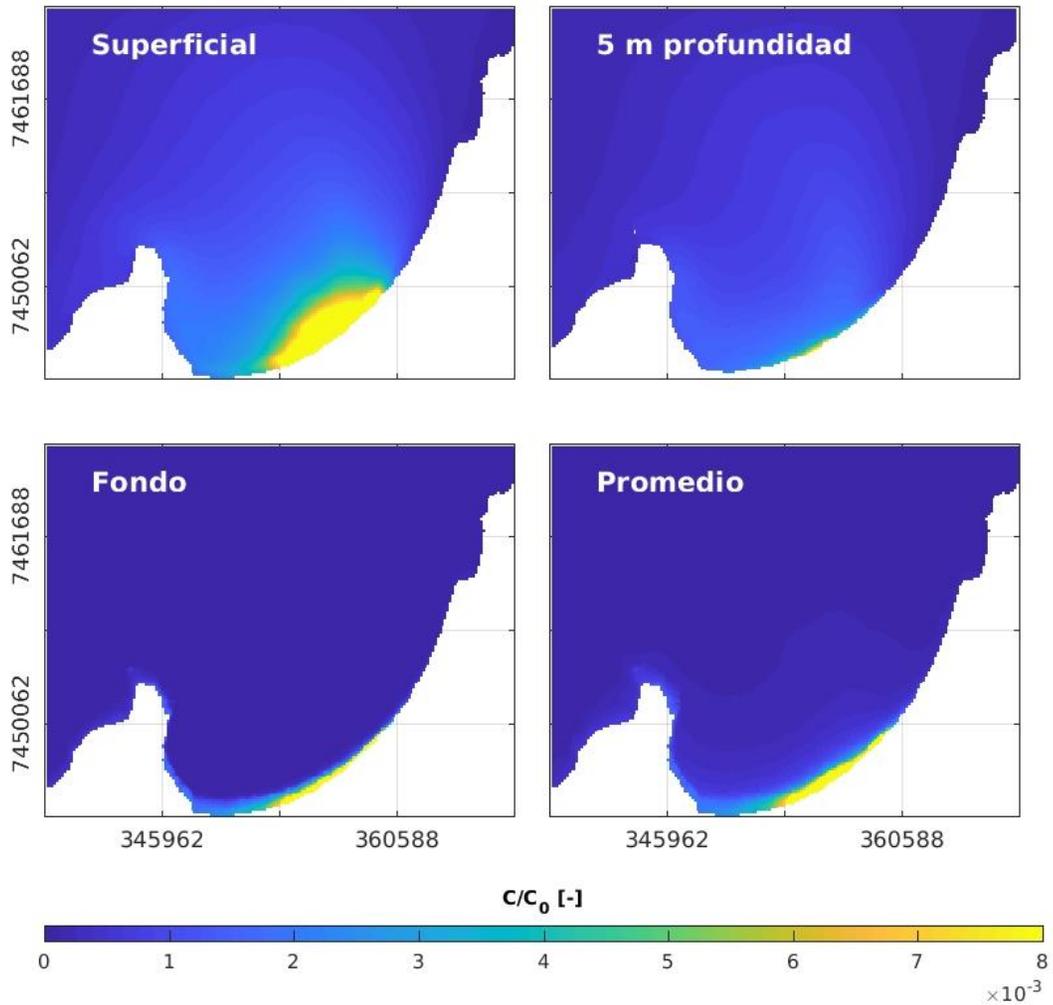


Figura 4.3-59: Concentración promedio anual de plomo para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

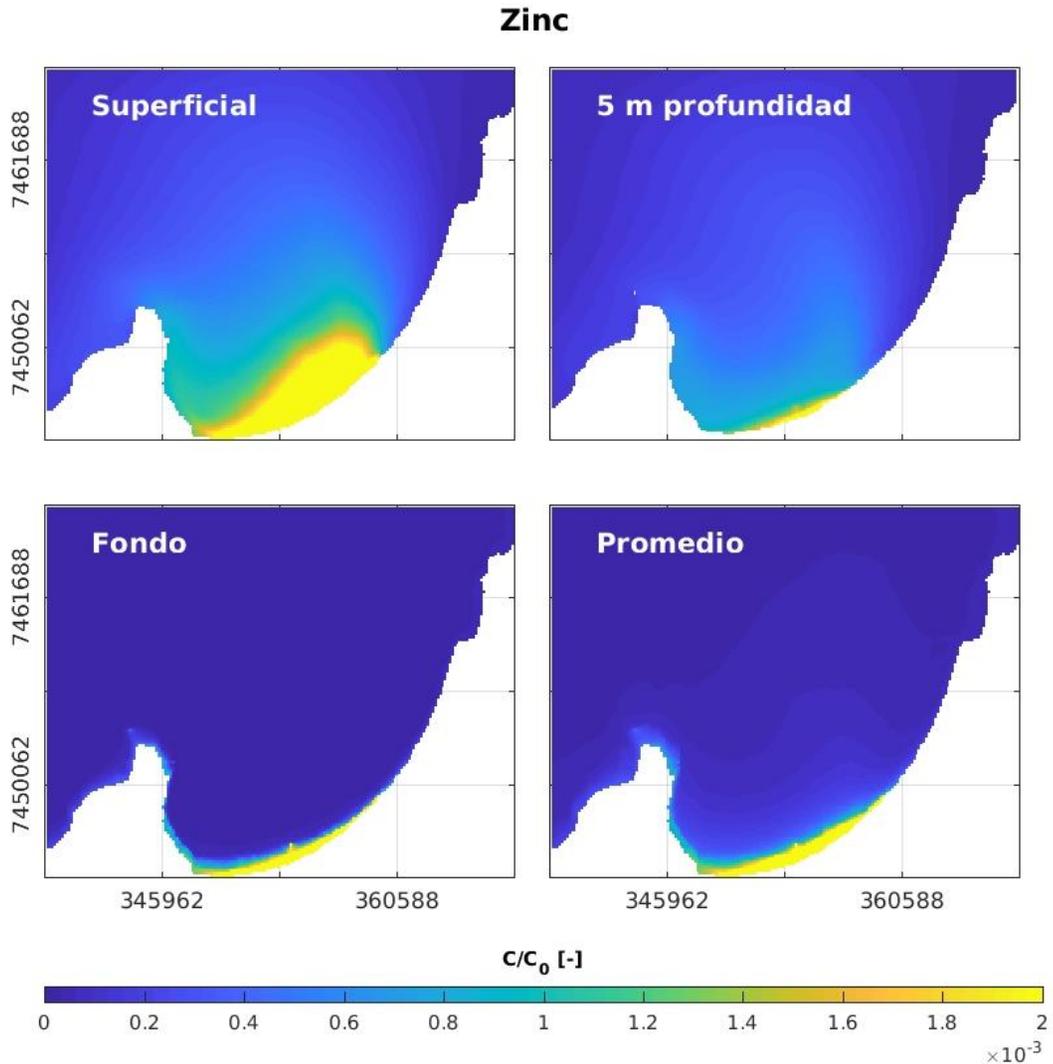


Figura 4.3-60: Concentración promedio anual de zinc para las capas superficial, a 5 m de profundidad, fondo y promedio.

4.3.1.6.2.6 *Discusión y conclusiones de la hidrodinámica y flujo de contaminantes*

- Se observó de los resultados de la capa promedio, una zona de baja circulación presente durante todo el año, correspondiente a la zona sur de la bahía, donde en las estaciones de invierno y primavera se ve acrecentada esta diferencia.
- Se observó de los resultados de la capa promedio, la presencia de una corriente costera NE-SW que desaparece solo en la estación de invierno, al aumentar la corriente E proveniente de la saliente de tierra ubicada al E de la bahía Mejillones.
- Los resultados del tiempo de residencia se condicen con los resultados del campo de velocidades, existiendo altos valores de este parámetro a lo largo de la costa.

- Los tiempos de residencia del verano y otoño son más altos en comparación a los obtenidos en invierno primavera, por lo que la condición de limpieza de la bahía es más lenta en estos periodos de tiempo.
- El campo de velocidades de la capa superficial mostró una gran dependencia del viento, teniendo un comportamiento similar durante el año.
- Los tiempos de residencia promedio de la capa superficial mostraron valores altos en la zona cercana a la costa, por lo que los estratos inferiores presentan menores tasas de limpieza que los superiores.

4.3.1.6.3 Análisis de los efectos por medio de bioensayos

Las evaluaciones de riesgo ambiental han alcanzado en los últimos años gran importancia, principalmente debido al gran número de contaminantes que son potencialmente dañinos y que pueden afectar directa o indirectamente el funcionamiento de un ecosistema. Para evaluar el riesgo ambiental, en el último tiempo se han creado metodologías, donde se evalúa la exposición de los organismos a un contaminante y la evaluación de los efectos que derivan de ella (Larraín, 1995). Uno de ellos corresponde a los bioensayos, los cuales se utilizan para estudio del efecto tóxico de los agentes o mezclas complejas sobre organismos vivos, expuestos a determinadas concentraciones durante un periodo de tiempo determinado (Larraín, 1995); generándose una relación dosis-respuesta de la sustancia, la cual es comparada respecto a un estándar, el cual no ha sido expuesto a la sustancia.

Los bioensayos, se pueden clasificar según su tiempo de exposición del organismo a la sustancia, como:

- Agudo: ocurre dentro de un periodo corto (minutos, horas o algunos días) en relación con el periodo de vida del organismo de ensayo (Castillo, 2004).
- Crónico: ocurre durante un periodo relativamente largo de exposición (una porción significativa de la vida del organismo, >10%) (Castillo, 2004).

Entre los bioensayos agudos se encuentra el LC_{50} (concentración letal del 50% de las especies analizadas), y entre los bioensayos crónicos el LOEC (concentración mínima con efecto observado) y NOEC (concentración máxima sin efecto observado) (Larraín 1995).

En el presente estudio, la totalidad de bioensayos fueron realizados en el laboratorio de CICITEM liderado por la Dra. Mariella Rivas.

Los resultados obtenidos permiten determinar la presencia y concentración de xenobióticos presentes en el ecosistema en estudio para comprobar que no existe generación de un efecto inaceptable sobre un sistema ecológico en particular.

Se han considerado los “end-point” ecotoxicológicos, tanto agudos como crónicos (LC_{50} , EC_{50} , NOEC, LOEC) de las especies locales de relevancia ecológica, mediante bioensayos en, al menos, tres niveles tróficos.

Para los bioensayos de toxicidad aguda (letal) con determinación de LC_{50} (matriz de agua-elutriado de sedimento) se consideró utilizar en un primer instante como representante de

zooplancton a la especie *Tisbe longicornis*, ampliamente descrito su uso en bioensayos (Larraín et al. 1998). Sin embargo, esta especie no se encuentra presente o descrita para las costas de Antofagasta. Una de las opciones fue utilizar *Brachionus plicatilis* (rotífero), sin embargo, esta especie fue aislada de la laguna Inca-Coya y solo tolera 10 g/L de NaCl.

En consecuencia, para dar fortaleza a los datos se adicionó la especie *Dunaliella tertiolecta* en matriz de elutriado, permitiendo reforzar los bioensayos de toxicidad crónica (subletal).

Con respecto a los bioensayos de toxicidad crónica se reemplazó la especie *Mytilus chilensis* (zoobentos) por la especie *Perumytilus purpuratus*, debido a la baja presencia del organismo en la zona de Antofagasta, y particularmente de la talla necesaria de juveniles. En relación con este punto no fue posible realizar los bioensayos con la especie *Monocorophium insidiosum* (anfípodo) no presente ni descrita para la región.

A modo de resumen, la Tabla 4.3-16 muestra los bioensayos que se desarrollaron en el presente estudio.

Tabla 4.3-16 Especies y efecto evaluado en los bioensayos desarrollados en CICITEM

Tipo Bioensayo	Matriz	Especie	Efecto evaluado
Toxicidad crónica (subletal) con determinación de CE50 y/o NOEC y LOEC y Toxicidad aguda (letal) con determinación de LC50	Agua marina y sedimento	<i>Isochrysis galbana</i> (fitoplancton)	Inhibición de crecimiento
		<i>Dunaliella tertiolecta</i> (fitoplancton)	Inhibición de crecimiento
		<i>Macrocystis pyrifera</i> (macroalga)	Inhibición en la germinación de esporas
		<i>Perumytilus purpuratus</i> (zoobentos)	Efectos en oclusión de las valvas (OC), retracción del manto (RT), formación del biso (Biso)
		<i>Emerita analoga</i> (crustáceo, infauna)	Mortalidad

Los bioensayos fueron realizados en elutriado de sedimentos debido a la factibilidad técnica principalmente por los requerimientos de espacio y el menor volumen de muestra requerido para las réplicas. Se tomaron muestras de sedimento en 4 puntos a lo largo de la bahía. La Tabla 4.3-17 y Figura 4.3-61 dan cuenta de la ubicación geográfica de tales muestras, además de las condiciones de pH y Redox a las que se encuentran.

Tabla 4.3-17 Ubicación y características de las muestras de sedimento extraídas en bahía de Mejillones del sur, para la realización de bioensayos de exposición al medio.

Punto	Fecha Muestreo	Coordenadas UTM		Temperatura (°C)	Redox (mV)	pH (-)
		Este (m)	Norte (m)			
BIO-1	18-01-2018 13:30	348.647	7.445.698	14,00	-10,33	6,93
BIO-2	18-01-2018 13:00	351.430	7.445.772	14,00	-34,27	6,94
BIO-3	18-01-2018 12:13	355.047	7.446.903	14,40	-72,19	6,58
BIO-4	18-01-2018 11:04	359.003	7.449.848	14,20	-71,19	5,93

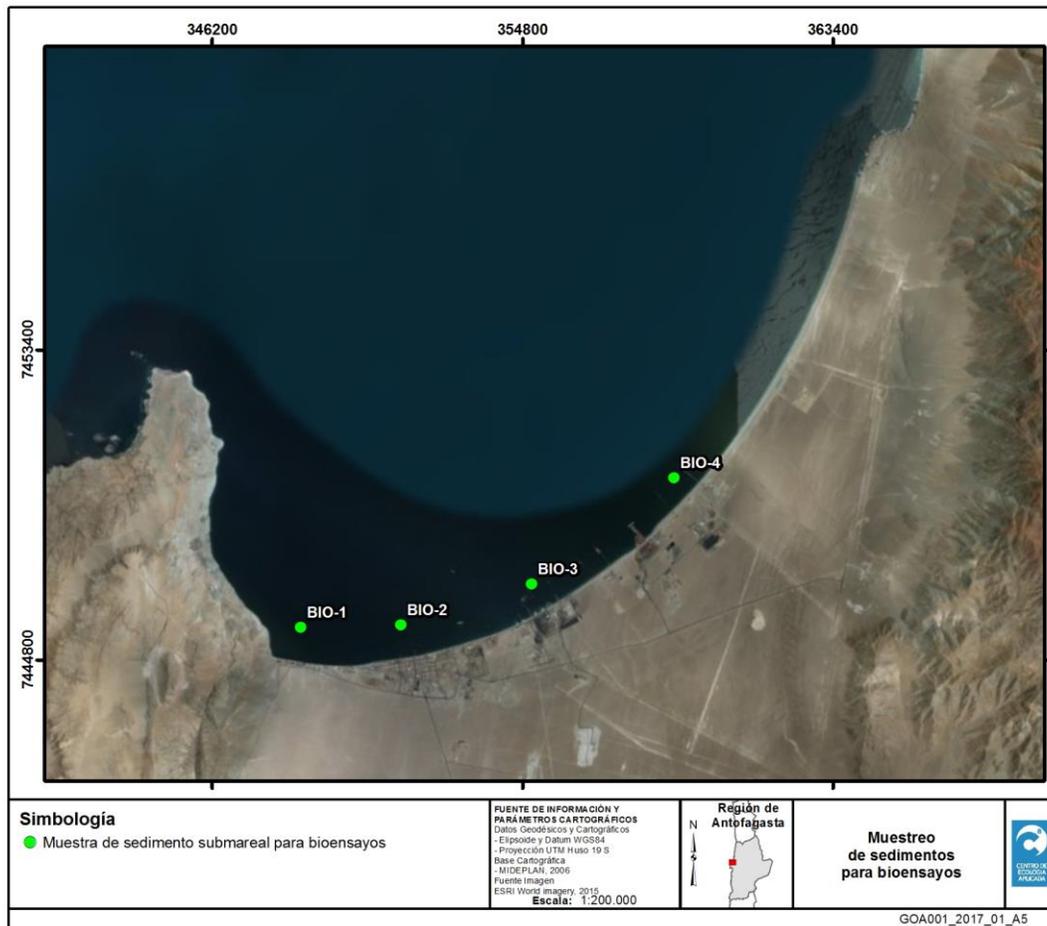


Figura 4.3-61 Ubicación geográfica de las muestras de sedimento extraídas en bahía de Mejillones del sur, para la realización de bioensayos de exposición al medio.

Respecto a las dosis empleadas para los diferentes metales, actualmente existe poca literatura de las especies utilizadas, y solo en casos particulares de tolerancia a algunos metales, por ende, considerando los fenómenos de especiación de los organismos y la adaptabilidad que presentan al ambiente en el cual se encuentran inmersos, se seleccionaron concentraciones más altas que los promedios históricos detectados en el ambiente como concentraciones máximas a utilizar, para visualizar mejor los efectos en los organismos siendo capaces de determinar su IC50 y LC50. Por ejemplo, en el caso de *Emerita análoga*, Iannacone y Alvaríño (2003) reportan que se obtiene un 100% de mortalidad utilizando 25.60 µg/L de Hg, a diferencia en los bioensayos realizados en nuestro estudio se obtuvo un 100% de mortalidad con 0.25 mg/L de Hg indicando tolerancia del organismos a concentraciones mucho más alta de este metal.

A continuación, se presentan los resultados de los bioensayos estandarizados. Para mayor detalle de los procedimientos estadísticos y los resultados individuales por endpoint y muestra, se adjunta el Informe Consolidado de todos los bioensayos en **Anexos digitales, 3_OE3_Diagnostico_ambiental, 1_Bioensayos, Resultados.**

4.3.1.6.3.1 *Isochrysis galbana* (Fitoplancton)

Para realizar los bioensayos con *Isochrysis galbana* se utilizó la norma chilena NCh2706: "Calidad de agua – Bioensayo de inhibición de crecimiento en algas en agua dulce con *Selenastrum capricornutum* (Raphidocelis subcapitata) y de US-EPA, el método 1003.0: Green Alga, *Selenastrum capricornutum*, growth test; chronic toxicity.

Se estimó el porcentaje de inhibición en base al cálculo de la tasa de crecimiento poblacional estimada entre las 0 y 96 horas. Además, se estimó:

1. La concentración porcentual de la muestra que disminuye en un 50% la tasa de crecimiento poblacional con respecto al control (IC50) según la fórmula:

$$ICp = C_j + [M_1(1-p/100) - M_j] \frac{(C_{(j+1)} - C_j)}{(M_{(j+1)} - M_j)}$$

2. La menor concentración ensayada a la cual estadísticamente hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (LOEC).
3. La mayor concentración ensayada a la cual estadísticamente no hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (NOEC).

Muestras en sales metálicas

Se utilizaron 7 sales y un cultivo control con n=3. Además, se evaluó la eficiencia fotosintética (QY) y pH durante todo el periodo de crecimiento.

La concentración de sales utilizada en cada muestra se presenta en la Tabla 4.3-18, y los resultados finales con este organismo se presenta en la Tabla 4.3-19.

Tabla 4.3-18 Concentración de sales utilizadas en *I. galbana*.

Elemento	Concentraciones en mg/L									
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
As (As ₂ O ₃)	0,1	0,25	0,5	1	2	3	9	18	25	32
Cd (CdCl ₂ ·H ₂ O)	0,1	0,1	0,3	0,5	1	2	2	4	5	5,5
Pb (Pb(NO ₃) ₂)	0,3	0,5	0,8	1	2	3	9	18	25	32
Cr (K ₂ Cr ₂ O ₇)	0,1	0,25	0,5	1	2	4	6	8	-	-
Zn (ZnCl ₂)	0	0,03	0,1	0,1	1	10	20	50	-	-
Cu (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	0,3	0,5	1	2	5	8	15	23	35	-

Elemento	Concentraciones en mg/L									
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Hg (HgCl ₂)	0	0,1	0,2	0,3	1	1	1	2	2	-

Tabla 4.3-19 Resultados de los endpoint ecotoxicológicos realizados en *I. galbana*.

Endpoint	Concentración en mg/L						
	As	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Hg
IC50-96 h	2,50	*	2,23	2,10	0,14	0,25	0,05
LOEC-96h	1,00	0,05	2,50	0,25	1,00	0,50	0,10
NOEC-96h	0,25	*	2,00	0,10	0,10	0,25	0,01

*:Para Cd no se pudo determinar una IC50 a las 96h ya que todas las concentraciones utilizadas tuvieron una alta letalidad. A la mínima concentración utilizada igual a 0,05 mg/L se determinó un % de inhibición igual a 86%.

Muestras en sedimento

Los resultados obtenidos para las muestras de sedimento se detallan a continuación. El elutriado se obtuvo según el protocolo descrito por Dinnel y Strober (1985).

Se evaluó el crecimiento de *I. galbana* en control y en las muestras cada 24 h. Para el sedimento del Punto 1 se obtuvieron 90.625 cél/mL. Para los Puntos 2, 3 y 4 se obtuvieron 30.625, 44.375 y 4.375 cél/mL a las 96h (Figura 4.3-62A). La densidad celular a las 96h se detalla en la Figura 4.3-62B. Existen diferencias significativas con respecto al control en todas las muestras (puntos 1, 2, 3 y 4 equivalen a las muestras Bio-1, Bio-2, Bio-3 y Bio-4 respectivamente).

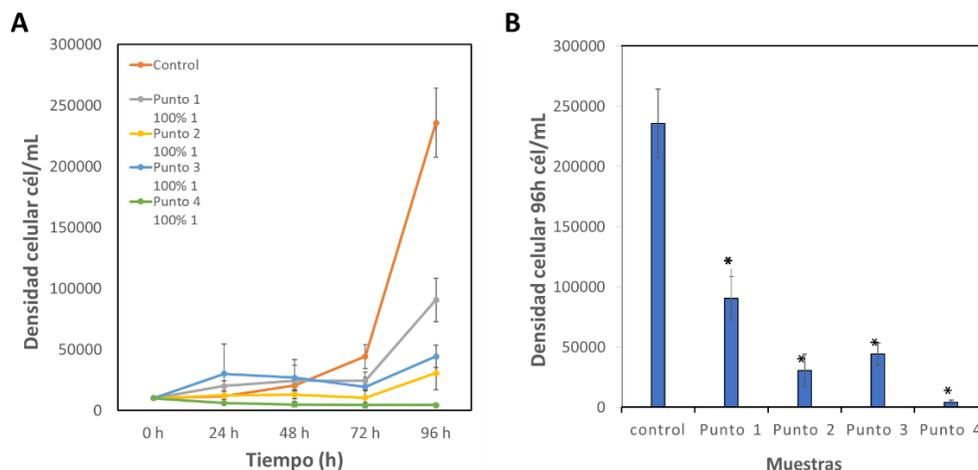


Figura 4.3-62 Crecimiento de *I. galbana* a 96h en presencia de elutriado de muestras de sedimento. *, representan diferencias significativas con respecto al control. Número de réplicas corresponde a 4.

En base a los resultados anteriores la μ -96h para los puntos 1, 2, 3 y 4 corresponde a 0,73; 0,35; 0,4 y -0,31, respectivamente. El porcentaje de inhibición obtenido para los mismos puntos corresponden a Punto 1 igual a 30,69%, Punto 2 igual a 66,68%, Punto 3 igual a 61,99% y Punto 4 igual a 129,69% (Figura 4.3-63A y B).

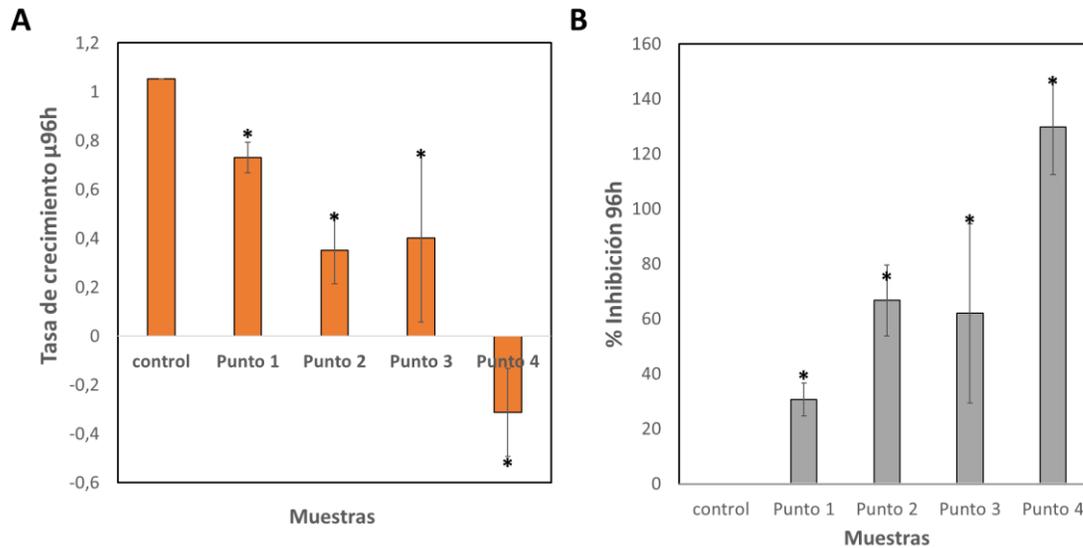


Figura 4.3-63 Tasas de crecimiento y porcentaje de inhibición a las 96h para *I. galbana* cultivada en presencia de muestras de sedimento. *, representan diferencias significativas con respecto al control. Número de réplicas corresponde a 4.

4.3.1.6.3.2 *Dunaliella tertiolecta* (Fitoplancton)

Para realizar los bioensayos con *Dunaliella tertiolecta* se utilizó la norma chilena NCh2706: "Calidad de agua – Bioensayo de inhibición de crecimiento en algas en agua dulce con *Selenastrum capricornutum* (*Raphidocelis subcapitata*) y de US-EPA, el método 1003.0: Green Alga, *Selenastrum capricornutum*, growth test; chronic toxicity.

Se estimó el porcentaje de inhibición en base al cálculo de la tasa de crecimiento poblacional estimada entre las 0 y 96 horas. Además, se estimó:

1. La concentración porcentual de la muestra que disminuye en un 50% la tasa de crecimiento poblacional con respecto al control (IC50) según la fórmula:

$$ICp = C_j + [M_1(1-p/100) - M_j] \frac{(C_{(j+1)} - C_j)}{(M_{(j+1)} - M_j)}$$

2. La menor concentración ensayada a la cual estadísticamente hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (LOEC).
3. La mayor concentración ensayada a la cual estadísticamente no hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (NOEC).

Muestras en sales metálicas

Se utilizaron 7 sales y un cultivo control con n=4. Además, se evaluó la eficiencia fotosintética (QY) durante todo el periodo de crecimiento.

La concentración de sales utilizada en cada muestra se presenta en la Tabla 4.3-20, y los resultados finales con este organismo se presenta en la Tabla 4.3-21.

Tabla 4.3-20 Concentración de sales utilizadas en *Dunaliella tertiolecta*

Elemento	Concentraciones en mg/L				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
As (As ₂ O ₃)	0,25	1,00	2,50	5,00	8,50
Cd (CdCl ₂ ·H ₂ O)	0,01	0,03	0,05	0,10	1,00
Pb (Pb(NO ₃) ₂)	0,50	1,00	2,50	8,50	25,00
Cr (K ₂ Cr ₂ O ₇)	0,50	1,00	2,50	5,00	8,50
Zn (ZnCl ₂)	0,03	0,10	0,50	1,00	10,00
Cu (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	0,50	0,75	1,00	2,00	5,00
Hg (HgCl ₂)	0,01	0,03	0,10	0,25	1,00

Tabla 4.3-21 Resultados de los endpoint ecotoxicológicos realizados en *Dunaliella tertiolecta*

Endpoint	Concentración en mg/L						
	As	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Hg
IC50-96 h	1,91	0,50	1,80	3,90	3,90	1,40	0,80
LOEC-96h	2,50	1,00	1,00	*	*	2,00	1,00
NOEC-96h	1,00	0,10	1,80	*	*	1,00	0,25

*: No se pudo calcular

Muestras en sedimento

Se evaluó el crecimiento de *D. tertiolecta* en control y en las muestras cada 24 h. Para el sedimento del Punto 1 se obtuvieron 33.000 cél/mL. Para los Puntos 2, 3 y 4 se obtuvieron 55.000, 765.000 y 350.000 cél/mL a las 96h. La densidad celular a las 96h se detalla en la Figura 4.3-64. Existen diferencias significativas con respecto al control en los puntos 1, 2 y 4. El método utilizado para discernir entre las medias es el promedio de las menores diferencias significativas de Fisher (Método de LSD).

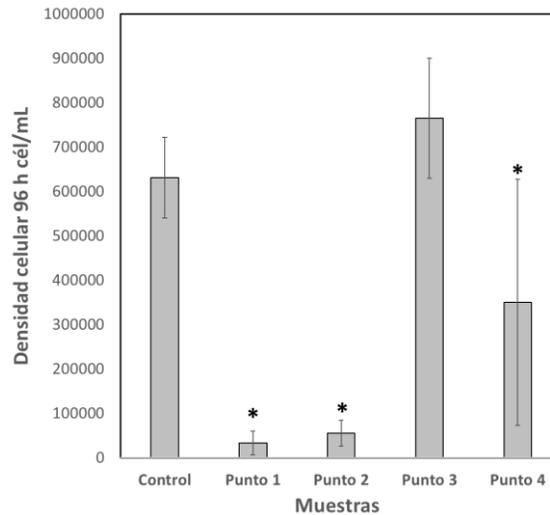


Figura 4.3-64 Crecimiento de *D. tertiolecta* a 96h en presencia de elutriado de muestras de sedimento. *, representan diferencias significativas con respecto al control. Número de réplicas corresponde a 4.

En base a los resultados anteriores la μ -96h para los puntos 1, 2, 3 y 4 corresponde a -0,05; 0,15; 1,08 y 0,55, respectivamente. El porcentaje de inhibición obtenido para los mismos puntos corresponden a Punto 1 igual a 25,17%, Punto 2 igual a 24,81%, Punto 3 igual a 5,87% y Punto 4 igual a 43,20% (Figura 4.3-65A y B).

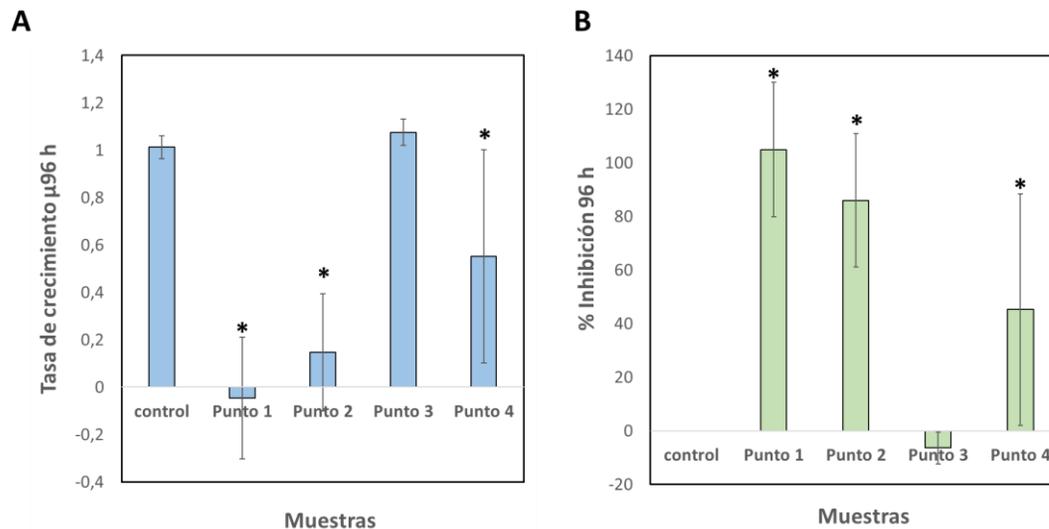


Figura 4.3-65 Tasas de crecimiento y porcentaje de inhibición a las 96h para *D. tertiolecta* cultivada en presencia de muestras de sedimento. *, representan diferencias significativas con respecto al control. Número de réplicas corresponde a 4.

4.3.1.6.3.3 *Macrocystis pyrifera* (Macroalga)

Macrocystis pyrifera (L.) C. Agardh pertenece al orden de las laminarias, es un alga de gran tamaño la cual llega a alcanzar 50 metros de longitud o más; está conformada por un conjunto de estipes que se fijan al sustrato preferentemente rocoso, por medio de un rizoides. De los estipes surgen los canuloides (ramas coriáceas), que cuentan con estructuras flotadoras llamadas neumatocistos, de aquí se despliegan las láminas. En conjunto estas estructuras forman una fronda.

El hábitat de esta especie es la parte somera de la zona de mareas, y las mayores profundidades a las que se les ha encontrado corresponden a los 40.3 m., áreas de fondo rocosos, formando mantos densos sobre grandes extensiones (Guzmán del Proo et al. 1986). Se distribuye principalmente en el hemisferio Sur, excepto Antártica, (Sudamérica, Suda frica, Australia y Nueva Zelanda) y en las costas orientales del Pacífico Norte. En América se distribuye en Perú, Patagonia y Tierra del fuego al Sur y desde Santa Barbara, California a Punta San Hipólito B. C., México. Su distribución se ve afectada por la temperatura del agua, el sustrato, la exposición al oleaje e intensidad de luz en el fondo. Cuenta con una tasa de crecimiento de hasta 14.7cm/día en la primavera y 23.3 cm/día en el invierno (Hernández Carmona, 1996). Su ciclo de vida consiste en una alternancia de generaciones entre un esporofito asexual y un gametofito microscópico sexual. Cuentan con un periodo de vida en promedio de 6 meses.

Macrocystis pyrifera puede actuar como biorremediador absorbiendo Cu y Zn desde la columna de agua (Plaza et al., 2011; Plaza y Viera, 2012; Plaza et al., 2012), sin embargo,

sus estadios tempranos pueden verse afectados por la acción de estos metales (Garman et al., 1994; FitrIDGE et al., 2012).

1. Para realizar los bioensayos con *Macrocystis pyrifera* se recolectaron frondas con soros esporangiales maduros desde Sector Isla Santa María. Estas fueron mantenidas en laboratorio y aclimatadas. Luego se procedió a los protocolos de inducción de liberación de esporas.

Los bioensayos propuestos para *M. pyrifera* se basaron en el método descrito en Anderson y Hunt (1988) adaptado a sulfato de Cu y de Zn.

Para estandarizar se usaron las mismas concentraciones de metales que las usadas en los bioensayos de moluscos anteriormente descritos, con igual número de tratamientos y réplicas (*P. purpuratus*). Las mediciones se basaron en el porcentaje de zoosporas germinadas y la cantidad esporofitos producidos a diferentes concentraciones de metales Cu y Zn.

2. Se determinó el porcentaje de inhibición de la germinación de esporas a las 120 horas. Se determinaron:

i. La LC50 mediante software PROBIT

ii. La concentración porcentual de la muestra que disminuye en un 50% la tasa de crecimiento poblacional con respecto al control (IC50) según la fórmula

$$ICp = C_j + [M_1(1-p/100) - M_j] \frac{(C_{(j+1)} - C_j)}{(M_{(j+1)} - M_j)}$$

iii. La menor concentración ensayada a la cual estadísticamente hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (LOEC).

iv. La mayor concentración ensayada a la cual estadísticamente no hay inhibición significativa de la tasa de crecimiento respecto a los controles (NOEC).

Para los cálculos de LOEC y NOEC se utilizó el programada bioestadístico Minitab 17.

- Prueba de Anderson-Darling: para probar distribución normal.
- Test de Levene y el de Bartlett: Para homogeneidad de varianza.
- ANOVA.
- Test de Dunnett: es una prueba post ANOVA para comparar un conjunto de tratamientos con una medida de control.

Muestras en sales metálicas

Se utilizaron 7 sales y un cultivo control con n=4. La concentración de sales utilizada en cada muestra se presenta en la Tabla 4.3-22, y los resultados finales con este organismo en el medio acuático se presentan en la Tabla 4.3-23.

Tabla 4.3-22 Concentración de sales utilizadas en *Macrocystis pyrifera*.

Elemento	Concentraciones en mg/L				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
As (As ₂ O ₃)	0,50	1,50	3,50	5,50	7,50
Cd (CdCl ₂ ·H ₂ O)	0,50	1,70	3,80	4,50	5,50
Pb (Pb(NO ₃) ₂)	2,50	8,50	18,00	25,00	32,00
Cr (K ₂ Cr ₂ O ₇)	0,50	1,50	3,50	5,50	7,50
Zn (ZnCl ₂)	0,10	1,00	10,00	20,00	50,00
Cu (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	8,00	15,00	23,00	35,00	48,00
Hg (HgCl ₂)	0,20	0,60	1,00	1,60	2,20

Tabla 4.3-23 Resultados de los endpoint ecotoxicológicos realizados en *Macrocystis pyrifera*.

Endpoint	Concentración en mg/L						
	As	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Hg
LC50 - 120 h	*	18,16	13,08	*	1,38	0,11	4,90
IC50-120 h	**	**	13,80	**	5,25	**	**
LOEC-120 h	0,50	***	18,00	0,50	10,00	8,00	0,20
NOEC-120 h	5,50	****	32,00	3,50	1,00	****	****

*: No se pudo calcular.

** : No pudieron ser determinados ya que no hubo inhibición del 50% de las esporas germinadas.

***: Cd no se pudo calcular ya que no hubo efectos letales.

****: □ Cd y Cu no pudieron ser determinados ya que no hubo efectos letales.

*****: Hg no pudo ser determinado ya que no hubo efecto letal desde la concentración mínima.

Muestras en sedimento

Los resultados obtenidos para las muestras de sedimento se detallan a continuación. El elutriado se obtuvo según el protocolo descrito por Dinnel y Strober (1985).

Se evaluó la germinación de esporas de *M. pyrifera* en control y en las muestras de elutriado de sedimento a las 120h. Para el sedimento del Punto 1 se determinó solo un 3,5% de germinación y un 96,5% de inhibición de la germinación. Para el Punto 2 también se determinó un 99% de inhibición. Para el punto 3 y 4 se determinó un 100% y un 90,5% de inhibición de la germinación. Existen diferencias significativas con respecto al control en todas las muestras (puntos 1, 2, 3 y 4). La Figura 4.3-66 muestra los resultados.

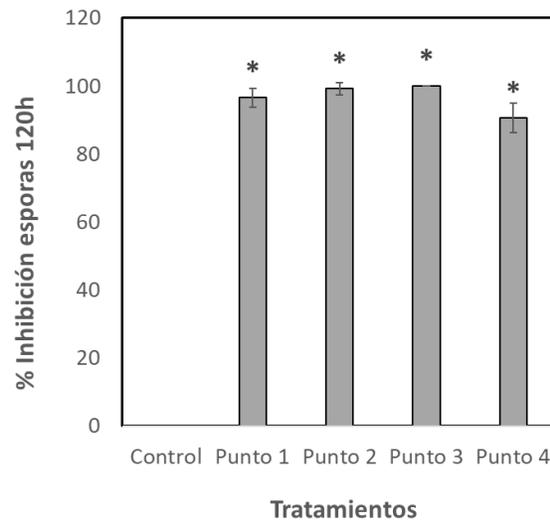


Figura 4.3-66 Porcentaje de inhibición de la germinación de esporas de *M. pyrifer* a las 120h en presencia de elutriado de muestras de sedimento. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. *, representan diferencias significativas con respecto al control. Número de réplicas corresponde a 4.

4.3.1.6.3.4 *Perumytilus purpuratus* (zoobentos)

Para este bioensayo se utilizó la especie *Perumytilus purpuratus* debido a la dificultad en determinar presencia de tallas juveniles de *Mytilus chilensis* en la ciudad de Antofagasta.

La prueba definitiva aguda consistió en cinco concentraciones y un control, con cuatro réplicas. Por cada concentración se colocaron 10 individuos.

Para realizar los bioensayos con *P. purpuratus* se colectaron mitílidos de la zona de playa LLacolen (Antofagasta). La talla utilizada fue de 1,5 a 2 cm. Los individuos fueron aclimatados durante 10 días a condiciones de laboratorio. Se determinó oclusión de las valvas (OC), retracción del manto (RT), formación del biso (Biso) y mortalidad a las 48h.

Los bioensayos con *Perumytilus purpuratus* (zoobentos) se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de EPA/600/4-90/027F/1993 (Methods for Measuring The Acute Toxicity Of Effluents And Receiving Waters To Freshwater And Marine Organisms) y EPA-821-R-02-013 (Short Term Methods For Estimating the Chronic Toxicity of Effluents and Receiving Water to Freshwater Organisms).

Para los cálculos de LC50 se determinó la concentración porcentual de la muestra que disminuye en un 50% la tasa de crecimiento poblacional con respecto al control (LC50) según el protocolo de PROBIT.

Para los cálculos de LOEC y NOEC se utilizó el programada bioestadístico Minitab 17.

- Prueba de Anderson-Darling: para probar distribución normal.
- Test de Levene y el de Bartlett: Para homogeneidad de varianza.
- ANOVA.
- Test de Dunnett: es una prueba post ANOVA para comparar un conjunto de tratamientos con una medida de control.

Muestras en sales metálicas

Se utilizaron 7 sales y un cultivo control con n=4. La concentración de sales utilizada en cada muestra se presenta en la Tabla 4.3-24, y los resultados finales con este organismo se presentan en la Tabla 4.3-25.

Tabla 4.3-24 Concentración de sales utilizadas en *Perumytilus purpuratus*.

Elemento	Concentraciones en mg/L				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
As (As ₂ O ₃)	8,00	15,00	23,00	35,00	48,00
Cd (CdCl ₂ ·H ₂ O)	0,50	1,70	3,80	4,50	5,50
Pb (Pb(NO ₃) ₂)	2,50	8,50	18,00	25,00	32,00
Cr (K ₂ Cr ₂ O ₇)	0,50	1,50	3,50	5,50	7,50
Zn (ZnCl ₂)	0,10	1,00	10,00	20,00	50,00
Cu (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	8,00	15,00	23,00	35,00	48,00
Hg (HgCl ₂)	0,20	0,60	1,00	1,60	2,20

Tabla 4.3-25 Resultados de los endpoint ecotoxicológicos realizados en *Perumytilus purpuratus*.

Endpoint	Concentración en mg/L						
	As	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Hg
LC50-120 h	22,91	34,67	*	**	**	*	**
LOEC-120 h	18	1,7	25	***	20	+	***
NOEC-120 h	8,5	0,5	18	***	10	+	***

*: No se pudo determinar

** : Solo se observaron efectos subletales

***: No se observaron efectos letales ni subletales

+: Efectos letales. No se pudo determinar

Muestras en sedimento

Se evaluó el % de formación de biso en ejemplares de *P. purpuratus* desde las 24h hasta las 120h. Se incluyeron 10 individuos por réplica. Para el sedimento del Punto 1 se obtuvo solo un 20% de formación de biso a las 120h. Para los Puntos 2 y 3 se obtuvo un 12,5% y un 20% de formación de biso, respectivamente. Para el punto 4 se determinó un 12,5% de formación de biso solamente en los individuos. Solo se observó un 3% de Mortalidad en los individuos expuestos a sedimento de los Puntos 2 y 3. La Figura 4.3-67 da cuenta de los resultados.

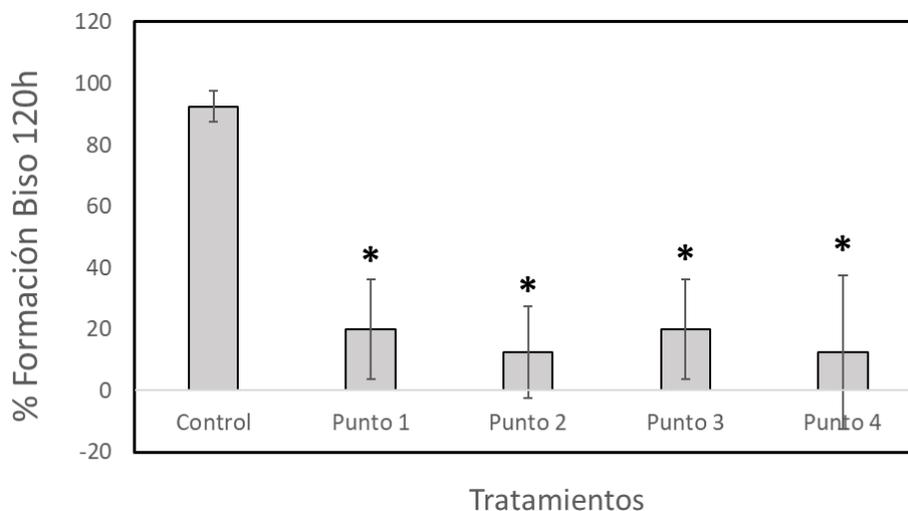


Figura 4.3-67 Porcentaje de formación de biso en *P. purpuratus* a las 120h en bioensayos con sedimentos de los Puntos 1, 2, 3 y 4. *, resultados estadísticamente significativos con respecto al control.

4.3.1.6.3.5 *Emerita analoga* (Crustáceo, infauna)

Emerita analoga (Stimpson, 1857) (Decapoda: Hippidae) “muy muy” es un crustáceo macrozoobentónico característico del intermareal e infralitoral arenoso de las costas del Pacífico Sur de América, a la vez que es un componente importante en las tramas tróficas de este sistema. Pese a su gran importancia pocos son los estudios enfocados a conocer aspectos de su ecología. *E. analoga* ha sido empleada como especie bioindicadora de importancia ecotoxicológica para el monitoreo de algunos metales pesados, de efluentes pesqueros y de ficotoxinas en el ecosistema marino (Iannacone & Alvaríño, 2003).

Se realizaron pruebas preliminares para determinar los rangos de las concentraciones a utilizarse en las pruebas de ecotoxicidad estáticas siguiendo las recomendaciones de la

APHA (1989). La prueba definitiva aguda consistió en cinco concentraciones y un control, con cuatro réplicas. Por cada concentración se colocaron 10 individuos.

- i. Para realizar los bioensayos con *Emerita analoga* se colectaron hembras ovígeras desde Playa La Rinconada (Antofagasta). Las hembras se aclimataron a condiciones de laboratorio durante 10 días. Luego una vez eclosionaran se utilizaron larvas Zoea I de una misma cohorte. Se determinó la LC50 a las 48h.
- ii. La LC50 concentración porcentual de la muestra que disminuye en un 50% la tasa de crecimiento poblacional con respecto al control (LC50) según el protocolo de PROBIT.
- iii. La menor concentración ensayada a la cual estadísticamente hay inhibición significativa y mortalidad respecto a los controles (LOEC).
- iv. La mayor concentración ensayada a la cual estadísticamente no hay inhibición significativa y mortalidad respecto a los controles (NOEC).

Para los cálculos de LOEC y NOEC se utilizó el programada bioestadístico Minitab 17.

- Prueba de Anderson-Darling: para probar distribución normal.
- Test de Levene y el de Bartlett: Para homogeneidad de varianza.
- ANOVA.
- Test de Dunnett: es una prueba post ANOVA para comparar un conjunto de tratamientos con una medida de control.

Muestras en sales metálicas

Se utilizaron 7 sales con cinco concentraciones diferentes y un cultivo control con n=4.

La concentración de sales utilizada en cada muestra se presenta en la Tabla 4.3-26, y los resultados finales con este organismo se presenta en la Tabla 4.3-27.

Tabla 4.3-26 Concentración de sales utilizadas en *Emerita analoga*.

Elemento	Concentraciones en mg/L				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
As (As ₂ O ₃)	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00
Cd (CdCl ₂ ·H ₂ O)	0,05	0,10	0,25	1,00	2,00
Pb (Pb(NO ₃) ₂)	0,25	0,50	0,75	1,00	2,00
Cr (K ₂ Cr ₂ O ₇)	0,10	0,25	0,50	1,00	3,00
Zn (ZnCl ₂)	0,01	0,03	0,05	0,10	0,50

Elemento	Concentraciones en mg/L				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Cu (CuCl ₂ ·2H ₂ O)	0,25	0,50	1,00	2,00	5,00
Hg (HgCl ₂)	0,01	0,10	0,25	0,50	1,00

Tabla 4.3-27 Resultados de los endpoint ecotoxicológicos realizados en *Emerita analoga*.

Endpoint	Concentración en mg/L						
	As	Cd	Pb	Cr	Zn	Cu	Hg
LC50-48 h	18,62	*	2,63	**	0,28	*	0,07
LOEC-48h	1,00	0,10	1,00	**	0,50	***	0,10
NOEC-48h	0,50	0,05	0,75	*	0,10	*	0,01

*: No se pudo determinar

**: No se observaron efectos letales

***: Letalidad en todas las muestras

Muestras en sedimento

Los resultados obtenidos para las muestras de sedimento se detallan a continuación. El elutriado se obtuvo según el protocolo descrito por Dinnel y Strober (1985).

Se ha descrito que para tipos de bioensayos de toxicidad aguda/letalidad en *E. analoga* se pueden utilizar dos tipos de bioensayos: juveniles de talla 1 cm de cefalotórax en presencia de 2 cm de sedimento (altura de sedimento) por 1L de agua de mar, generalmente 10 individuos por réplica. La otra alternativa es utilizar larvas zoea I de primer estadio en elutriado de sedimento, aproximadamente 100 mL de elutriado con 10 individuos. Ambos bioensayos permiten evaluar el mismo efecto. Según factibilidad técnica y disposición de muestras de sedimento se seleccionó esta última opción.

Se evaluó el % de mortalidad en larvas Zoea I de *E. analoga* a las 24 y 48h. Este bioensayo se realizó 2 veces con 4 réplicas cada uno. Se incluyeron 10 individuos por réplica. Se determinaron los % de mortalidad. Para el sedimento del Punto 1 se obtuvo un 47,5% de mortalidad a las 48h. Para los Puntos 2 y 3 se obtuvo un 97,5% de mortalidad y para el punto 4 se determinó un 100% de mortalidad a las 48h (Figura 4.3-68).

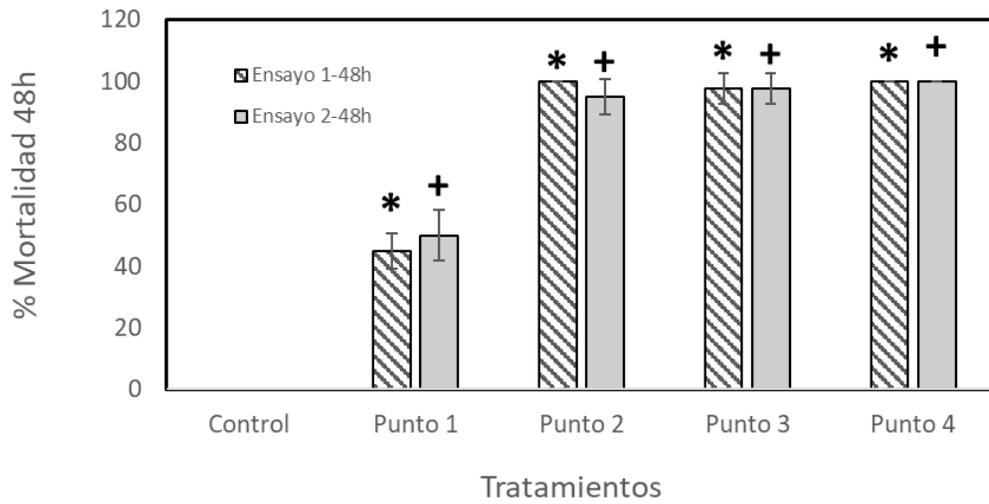


Figura 4.3-68 Porcentaje de mortalidad de larvas de *E. analoga* en bioensayos con sedimentos de los Puntos 1, 2, 3 y 4. * y +, resultados estadísticamente significativos con respecto al control.

4.3.1.6.4 Análisis de los efectos por medio de una base de datos ecotoxicológica

4.3.1.6.4.1 Elaboración de base de datos asociado a efectos

Las pruebas de toxicidad permiten realizar mediciones experimentales del efecto de agentes químicos o físicos en sistemas biológicos, estableciendo relaciones concentración-respuesta bajo condiciones controladas en terreno o en laboratorio. En el contexto de este estudio, se obtuvieron valores teóricos para LC₅₀, LOEC y NOEC para ecosistemas acuícolas de agua salada, basado en literatura extraída desde bases de datos internacionales como EPA (USA) y ETOX (Alemania), y revistas científicas chilenas y extranjeras. Con esta información se elaboró una base de datos para los parámetros de interés ambiental previamente seleccionados: arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc, en sus fracciones totales y disueltas, para especies en agua salada.

Las bases de datos analizadas presentan los elementos (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc), en la mayoría de los casos dentro de compuestos se calculó la concentración del índice (LC₅₀, LOEC o NOEC) a través de una razón estequiométrica para cada elemento. Además, la concentración de cada índice se estandarizó en su unidad de medida, dejando todos los valores en mg/L. Cabe señalar que se utilizó la fracción total para el análisis de los efectos, debido a que la cantidad de registros en su mayor parte son para los elementos totales.

La fórmula estequiométrica utilizada para calcular las concentraciones del índice, para cada parámetro de interés dentro de un compuesto correspondió a:

$$\text{Concentración del parámetro de interés} = \frac{\text{CI} * \text{PA}}{\text{PM}}$$

Donde;

CI: Concentración del índice (LC₅₀, LOEC O NOEC).

PA: Peso atómico del parámetro de interés (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo o zinc).

PM: Peso molecular del compuesto.

Los resultados de la base de datos ecotoxicológica se presentan a continuación:

Respecto al arsénico, se encontraron 327 registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada, de los cuales 322 registros correspondieron a la fracción total, y los 5 registros restantes correspondieron a concentraciones del tipo no codificado y del tipo formulación (generalmente reservada para la preparación comercial antes del uso real y no incluye la dilución final).

Tabla 4.3-28 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de arsénico. Fracción total.

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	0	13	12	25
Crustáceos	68	26	70	164
Peces	18	24	69	111
Invertebrados	3	5	4	12
Lombrices	6	2	2	10
Total	95	70	157	322

Fuente: Elaboración propia

Respecto al cadmio, se encontraron 2083 registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada, de los cuales 2033 registros correspondieron a la fracción total, 28 a fracción disuelta y los registros restantes correspondieron a concentraciones del tipo lábil (concentración de metal iónico lábil o libre determinada por diversos métodos analíticos) y del tipo formulación (generalmente reservada para la preparación comercial antes del uso real y no incluye la dilución final).

Tabla 4.3-29 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de cadmio. Fracción total

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	6	0	49	55
Crustáceos	517	1	138	656
Peces	413	0	135	548
Flores, árboles, arbustos, helechos	0	0	13	13
Insectos/arácnidos	6	0	0	6
Invertebrados	27	3	64	94
Misceláneo	6	0	0	6
Moluscos	198	0	332	530
Gusanos	94	0	31	125
Total	1267	4	762	2033

Fuente: Elaboración propia

Los registros de toxicidad aguda y crónica de cobre en agua salada correspondieron a 6045, de los cuales 5279 son de fracción total, 702 de fracción disuelta y los registros restantes correspondieron a concentraciones del tipo lábil (concentración de metal iónico lábil o libre determinada por diversos métodos analíticos) y del tipo formulación (generalmente reservada para la preparación comercial antes del uso real y no incluye la dilución final), o no codificado.

Tabla 4.3-30 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de cobre. Fracción total

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	47	318	372	737
Crustáceos	529	357	382	1268
Peces	276	376	501	1153
Flores, árboles, arbustos, helechos	1	24	19	44
Invertebrados	86	223	215	524
Misceláneo	10	1	9	20
Moluscos	233	521	543	1297
Lombrices	126	36	74	236
Total	1308	1856	2115	5279

Fuente: *Elaboración propia*

*Diverso: fue clasificado con el nombre científico comunidad acuática, además de reino animal.

Los registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada de cromo correspondieron solo a la fracción total, sumando un total de 157 datos.

Tabla 4.3-31 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de cromo. Fracción total

Grupo funcional	LC ₅₀	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	19	19	1	39
Crustáceos	24	3	6	33
Peces	29	8	6	43
Invertebrados	5	6	7	18
Moluscos	9	2	2	13
Lombrices	11	0	0	11
Total general	97	38	22	157

Fuente: *Elaboración propia*

Los registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada de mercurio correspondieron a 1117, de los cuales 1087 son de fracción total, 25 de fracción disuelta y los registros restantes correspondieron a concentraciones del tipo formulación (generalmente reservada para la preparación comercial antes del uso real y no incluye la dilución final).

Tabla 4.3-32 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de mercurio. Fracción total

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	37	34	4	75
Crustáceos	304	22	51	377
Peces	124	48	138	310
Flores, árboles, arbustos, helechos	0	9	5	14
Invertebrados	13	24	13	50
Misceláneo	6	0	0	6
Moluscos	124	53	34	211
Lombrices	38	6	0	44
Total	646	196	245	1087

Fuente: Elaboración propia

Los registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada para el parámetro plomo correspondieron a 574, de los cuales 564 son de fracción total, 10 de fracción disuelta.

Tabla 4.3-33 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de plomo. Fracción total

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgo, hongos	3	15	18	36
Crustáceos	75	57	20	152
Peces	54	2	12	68
Flores, árboles, arbustos, helechos	0	7	29	36
Invertebrados	10	10	9	29
Moluscos	41	70	67	178
Lombrices	52	7	6	65
Total	235	168	161	564

Fuente: Elaboración propia

Los registros de toxicidad aguda y crónica en agua salada para el zinc correspondieron a 1886, de los cuales 1629 son de fracción total, 202 de fracción disuelta y los registros restantes correspondieron a concentraciones del tipo lábil (concentración de metal iónico lábil o libre determinada por diversos métodos analíticos), formulaciones o no codificada.

Tabla 4.3-34 Número de registros de endpoint ecotoxicológicos (LC50, NOEC y LOEC) de bases de datos y publicaciones nacionales, internacionales de zinc. Fracción total

Grupo funcional	LC50	LOEC	NOEC	Total general
Algas, musgos, hongos	30	51	53	134
Crustáceos	344	97	189	630
Peces	119	52	45	216
Flores, árboles, arbustos, helechos	0	12	17	29
Invertebrados	13	43	27	83
Misceláneo	9	5	1	15
Moluscos	174	96	168	438
Lombrices	74	7	3	84
Total	506	363	503	1629

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, de los bioensayos que se mencionan en el acápite 4.3.1.6.2, se incorporan los endpoint de LC50, LOEC y NOEC estimados en el presente estudio, los que son utilizados en la estimación de estadígrafos representativos de los endpoint de interés, como también para los ajustes de series sintéticas para el NPEC, que será utilizado en la estimación del riesgo.

4.3.1.6.4.2 Estadígrafos para endpoint de efectos agudos LC50 y crónicos NOEC, LOEC

En función de la categorización de grupos funcionales de la EPA (ECOTOX), se generó una base de datos que permite realizar una comparación con las pruebas de toxicidad realizadas.

La Tabla 4.3-35, Tabla 4.3-36 y Tabla 4.3-37 muestran los estadígrafos representativos (promedio, máximo, mínimo, desviación estándar), como también el cálculo de percentiles de toda la serie, para los valores de LC50, LOEC y NOEC respectivamente.

Del mismo modo, las Figura 4.3-70 a la Figura 4.3-76 muestran gráficamente los valores de los 3 endpoint ecotoxicológicos para los 7 agentes evaluados, a través de gráficas del tipo Boxplot. No se determinaron estadísticos ni análisis para el cromo hexavalente, por cuanto se tienen pocos registros de exposición, los que permitan estimar un coeficiente de riesgo adecuado. La interpretación del boxplot, recopiladas bibliográficamente para los distintos tipos de contaminantes analizados a través de boxplots: las líneas rojas muestran el promedio, los percentiles 25 y 75 corresponden a la caja azul en sus niveles inferior y superior, las líneas límites negras son los máximos y mínimos de cada serie, y las cruces rojas a valores fuera de rango significativo (outliers). Ver Figura 4.3-69.

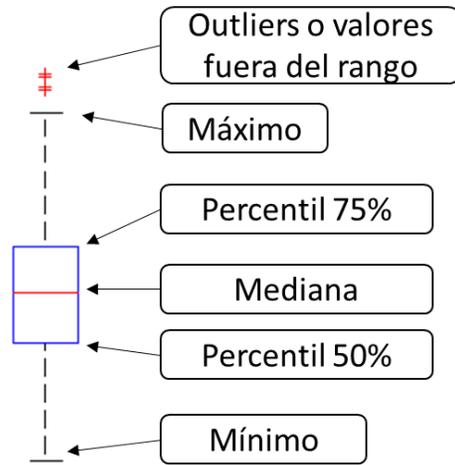


Figura 4.3-69 Interpretación de la gráfica Boxplot

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3-35 Síntesis de datos asociados a LC50 de la elaboración de la base de datos ecotoxicológica. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Arsénico total	Cadmio total	Cromo total	Cobre total	Mercurio total	Plomo total	Zinc total
Número de datos	129	1.267	97	1.308	646	235	763
Promedio	118.321,1	23.894,7	58.081,2	13.084,4	5.823,0	89.096,9	68.705,2
Máximo	1.000.000,0	1.000.000,0	400.000,0	#####	1.000.000,0	5.623.400,0	2.100.000,0
Mínimo	232,0	7,E-02	220,0	0,1	4,E-03	5,E+00	4,0
Desv. Estándar	260.889,2	62.773,2	92.454,2	102.083,2	64.219,9	468.701,8	249.395,6
Percentil	Valor [ug/L]						
0	232,0	7,E-02	220,0	0,1	4,E-03	5,E+00	4,0
5	1.728,0	41,6	298,0	18,0	7,0	580,0	52,8
10	2.247,6	120,4	528,3	42,7	16,0	836,0	100,0
20	3.743,0	558,0	1.000,0	88,0	33,3	1.672,0	519,6
30	6.000,0	1.200,0	1.000,0	150,0	58,2	2.621,0	1.201,0
40	10.370,0	2.363,0	3.528,0	250,0	94,1	4.500,0	2.000,0
50	16.000,0	4.700,0	5.150,0	403,0	160,0	6.350,0	3.701,5
60	23.000,0	9.000,0	15.556,0	646,0	300,0	9.190,0	7.885,0
66	35.028,0	13.972,0	53.625,0	1.000,0	391,1	11.048,7	12.500,0
70	43.520,0	17.400,0	75.500,0	1.300,0	471,5	14.021,0	17.000,0
80	84.580,0	28.500,0	104.500,0	2.775,2	926,4	36.464,0	35.000,0
90	512.000,0	50.560,0	190.000,0	8.000,0	3.100,0	129.446,0	112.439,0
95	1.000.000,0	108.150,0	293.000,0	33.280,0	7.958,0	315.000,0	255.200,0
100	1.000.000,0	1.000.000,0	400.000,0	#####	1.000.000,0	5.623.400,0	2.100.000,0

Tabla 4.3-36 Síntesis de datos asociados a LOEC de la elaboración de la base de datos ecotoxicológica. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Arsénico total	Cadmio total	Cromo total	Cobre total	Mercurio total	Plomo total	Zinc total
Número de datos	70	4	38	1.856	196	168	363
Promedio	113.381,0	1.112,5	1.373,4	4.025,1	740,7	32.780,7	8.580,3
Máximo	1.220.000,0	1.700,0	16.384,0	1.370.000,0	100.000,0	500.000,0	500.000,0
Mínimo	1,E-01	5,E+01	1,E+01	1,E-01	1,E-02	2,E-01	1,E+00
Desv. Estándar	277.800,3	781,4	3.610,9	46.935,4	7.416,5	93.640,2	53.683,4
Percentil	Valor [ug/L]						
0	1,E-01	5,E+01	10,0	1,E-01	1,E-02	2,E-01	1,E+00
5	23,0	5,E+01	10,0	5,E+00	1,E+00	4,E+01	1,E+01
10	80,0	5,E+01	10,0	1,E+01	2,E+00	5,E+01	2,E+01
20	1.000,0	335,0	11,0	14,3	2,2	1,E+02	6,E+01
30	2.000,0	715,0	16,0	25,9	5,0	197,0	1,E+02
40	4.500,0	1.070,0	27,0	50,0	7,8	223,7	200,0
50	5.000,0	1.350,0	46,0	100,0	10,0	500,0	320,0
60	14.438,7	1.630,0	73,5	150,0	20,0	2.072,0	652,7
66	20.062,8	1.700,0	178,8	230,0	20,0	2.700,0	1.000,0
70	20.946,9	1.700,0	250,0	318,0	25,0	2.700,0	1.000,0
80	159.188,6	1.700,0	987,9	1.000,0	70,4	3.000,0	1.500,0
90	261.836,2	1.700,0	5.854,6	2.000,0	100,0	200.000,0	5.000,0
95	976.000,0	1.700,0	10.668,7	5.700,0	348,0	200.000,0	15.000,0
100	1.220.000,0	1.700,0	16.384,0	1.370.000,0	100.000,0	500.000,0	500.000,0

Tabla 4.3-37 Síntesis de datos asociados a NOEC de la elaboración de la base de datos ecotoxicológica. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Arsénico total	Cadmio total	Cromo total	Cobre total	Mercurio total	Plomo total	Zinc total
Número de datos	157	762	22	2.115	245	161	503
Promedio	42.727,9	24.329,6	1.503,4	3.107,6	96,0	37.618,7	1.772,5
Máximo	1.220.000,0	916.580,0	8.192,0	1.370.000,0	16.020,0	200.000,0	100.000,0
Mínimo	1,E+00	1,E-01	9,E+01	1,E-01	1,E-02	2,E+01	5,E-01
Desv. Estándar	169.715,8	139.158,7	2.033,4	36.354,1	1.041,7	70.483,6	8.534,7
Percentil	Valor [ug/L]						
0	1,E+00	1,E-01	88,0	1,E-01	1,E-02	2,E+01	5,E-01
5	100,0	5,E+00	93,4	6,E+00	1,9	4,E+01	1,0,E+01
10	100,0	10,0	100,0	10,0	2,0	1,E+02	2,E+01
20	771,4	41,1	100,0	20,0	2,0	125,0	50,0
30	1.000,0	42,9	248,1	30,0	5,0	316,0	80,0
40	5.000,0	50,0	519,0	50,0	10,0	982,9	100,0
50	5.500,0	80,0	519,0	100,0	10,0	2.000,0	182,0
60	10.000,0	108,7	1.401,9	125,0	10,0	2.700,0	320,0
66	10.000,0	200,0	1.500,0	221,0	10,0	5.345,8	400,0
70	10.000,0	400,0	1.500,0	279,6	10,0	31.080,0	552,7
80	20.946,9	1.124,1	2.688,1	510,0	10,0	31.080,0	1.000,0
90	20.946,9	11.241,0	3.857,6	2.000,0	20,0	200.000,0	1.362,9
95	127.796,8	34.899,1	6.348,8	8.921,4	81,0	200.000,0	7.390,0
100	1.220.000,0	916.580,0	8.192,0	1.370.000,0	16.020,0	200.000,0	100.000,0

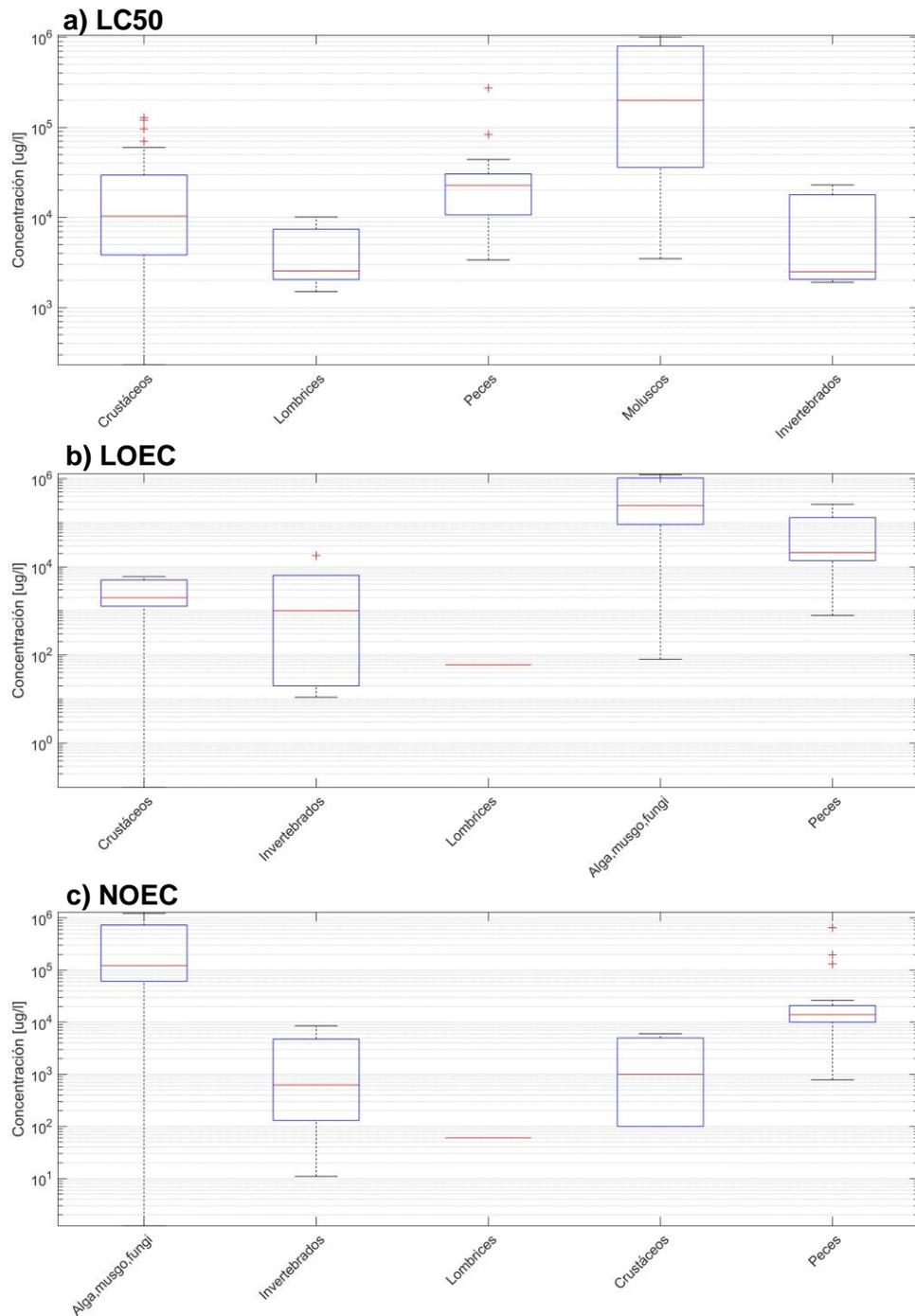


Figura 4.3-70 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos de arsénico total para diversas taxas. Fuente: *Elaboración propia*

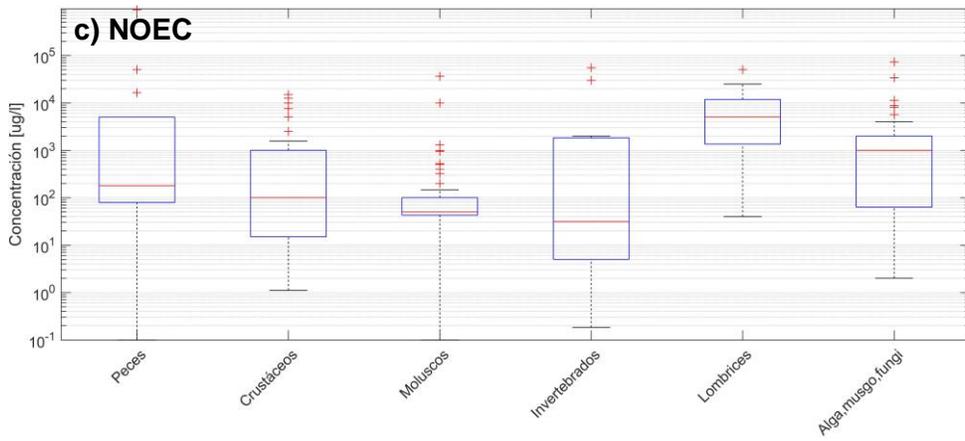
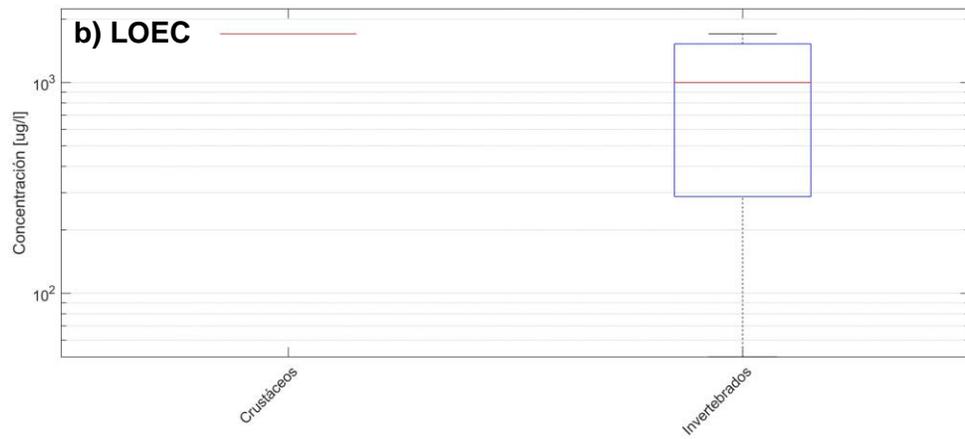
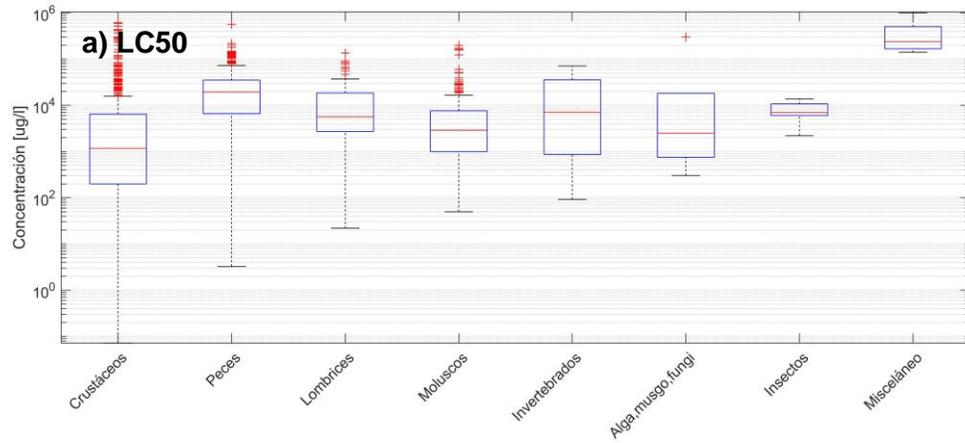


Figura 4.3-71 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos de cadmio total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia

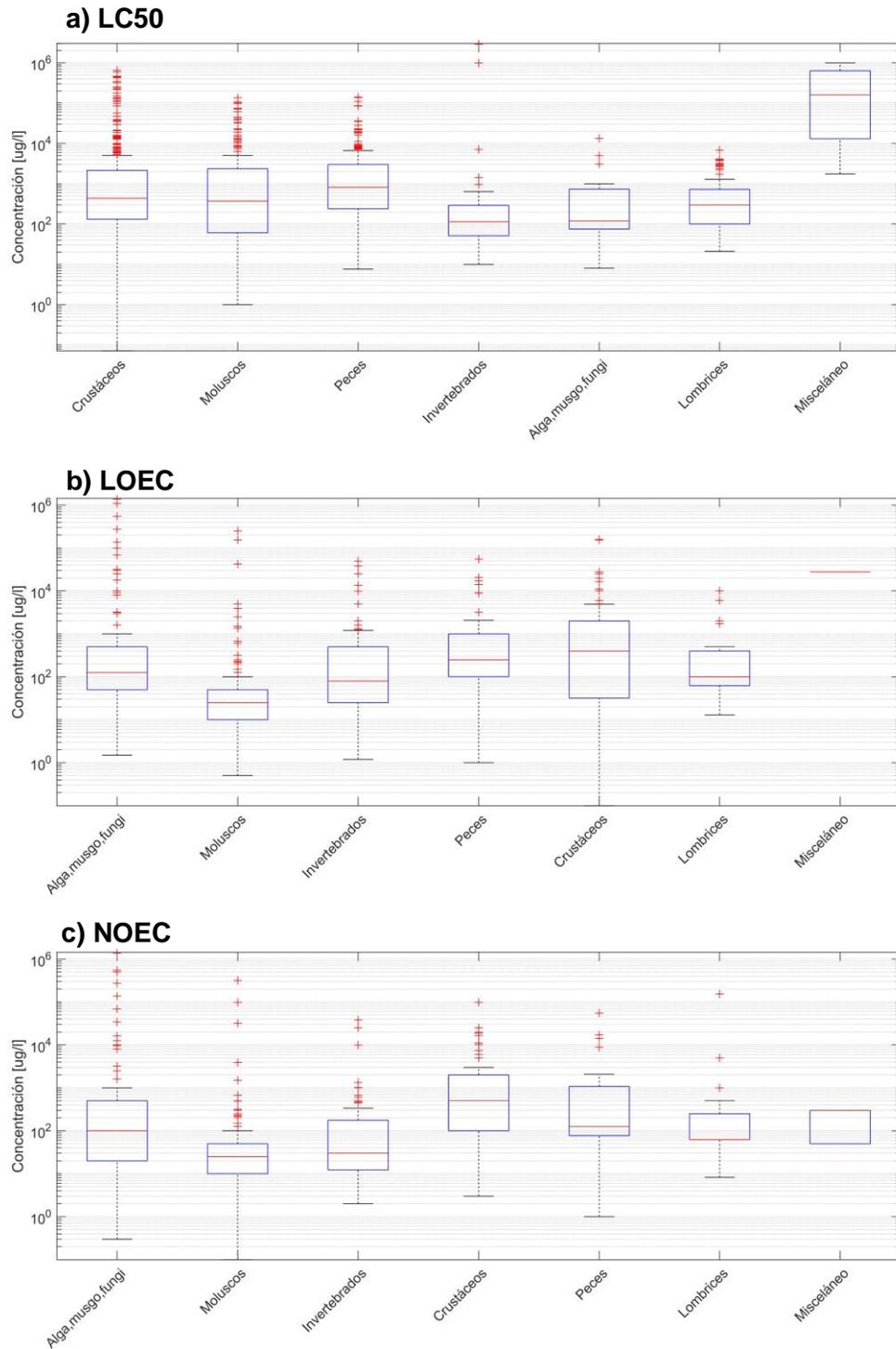


Figura 4.3-72 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos de cobre total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia

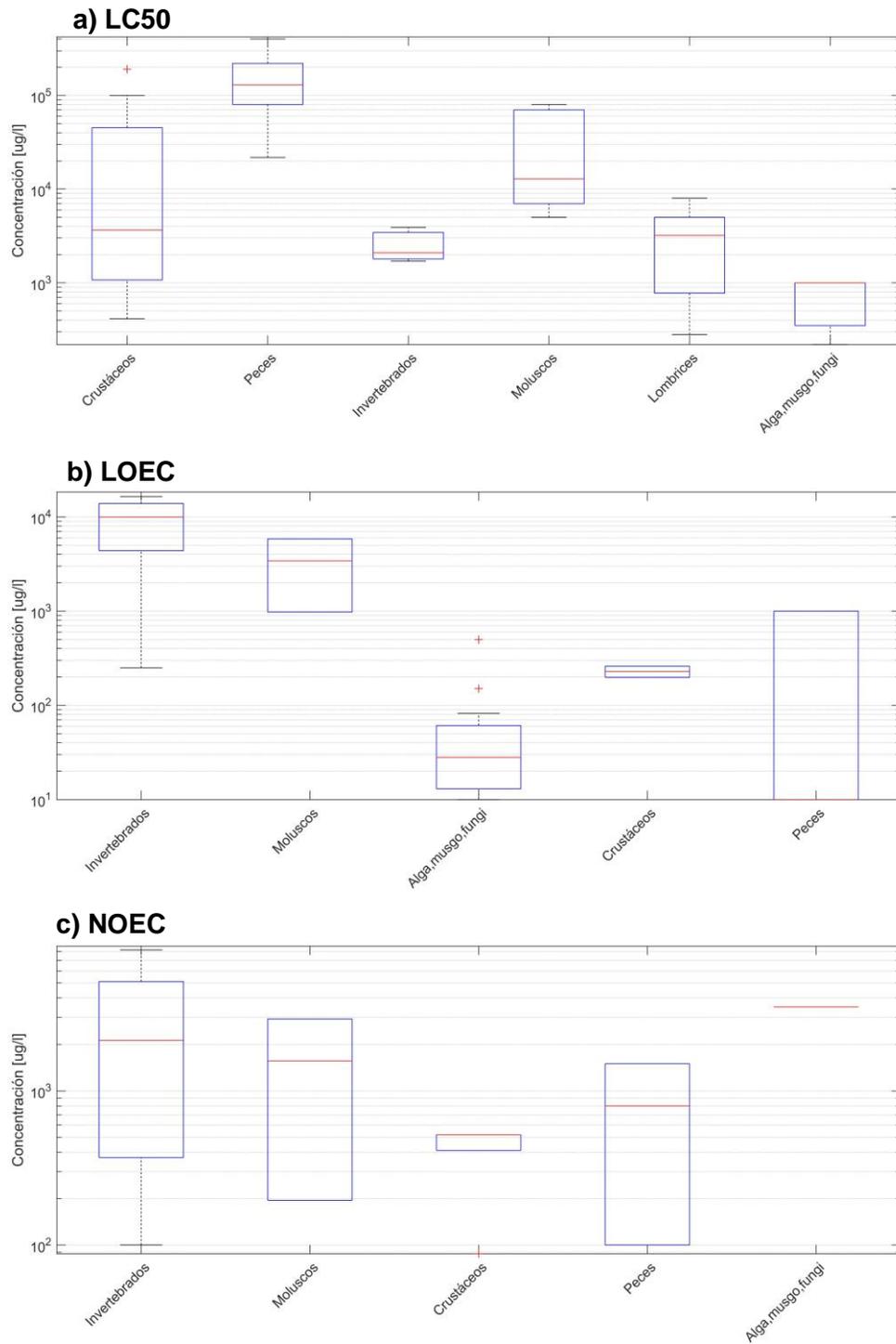


Figura 4.3-73 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos de cromo total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia

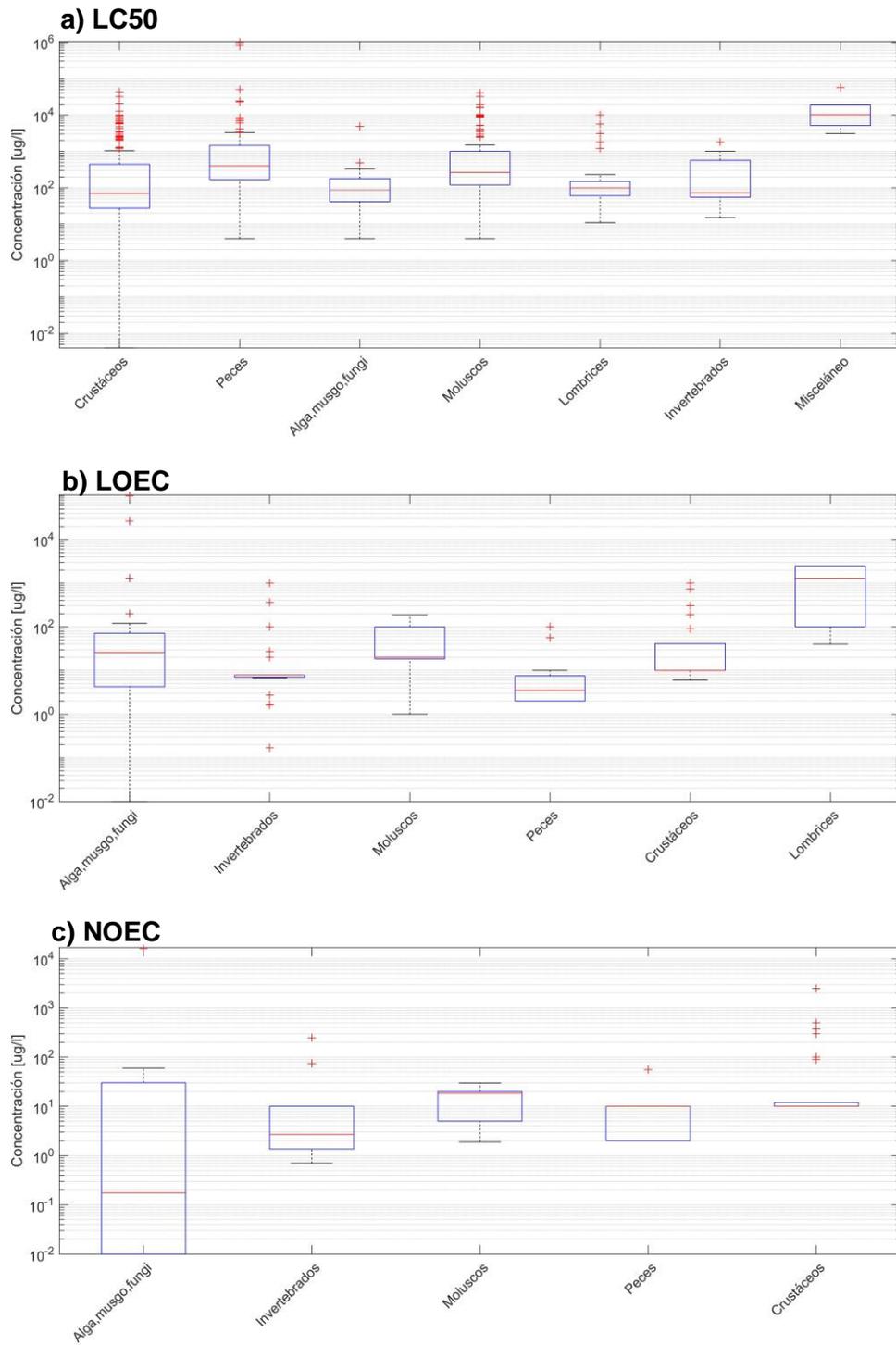


Figura 4.3-74 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos de mercurio total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia

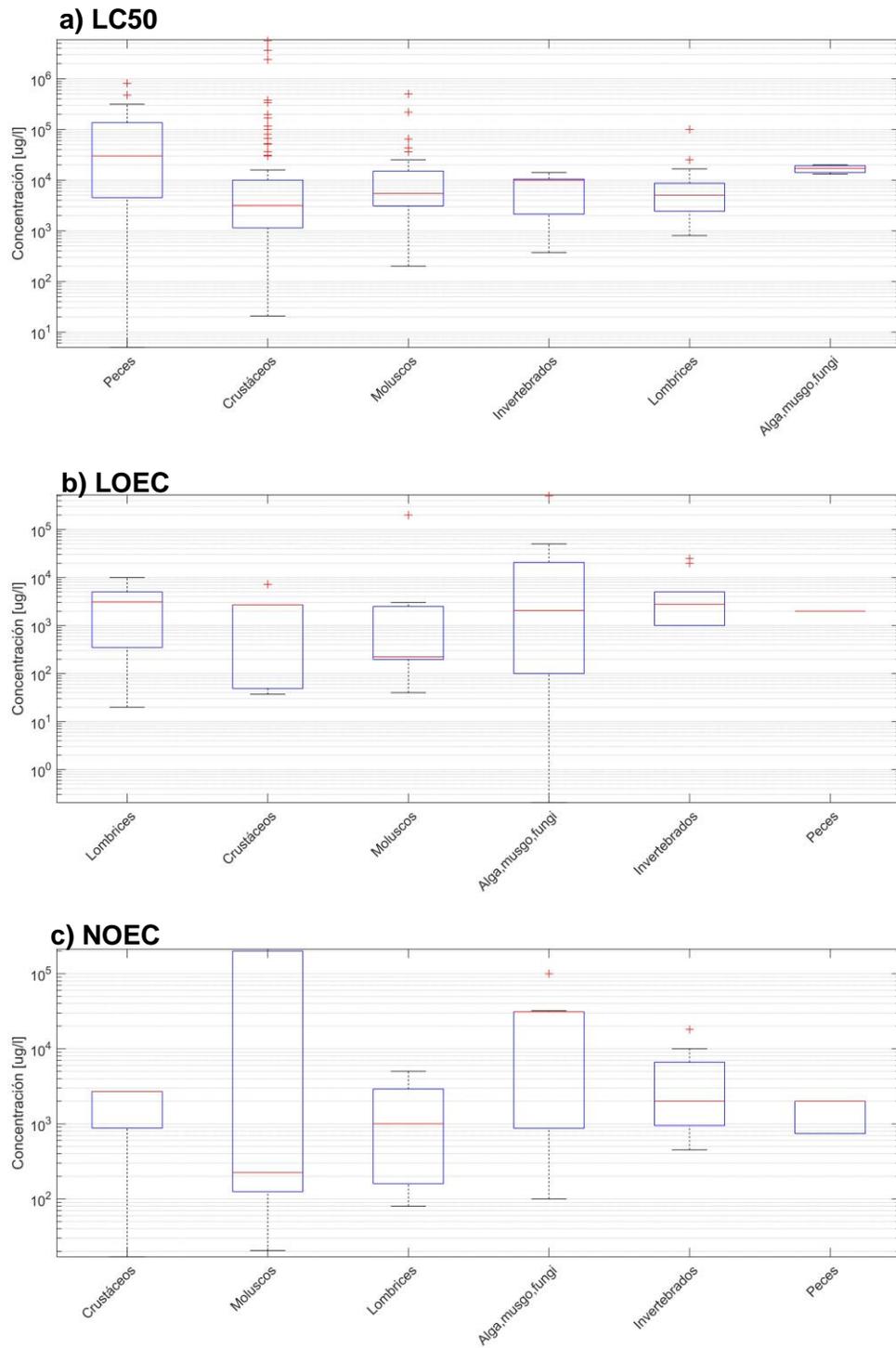
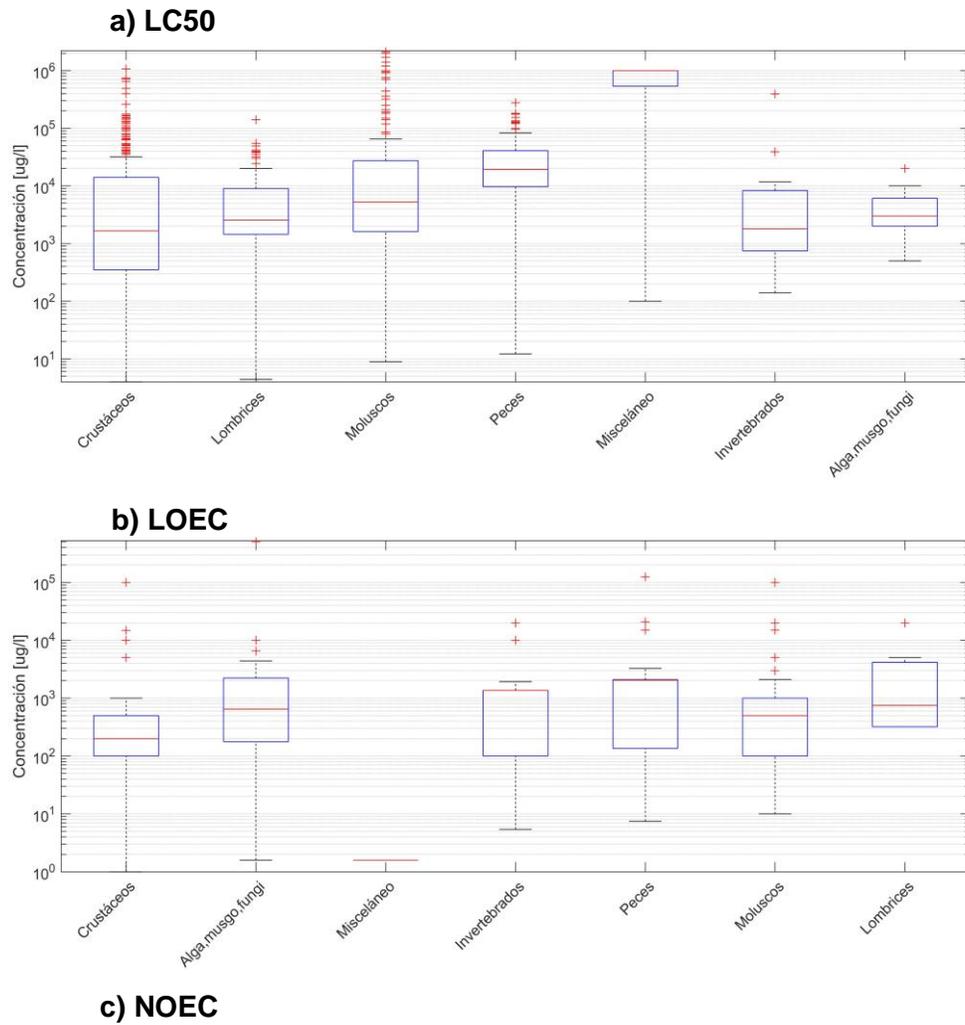


Figura 4.3-75 Diagrama de cajas de endpoint ecotoxicológicos del plomo total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia



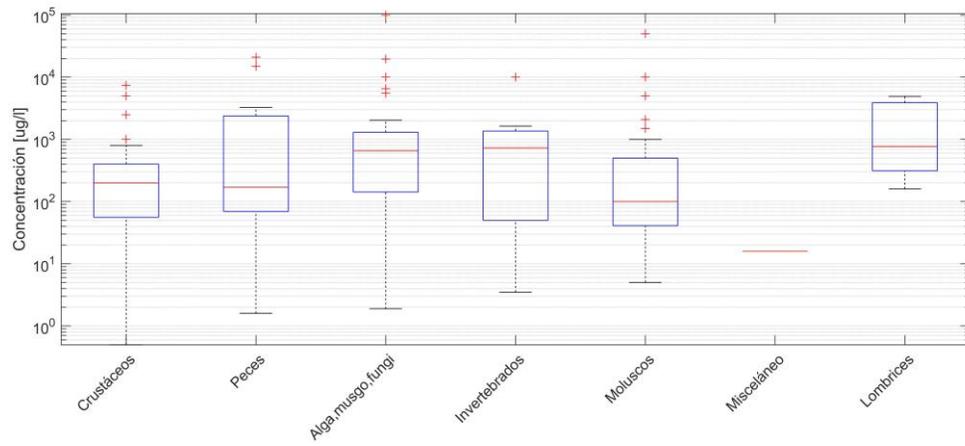


Figura 4.3-76 Diagrama de cajas de LC50 de endpoint ecotoxicológicos del zinc total para diversas taxas. Fuente: Elaboración propia

4.3.1.6.4.3 Estadígrafos para endpoint de efectos crónicos NOEC

4.3.1.6.4.4 Ajustes estadísticos para los valores PNEC

Para desarrollar la simulación de Montecarlo, resulta necesario generar estadísticos representativos de la serie de NOEC, por lo cual a continuación se muestran estos resultados. Se utilizó el mismo criterio de información bayesiana y los mejores ajustes entre los valores mínimos y máximos que en el caso de la PEC:

Cabe señalar que no fue posible generar estadísticos en sedimento, por cuanto los datos de efectos para sedimento marino o son muy escasos o no hay.

En vista de lo anterior, para la evaluación de los efectos en el sedimento, se tomó en consideración los límites establecidos en normativa nacional e internacional, como sigue:

- MOP (1994): Manual para la cuantificación de externalidades de proyectos portuarios,
- CSQG (1995). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic life
- NWQMS (2000) Australian and Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters. Sediment Water Quality Guidelines.

Los límites utilizados se muestran en la Tabla 4.3-38.

Tabla 4.3-38 Normativa nacional e internacional utilizada para el cálculo del cociente de Riesgo en bahía Mejillones del Sur. Valores en mg/kg.

Normativa	MOP 1994	ISQG Canadá 2002	NWQMS Australia y Nueva Zelanda 2002
Arsénico	57,00	7,24	20,00
Cadmio	1,00	0,70	1,50
Cobre	130,00	18,70	65,00
Cromo	55,00	52,30	80,00
Mercurio	0,20	0,13	0,15
Plomo	66,00	30,20	50,00
Zinc	160,00	124,00	200,00

A continuación, se muestra el ajuste estadístico para los parámetros NOEC en agua marina.

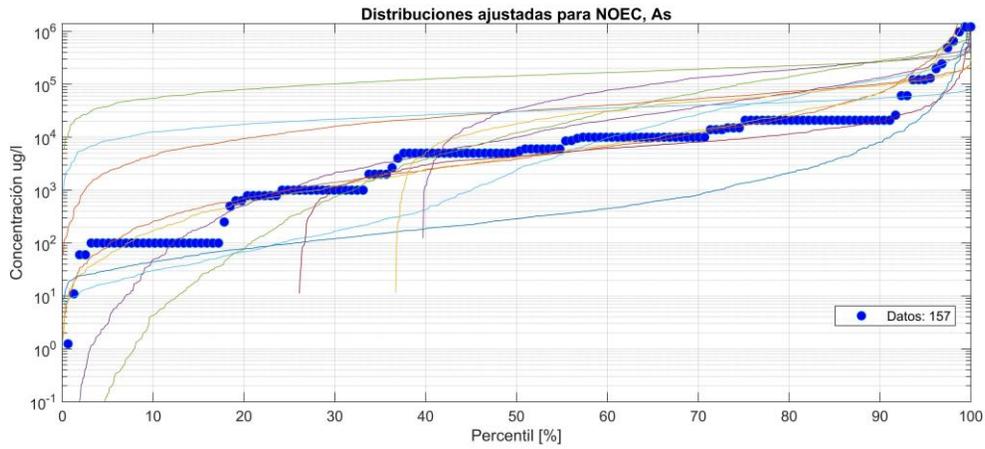


Figura 4.3-77 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para arsénico total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

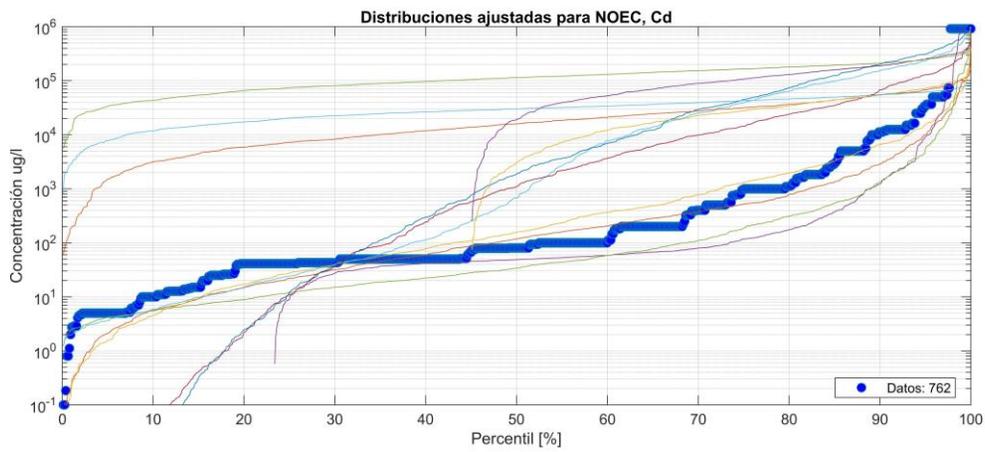


Figura 4.3-78 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para cadmio total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

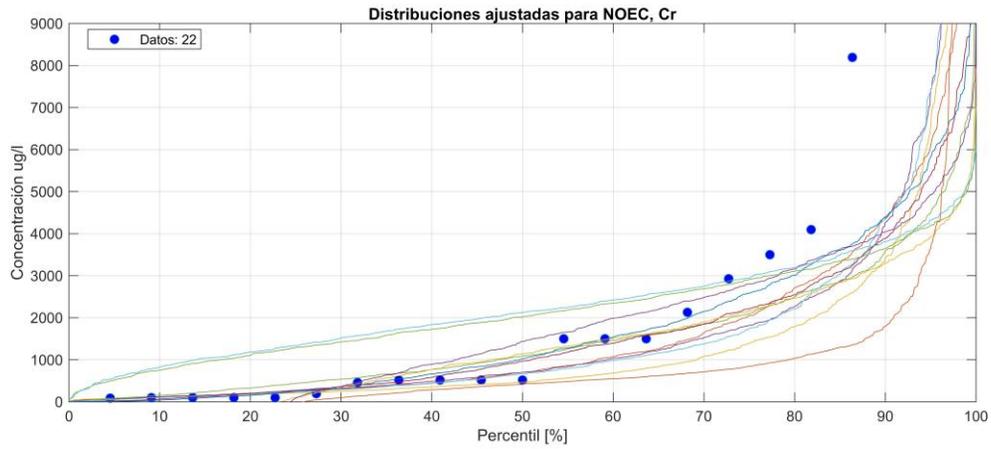


Figura 4.3-79 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para cromo total en la matriz agua. *Fuente: Elaboración propia*

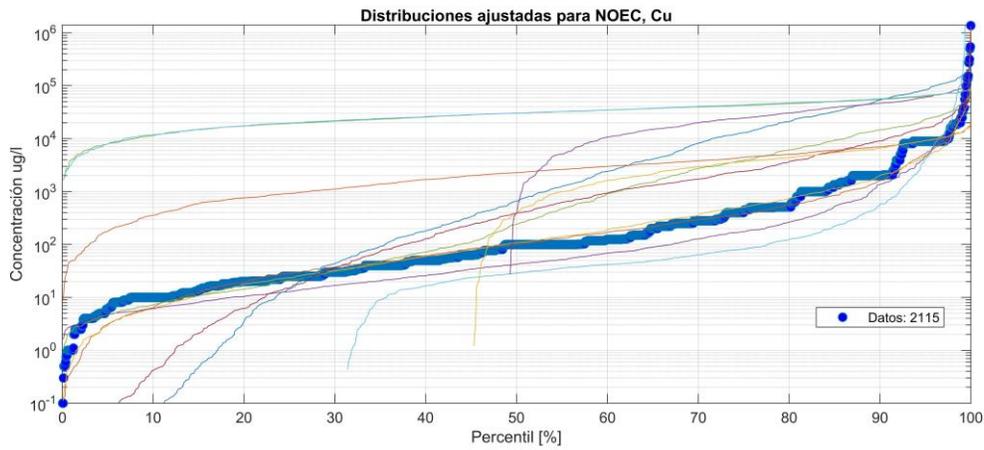


Figura 4.3-80 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para cobre total en la matriz agua. *Fuente: Elaboración propia*

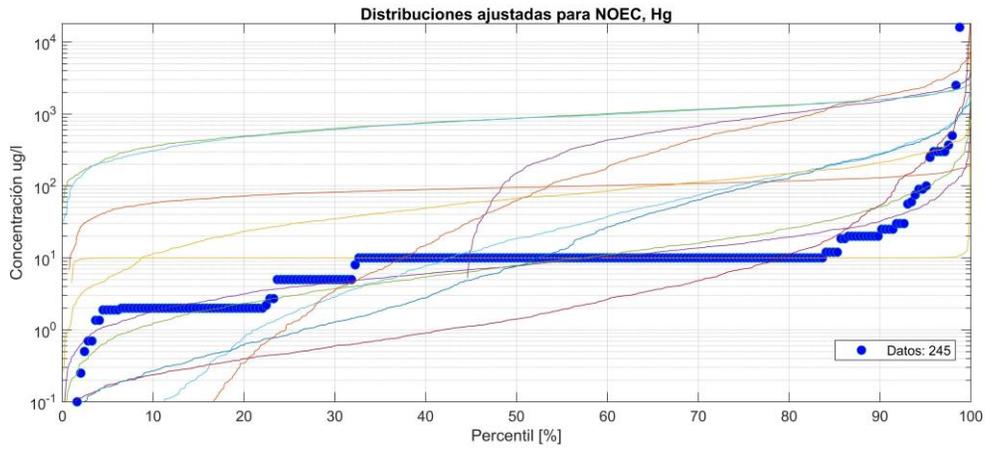


Figura 4.3-81 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para mercurio total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

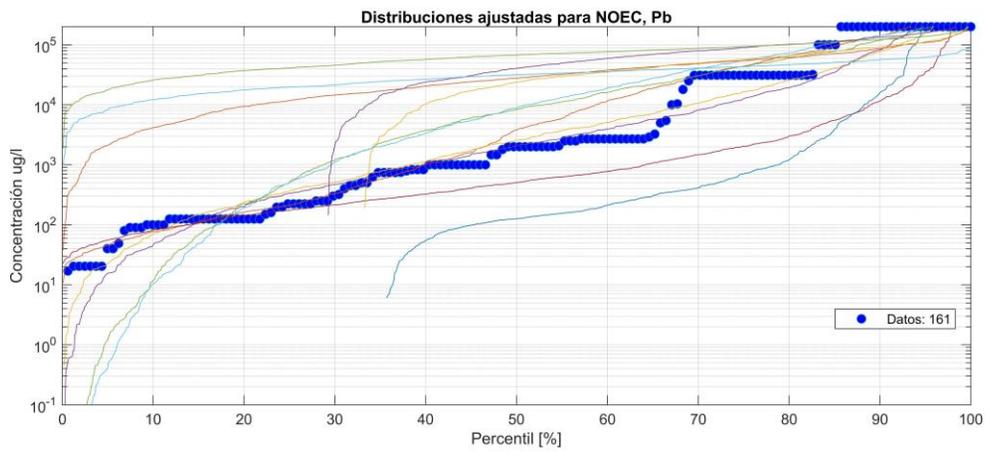


Figura 4.3-82 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para plomo total en la matriz agua. Fuente: Elaboración propia

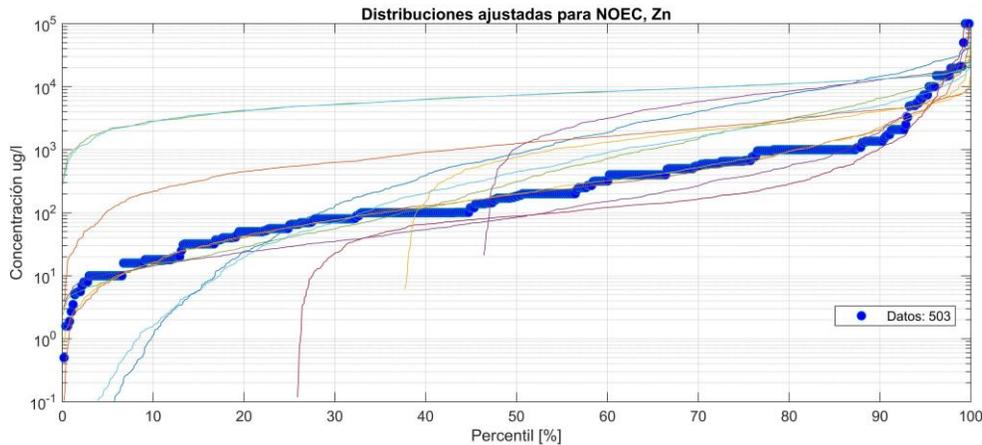


Figura 4.3-83 Ajuste de distribución estadística para los datos de NOEC para zinc total en la matriz agua. Fuente: *Elaboración propia*

Finalmente, a modo de resumen, la Tabla 4.3-39 muestra las funciones estadísticas que mejor se ajustaron a los datos asociados al endpoint ecotoxicológico NOEC. Estas funciones son utilizadas en la determinación del Cociente de Riesgo RQ.

Tabla 4.3-39 Estadísticos escogidos para el NOEC de la base de datos ecotoxicológica

Parámetro	Regresión
Arsénico total	Log-logística
Cadmio total	Log-normal
Cromo total	Birnbaum Saunders
Cobre total	Log-logística
Mercurio total	Log-logística
Plomo total	Birnbaum Saunders
Zinc total	Log-normal

4.3.1.6.4.5 Síntesis de resultados PEC y NOEC

A modo de observar los valores de concentración ambiental, versus de los efectos, a continuación la Figura 4.3-84 a la Figura 4.3-90 muestran de forma gráfica los valores PEC (Concentración Ambiental Estimada de Mejillones) y el NOEC (Concentración Sin Efecto Ecológico), para la matriz de agua y sedimento. Para este último caso, en el sedimento marino se tenía poca o nula información, se utilizó la normativa citada en el acápite anterior, a modo de comparación.

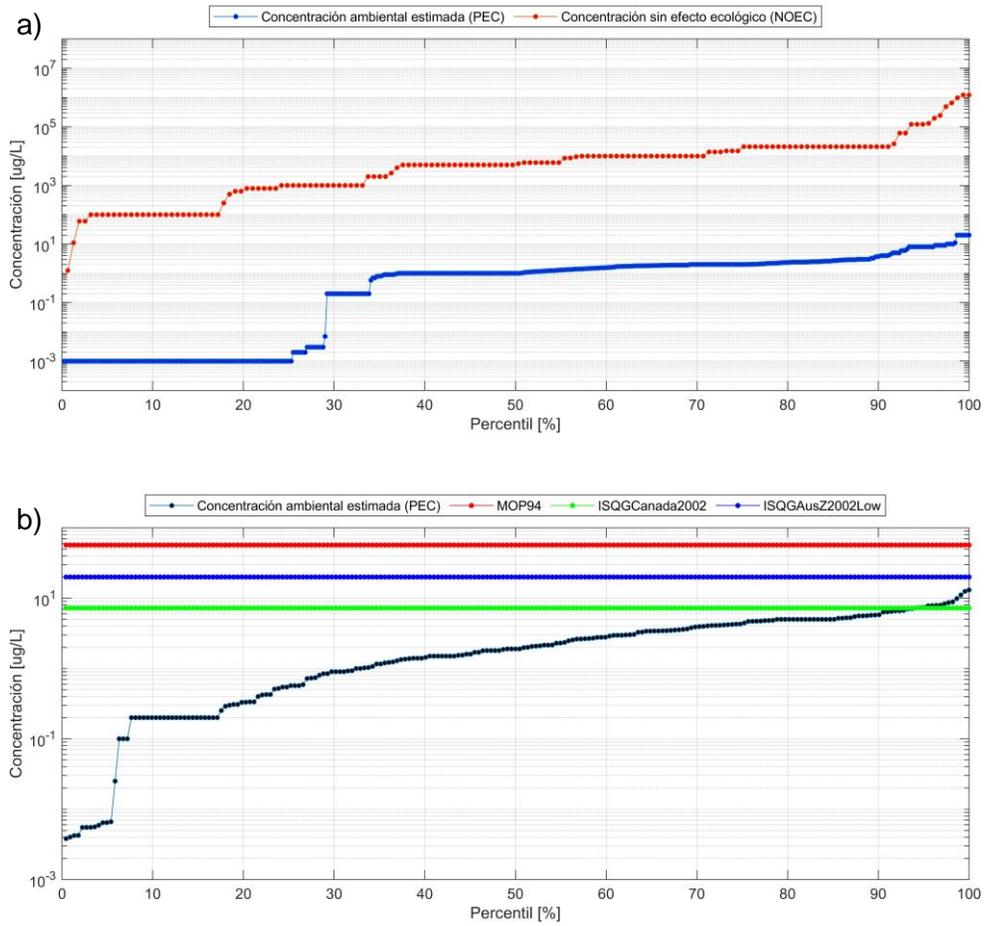
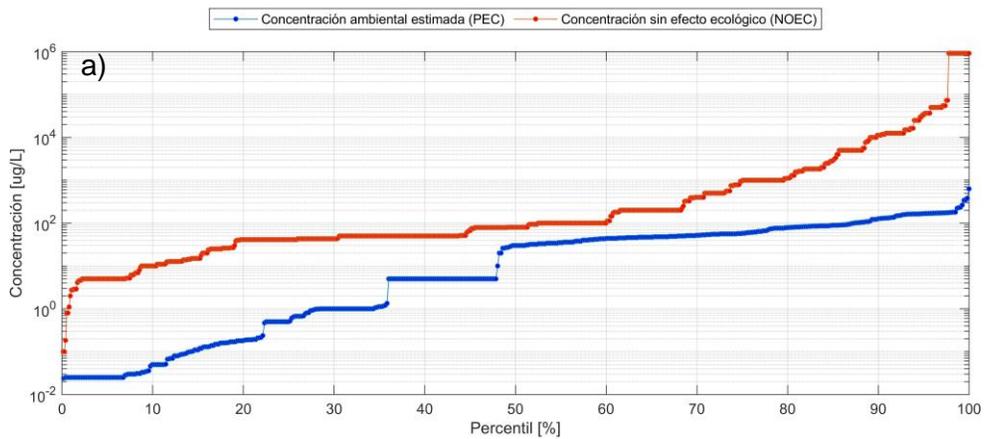


Figura 4.3-84 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del arsénico total en la matriz agua a) y sedimento b). Fuente: elaboración propia.



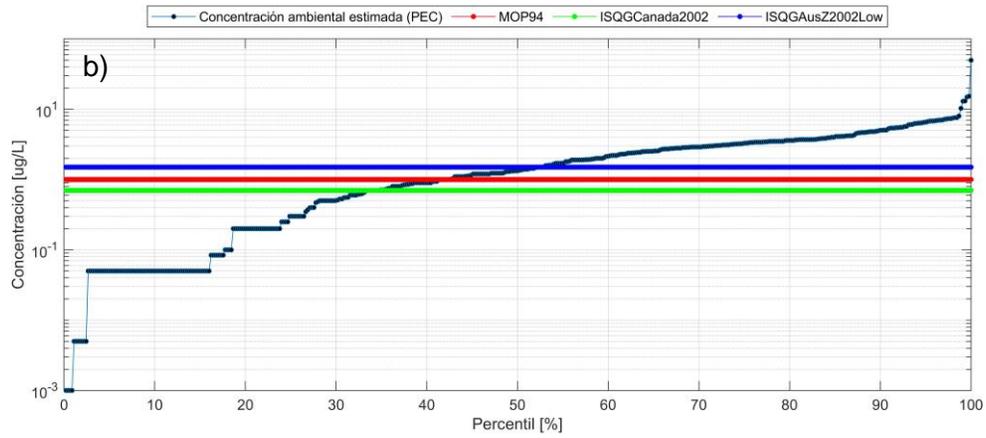


Figura 4.3-85 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del cadmio total en la matriz agua a) y sedimento b). Fuente: elaboración propia.

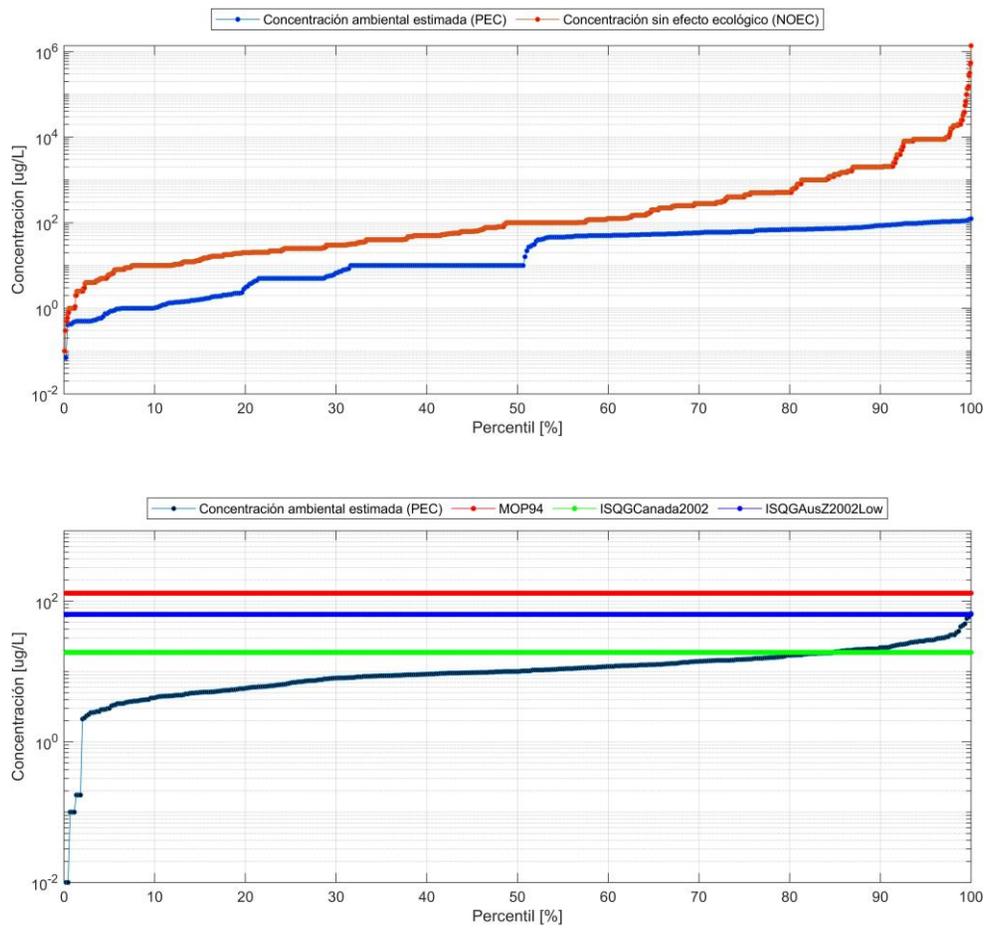


Figura 4.3-86 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del cobre total en la matriz agua. Fuente: elaboración propia.

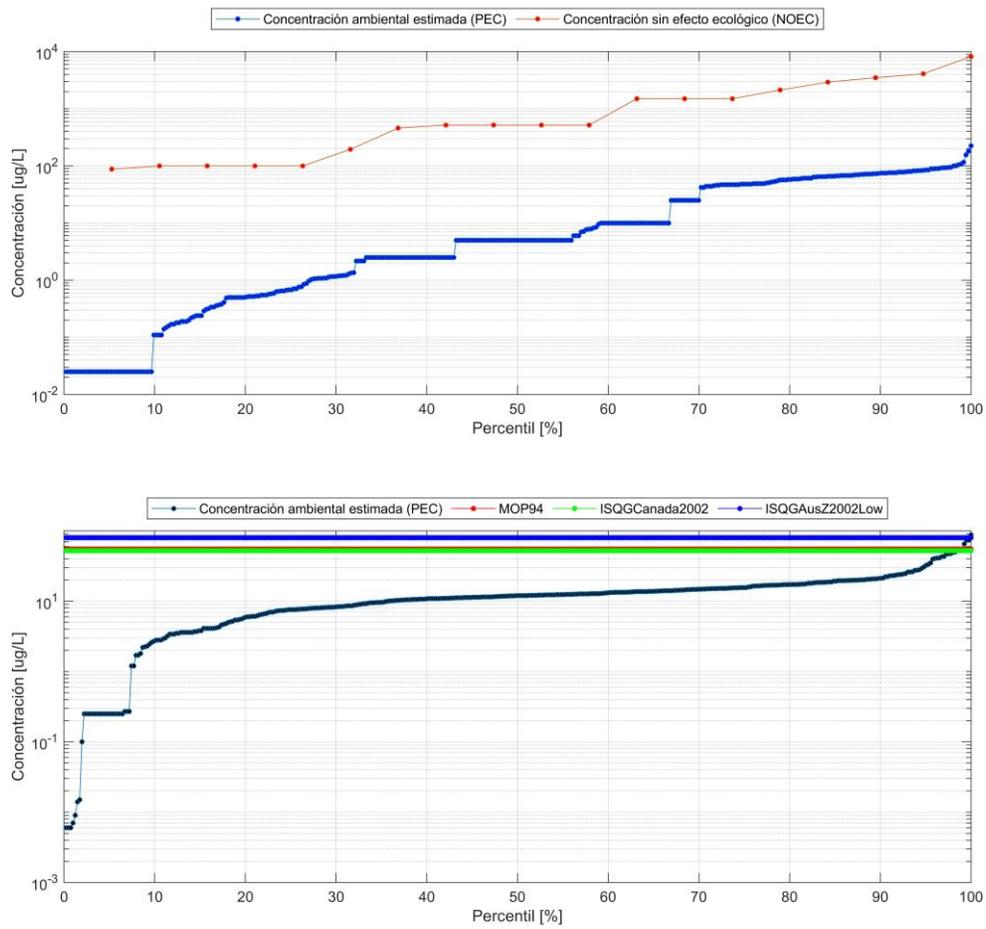


Figura 4.3-87 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del cromo total en la matriz agua. Fuente: elaboración propia.

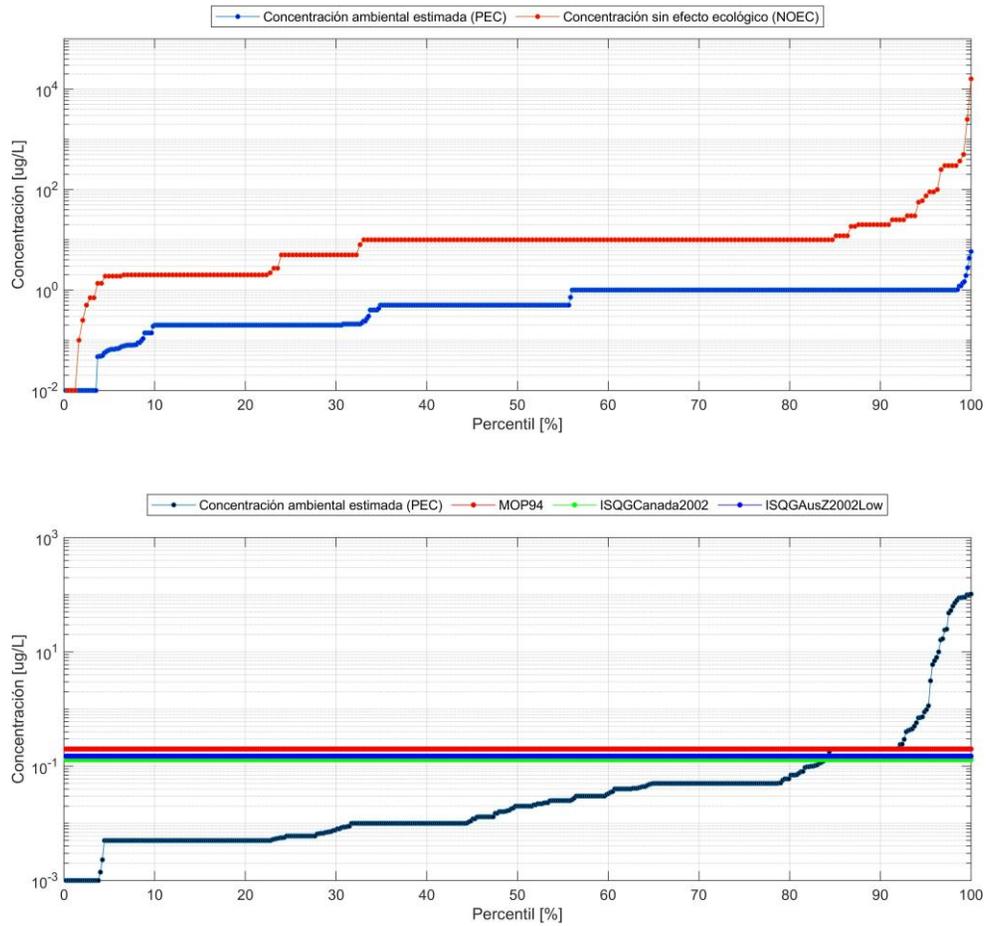


Figura 4.3-88 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del mercurio total en la matriz agua. Fuente: elaboración propia.

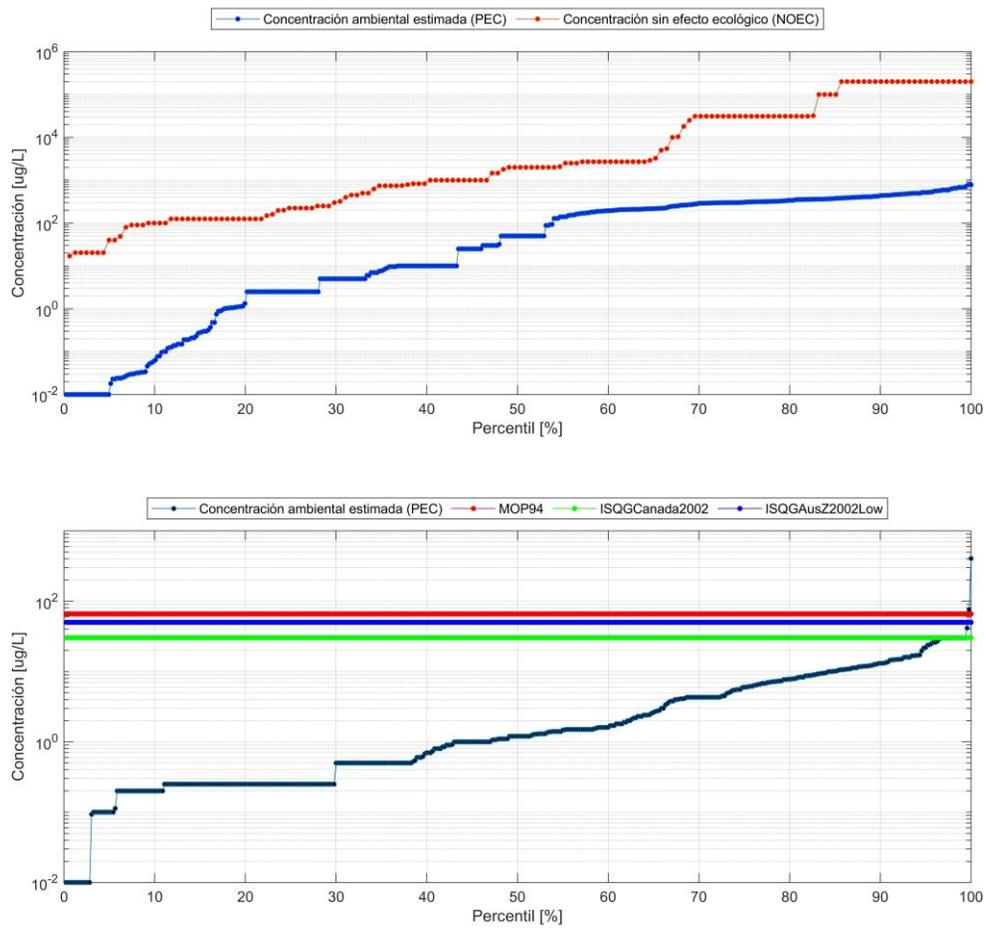


Figura 4.3-89 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del plomo total en la matriz agua. Fuente: elaboración propia.

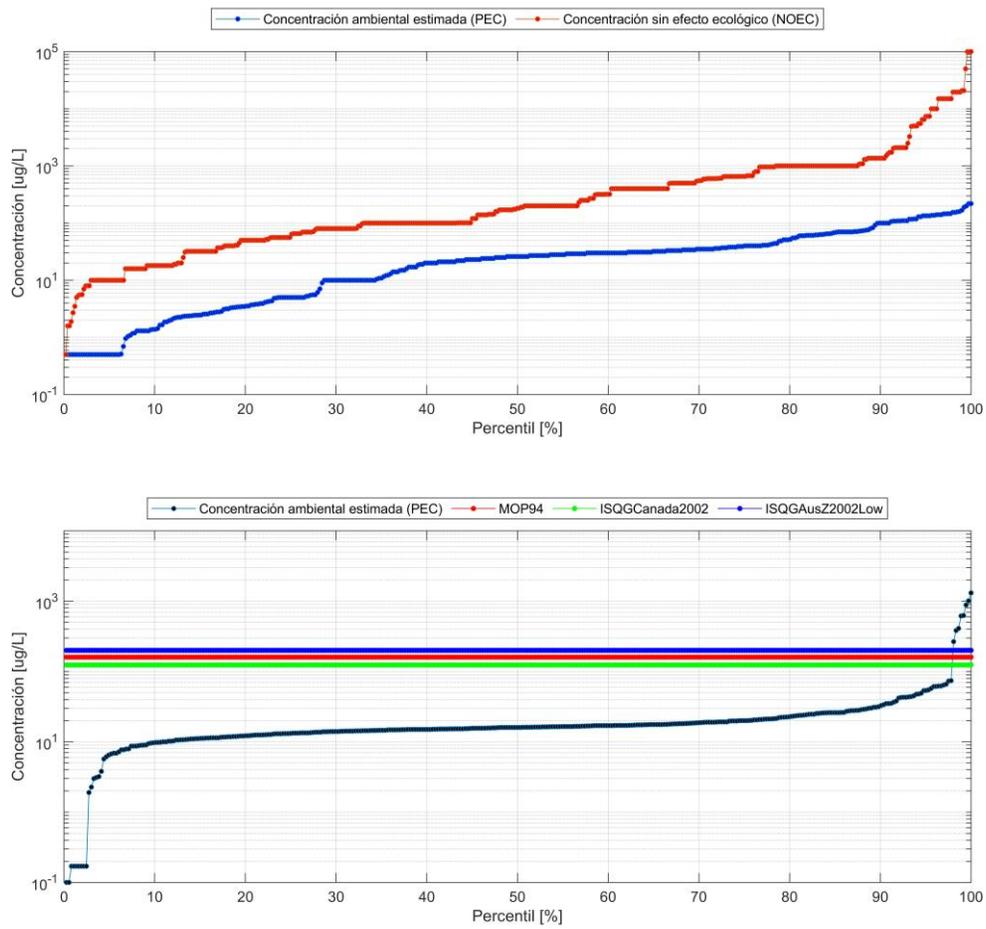


Figura 4.3-90 Concentración PEC de Mejillones y NOEC recopilado del zinc total en la matriz agua. Fuente: elaboración propia.

4.3.1.7 Fase 3: Caracterización del riesgo

A continuación, se presenta la fase 3 del ERE de bahía Mejillones del Sur. Esta se basó en principalmente determinar el Cociente de Riesgo RQ, Factores de Bioacumulación, y finalmente la determinación de niveles de protección ambiental.

4.3.1.7.1 Estimación del cociente de Riesgo RQ

Se estimó el cociente de riesgo (RQ), que consiste en la razón entre la PEC y la PNEC (Medina & Encina 2010). Se utilizó un factor de seguridad FS de 10, de acuerdo con lo recomendado por la Directiva Marco de la Comunidad Europea (EC, 2005) y SETAC (2010) y lo mencionado en la metodología del Análisis de Riesgo

El cálculo del RQ se basó en un remuestreo de 10.000 datos de series sintéticas entre el PEC y PNEC estimados en la fase anterior, para luego realizar el cálculo de $RQ = PEC/PNEC$.

Así, el RQ se calcula como sigue:

$$RQ = \frac{PEC}{NOEC} \cdot FS,$$

Donde,

RQ: Cociente de riesgo.

PEC: Concentración ambiental estimada.

NOEC: Concentración sin efecto ecológico

FS: Factor de seguridad.

Luego se estima el valor en que el cociente de riesgo RQ sea mayor a 1, vale decir, que los valores de exposición del ambiente PEC sean mayores a los valores predichos de concentración estimada sin efecto en organismos PNEC, con ello se estima un valor cuantificable de cuan probable es que las concentraciones tengan algún efecto sobre el ecosistema.

Es importante señalar que los NOEC utilizados corresponden en su mayoría a literatura y documentos internacionales, los cuales no siempre reflejarán las características propias del ecosistema de Mejillones. Asimismo, los compuestos utilizados en cada uno de los bioensayos recopilados tampoco reflejarán la especiación química de cada agente estudiado. Lo anterior refleja la necesidad futura de estudiar con más detalle el ecosistema

y los procesos desde el punto de vista fisicoquímico, de las interacciones que ocurren en el medio marino, tanto en Mejillones como en el mundo, por cuanto el problema de presiones ambientales en el medio marino son un tema global.

La Tabla 4.3-40 muestra el resumen de los resultados en la estimación del RQ donde se estima la probabilidad de que el RQ sea mayor que 1, que es lo mismo decir cuál es la probabilidad de que exista una afectación al ecosistema. Esta afectación se debe entender como una alteración hacia alguna especie existente de cualquier tipo, desde una disminución en su riqueza, abundancia, crecimiento, entre otros.

Cabe recordar que se utilizó un factor de seguridad FS de 10, lo que significa que amplifica las concentraciones ambientales en un orden de magnitud, si bien esto es conservador, esta consideración es una recomendación de la comunidad europea, en el sentido de cubrir todas las limitaciones de la metodología anteriormente expuesta.

Se puede apreciar que el mayor riesgo se encuentra en la matriz de sedimento, particularmente para el cadmio y cobre, por cuanto sus probabilidades de afectación al ecosistema son por sobre el 90% en alguno de los efectos evaluados. Le sigue el cromo, zinc y el mercurio en el sedimento. Por otro lado, el zinc total destaca en la matriz de agua, donde su probabilidad de riesgo es sobre el 47% de afectación. Las menores probabilidades de riesgo se encontraron para el agente plomo y arsénico, pero no nulas. La única probabilidad nula correspondió al mercurio total.

Tabla 4.3-40 Resumen de resultados de la estimación del Cociente de Riesgo RQ para los 7 agentes evaluados, en la matriz agua y sedimento de Mejillones. Los agentes fueron ordenados de mayor a menor según los mayores valores de los 4 RQ estimados.

Matriz evaluada	Agua	Sedimento		
		MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Cadmio total	41%	96%	97%	93%
Cobre total	58%	38%	97%	72%
Cromo total	19%	75%	76%	61%
Zinc total	47%	50%	60%	42%
Mercurio total	0%	64%	67%	66%
Arsénico total	2%	14%	72%	49%
Plomo total	26%	22%	34%	26%

A continuación, se presenta el detalle de los estadígrafos estimados para cada cociente de Riesgo. La Tabla 4.3-41 da cuenta de los valores de RQ para la matriz agua. En rojo se destacan los valores de RQ sobre 1, según cada percentil estimado.

Tabla 4.3-41 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para la matriz agua. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Parámetro	Arsénico total	Cadmio total	Cromo total	Cobre total	Mercurio total	Plomo total	Zinc total
Promedio	0,048	45,810	0,878	38,001	0,088	6,090	10,442
Máximo	30,709	9644,365	71,739	9114,877	53,610	676,168	1912,717
Mínimo	6,E-10	9,E-12	1,E-10	5,E-08	4,E-06	2,E-14	2,E-06
Desv. Estándar	0,572	316,663	2,837	264,002	0,598	23,430	56,788
Prob(RQ>1)	1,6%	41,0%	18,9%	57,6%	0%	26,4%	46,9%
Percentil [%]	Valor Percentil						
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1
30	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2
40	0,0	0,2	0,0	0,9	0,0	0,0	0,5
50	0,0	0,5	0,1	1,7	0,1	0,1	0,9
60	0,0	1,3	0,2	3,3	0,1	0,2	1,7
66	0,0	2,5	0,3	4,9	0,1	0,5	2,3
70	0,0	3,7	0,4	6,5	0,1	0,9	3,0
80	0,0	10,7	0,8	14,1	0,1	3,3	6,4
90	0,0	45,5	2,1	44,0	0,2	13,6	17,5
95	0,1	135,9	4,1	119,0	0,2	33,6	40,7
100	30,7	9644,4	71,7	9114,9	53,6	676,2	1912,7

Para el caso de la matriz sedimento, se realizó un muestreo de 10.000 datos PEC, los que fueron comparados con la normativa citada. De esta forma, se tienen 3 Cocientes de Riesgo RQ para cada norma, según cada agente evaluado. Las Tabla 4.3-42 a la Tabla 4.3-48 muestran los estadígrafos del RQ para la matriz de sedimento, para cada agente evaluado.

Tabla 4.3-42 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el arsénico en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Arsénico en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	0,462	3,638	1,317
Máximo	3,376	26,579	9,621
Mínimo	7,E-08	5,E-07	2,E-07
Desv. Estándar	0,451	3,552	1,286
Prob. (RQ>1)	13,8%	72,3%	48,8%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,1	0,0
10	0,0	0,2	0,1
20	0,1	0,6	0,2
30	0,1	1,1	0,4
40	0,2	1,8	0,6
50	0,3	2,6	0,9
60	0,4	3,5	1,3
66	0,5	4,2	1,5
70	0,6	4,7	1,7
80	0,8	6,3	2,3
90	1,1	8,7	3,2
95	1,4	10,8	3,9
100	3,4	26,6	9,6

Tabla 4.3-43 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el cadmio en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Cadmio en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	22,012	31,446	14,675
Máximo	266,592	380,846	177,728
Mínimo	5,E-03	7,E-03	3,E-03
Desv. Estándar	22,076	31,537	14,717
Prob. (RQ>1)	95,6%	96,9%	93,4%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,0	0,0
5	1,1	1,6	0,8
10	2,3	3,3	1,6

Cadmio en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
20	4,9	7,0	3,3
30	7,9	11,2	5,2
40	11,2	16,0	7,5
50	15,4	22,0	10,2
60	20,1	28,8	13,4
66	23,8	34,0	15,8
70	26,4	37,7	17,6
80	35,6	50,9	23,8
90	50,8	72,6	33,9
95	65,9	94,1	43,9
100	266,6	380,8	177,7

Tabla 4.3-44 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el cobre en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Cobre en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	0,943	6,557	1,886
Máximo	5,080	35,316	10,160
Mínimo	8,E-03	5,E-02	2,E-02
Desv. Estándar	0,655	4,555	1,311
Prob. (RQ>1)	37,6%	96,6%	72,2%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,1	0,0
5	0,2	1,2	0,4
10	0,3	1,8	0,5
20	0,4	2,8	0,8
30	0,5	3,7	1,1
40	0,7	4,6	1,3
50	0,8	5,5	1,6
60	0,9	6,6	1,9
66	1,1	7,4	2,1
70	1,1	7,9	2,3
80	1,4	9,8	2,8
90	1,8	12,7	3,6
95	2,2	15,3	4,4
100	5,1	35,3	10,2

Tabla 4.3-45 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el cromo en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Cromo en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	3,796	3,992	2,609
Máximo	736,526	774,549	506,362
Mínimo	5,E-03	5,E-03	3,E-03
Desv. Estándar	12,042	12,664	8,279
Prob. (RQ>1)	74,7%	76,2%	61,2%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,0	0,0
5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,5	0,3
20	0,8	0,9	0,6
30	1,2	1,2	0,8
40	1,5	1,6	1,0
50	1,9	2,0	1,3
60	2,4	2,6	1,7
66	2,8	3,0	2,0
70	3,2	3,4	2,2
80	4,4	4,6	3,0
90	7,1	7,4	4,9
95	11,1	11,6	7,6
100	736,5	774,5	506,4

Tabla 4.3-46 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el mercurio en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Mercurio en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	125,813	193,558	167,751
Máximo	4517,530	6950,046	6023,373
Mínimo	6,E-23	1,E-22	8,E-23
Desv. Estándar	295,732	454,972	394,309
Prob. (RQ>1)	64,3%	66,7%	65,9%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,1	0,0
30	0,3	0,5	0,5
40	2,0	3,1	2,7
50	7,6	11,7	10,1
60	24,0	36,9	31,9
66	43,1	66,3	57,5
70	60,3	92,8	80,4
80	155,7	239,5	207,6
90	384,0	590,8	512,0

Mercurio en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
95	695,2	1069,6	927,0
100	4517,5	6950,0	6023,4

Tabla 4.3-47 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el plomo en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Plomo en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	0,754	1,648	0,996
Máximo	18,314	40,025	24,175
Mínimo	1,E-03	3,E-03	2,E-03
Desv. Estándar	1,435	3,137	1,895
Prob. (RQ>1)	22,1%	34,1%	26,4%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		
0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,1	0,0
40	0,1	0,2	0,1
50	0,1	0,3	0,2
60	0,3	0,6	0,4
66	0,4	1,0	0,6
70	0,6	1,3	0,8
80	1,1	2,5	1,5
90	2,2	4,9	3,0
95	3,6	7,9	4,8
100	18,3	40,0	24,2

Tabla 4.3-48 Estadígrafos de los valores de RQ estimados mediante un muestreo de 10.000 datos sintéticos, para el zinc en el sedimento marino. En rojo se muestran los percentiles que superan el valor de 1.

Zinc en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
Promedio	1,713	2,210	1,370
Máximo	46,215	59,632	36,972
Mínimo	2,E-02	3,E-02	2,E-02
Desv. Estándar	2,353	3,036	1,882
Prob. (RQ>1)	50,2%	59,9%	41,6%
Percentil [%]	Valor RQ [-]		

Zinc en sedimento	MOP, 1994	ISQG Canadá, 2002	ISQG Australia y Nueva Zelanda, 2002
0	0,0	0,0	0,0
5	0,2	0,2	0,1
10	0,3	0,3	0,2
20	0,4	0,5	0,3
30	0,6	0,7	0,5
40	0,8	1,0	0,6
50	1,0	1,3	0,8
60	1,3	1,7	1,1
66	1,5	2,0	1,2
70	1,7	2,2	1,4
80	2,4	3,1	1,9
90	3,8	4,8	3,0
95	5,4	6,9	4,3
100	46,2	59,6	37,0

4.3.1.7.2 Factores de bioacumulación (FBA)

Se determinaron los factores de bioacumulación (FBA) para cada taxa, utilizando los valores de concentración de metales disueltos en agua o en sedimentos según corresponda, obtenidos en cada uno de los puntos de muestreo equivalentes de donde serán recolectados los organismos y de acuerdo con la siguiente función:

$$FBA = \frac{\text{Concentración de metal en tejido}}{\text{Concentración de metal en columna de agua o sedimentos}}$$

La Tabla 4.3-49 muestra los factores de bioacumulación en recursos hidrobiológicos provenientes de bahía Mejillones del Sur, para 10 metales en 27 organismos. Los metales en la tabla corresponden sólo a aquellos que presentaron valores cuantificables en la matriz (agua o sedimento) y que permitieron calcular los FBA. Sin embargo, en anexos digitales se puede encontrar la totalidad de metales comprometidos en la propuesta.

Para la mayoría de los organismos, los factores de bioacumulación fueron calculados a partir de la concentración de metales disueltos en el estrato fondo de la columna de agua. Para la Pulga de mar, se utilizó la concentración de metales en sedimentos intermareales del estrato inferior.

En general, los organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales arsénico, cadmio y cobre. Los organismos pelágicos (peces) presentan los mayores factores de bioacumulación para el metal mercurio. Tanto organismos pelágicos, como organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales hierro y zinc.

Con respecto al hábito alimenticio, los organismos carnívoros y filtradores presentaron, en general, los mayores factores de bioacumulación de metales.

Tabla 4.3-49 Factores de Bioacumulación en recursos hidrobiológicos provenientes de bahía Mejillones del Sur.

Nombre Común	Hábito alimenticio	Hábitat	Zinc (Zn)	Plomo (Pb)	Cobre (Cu)	Cadmio (Cd)	Arsenico (As)	Cromo (Cr)	Hierro (Fe)	Mercurio (Hg)	Molibdeno (Mo)
Anchoveta	Carnívoro	Pelágico	0,00	0,22	3,20	0,21	0,00	0,33	0,00	0,01	0,00
Bilagay	Carnívoro	Pelágico	1,81	0,22	0,15	0,38	0,84	0,12	0,00	0,00	0,00
Borrachilla	Carnívoro	Pelágico	1,68	0,41	0,17	0,01	0,00	0,04	0,20	0,00	0,00
Pejerrey	Carnívoro	Pelágico	3,25	2,25	0,55	0,46	0,20	0,15	0,00	0,00	0,00
Baunco	Carnívoro	Pelágico	1,89	1,26	0,29	0,06	0,00	0,04	0,84	0,07	0,00
Caballa	Carnívoro	Pelágico	1,09	0,27	1,44	0,17	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabinza	Carnívoro	Pelágico	1,01	0,22	0,43	0,09	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabrilla	Carnívoro	Pelágico	1,49	1,63	0,25	0,02	0,00	0,07	0,57	0,02	0,00
Castañeta	Carnívoro	Pelágico	0,93	0,13	0,28	0,20	0,37	0,06	0,00	0,00	0,00
Jerguilla	Carnívoro	Pelágico	2,36	0,08	0,08	0,20	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Lenguado	Carnívoro	Pelágico/Bentónico	1,69	0,10	0,08	0,04	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00
Lisa	Carnívoro	Pelágico	1,05	0,17	0,64	0,00	0,48	0,03	0,00	0,00	0,00
Jaiba	Carnívoro	Bentónico	58,45	5,59	8,46	6,67	6,85	1,36	0,00	0,00	0,00
Locate	Carnívoro	Bentónico	14,73	402,38	10,92	5,51	26,55	0,25	0,00	0,00	0,00
Loco	Carnívoro	Bentónico	4,99	1,20	4,69	5,03	5,12	0,44	0,00	0,00	0,00
Pulpo	Carnívoro	Bentónico	15,64	1,08	6,81	1,63	14,00	0,08	0,00	0,00	0,00
Choro zapato	Filtrador	Bentónico	3,55	1,81	1,40	28,17	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
Culengue	Filtrador	Bentónico	6,11	0,12	0,37	3,64	1,75	0,30	0,00	0,00	0,00
Almeja	Filtrador	Bentónico	5,09	0,73	1,16	5,84	0,00	2,41	9,23	0,01	0,00
Navajuela	Filtrador	Bentónico	6,47	0,23	1,40	10,16	0,00	0,18	4,78	0,00	0,00
Ostión	Filtrador	Bentónico	19,73	2,07	1,12	21,86	0,96	0,37	0,00	0,00	0,00
Pulga de mar	Filtrador-suspensívoro	Bentónico	1,22	0,00	4,14	5,85	0,90	0,06	0,36	1,12	6,00
Erizo Negro	Herbívoro	Bentónico	3,21	0,54	0,74	6,18	0,00	0,12	1,78	0,00	0,00
Erizo rojo	Herbívoro	Bentónico	4,21	0,17	0,29	11,86	3,34	0,34	0,00	0,00	0,00
Lapa	Herbívoro	Bentónico	1,61	0,67	10,00	3,53	1,10	1,15	0,00	0,00	0,00
Pelillo	Productor primario	Bentónico	0,94	0,78	0,26	7,58	1,38	0,31	0,00	0,00	0,00
Huiro	Productor primario	Bentónico	1,13	2,45	0,32	10,46	5,07	0,43	0,00	0,00	0,00

4.3.1.7.3 Estimación de niveles de protección

La determinación de niveles de protección estimados a partir de una evaluación de riesgo ecológico, debieran incluir tanto la variabilidad como la incertidumbre inherente al problema, para lo cual se deben utilizar métodos de simulación probabilística, que introducen una serie de ventajas por sobre los enfoques determinísticos, entre las que se cuentan:

- (i) Los valores de toxicidad (PNEC) y exposición (PEC), se pueden definir como distribuciones estadísticas que cubren el rango completo de valores posibles y son distribuidos de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia;
- (ii) Los parámetros de PNEC y (PEC) pueden variar aleatoria y simultáneamente, permitiendo la propagación de la incertidumbre a través del modelo;
- (iii) Las simulaciones de Montecarlo generan distribuciones de frecuencia estadísticamente válidas y totalmente caracterizadas, cubriendo el rango completo de valores posibles. Adicionalmente, se debe realizar un análisis de sensibilidad para determinar aquellas variables que influyen en mayor medida en el resultado final y análisis de importancia de la incertidumbre para determinar las variables que influyen en mayor medida en el resultado final, de tal forma que los valores protección ambiental permitan efectivamente proteger los ecosistemas.

Basando en los antecedentes descritos, surge la necesidad de establecer los niveles de protección de ecosistemas acuáticos y determinar las respuestas de organismos frente a diversos xenobióticos. Si bien muchas de las pruebas ecotoxicológicas están estandarizadas, así como las especies a utilizar, el objetivo final es que los resultados permitan proteger los ecosistemas naturales. Complementariamente, los enfoques probabilísticos de estimación del riesgo ecológico incorporan la variabilidad e incertidumbre asociadas a las respuestas ecotoxicológicas de los diversos niveles tróficos, permitido realizar estimaciones de niveles de protección que efectivamente protegen los ecosistemas.

Sobre la base de las distribuciones probabilísticas de los NOEC obtenidos en las bases de datos y de los bioensayos ecotoxicológicos realizados en este estudio, se estimó una concentración que proteja el 95% de las especies consideradas en la distribución denominado HC5% (EC, 2005). Se consideró un valor de 10, como factor de seguridad (SETAC, 2010).

Para la estimación de los límites normativos de la fase disuelta, se han utilizado los factores de conversión de la EPA (National Recommended Water Quality Criteria for aquatic life, Apendix A).

En el caso del sedimento marino, se utilizó la normativa citada más restrictiva.

La Tabla 4.3-50 muestra los valores determinados según los lineamientos anteriores.

Tabla 4.3-50 Concentraciones ambientales límite recomendadas para bahía Mejillones del Sur

Matriz	Columna de agua		Sedimento
	Fracción total [ug/l]	Fracción disuelta [ug/l]	Fracción total [mg/kg]
Arsénico	100,00	100	7,24
Cadmio	5,00	4,97	0,70
Cromo	93,40	92,75	18,70
Cobre	6,10	5,063	52,30
Mercurio	1,89	1,61	0,13
Plomo	40,00	38,04	30,20
Zinc	10,00	9,46	124,00

El establecimiento de estos límites sobre la bahía de Mejillones del Sur supondrá una protección del 95% de las especies que viven en este ecosistema. Por tanto, las cifras anteriores resultan de suma utilidad para una futura norma secundaria implementada por las autoridades.

Tabla 4.3-51 Valores límites propuestos de la fracción disuelta de contaminantes en columna de agua de mar, para bahía Mejillones, comparación con la normativa internacional. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Arsénico disuelto	Cadmio disuelto	Cromo disuelto	Cobre disuelto	Mercurio disuelto	Plomo disuelto	Zinc disuelto	
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	
Concentración peligrosa para el 5% de las especies (HC5%)	100	5,00	93,4	6,1	1,89	40,0	10,0	
Concentración ambiental estimada (PEC) en Bahía Mejillones (valor percentil 95%)	34,95	35,0	20,0	20,0	3,0	88,25	204,5	
EPA. 2009 (US)	CMC (Agudo)	69,00	40,00	-	4,80	1,80	210	90
	CCC (Crónico)	36,00	8,80	-	3,10	0,94	8,1	81
CCME. 2007 (Canadá)	12,50	0,12	-	-	-	-	-	
Australia and New Zealand Environment. 2000	-	5,5	-	1,3	-	4,4	15	
Water Quality Standards (Washington)	CMC (Agudo)	69,00	42,00	-	4,80	1,80	210	90
	CCC (Crónico)	36,00	9,30	-	3,10	0,025	8,1	81
Oregon Department of Environmental Quality. 2015	CMC (Agudo)	69,00	40,00	-	4,80	2,10	210	90
	CCC (Crónico)	36,00	8,80	-	3,10	0,025	8,1	81
Ecological Screening Criteria ASM (New Jersey)	Agudo	69,00	40,00	-	4,80	1,80	210	90
	Crónico	36,00	8,80	-	3,10	0,94	24	81

Tabla 4.3-52 Valores límites propuestos de contaminantes en sedimentos marinos, para bahía Mejillones, comparación con la normativa internacional. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Mercurio	Plomo	Zinc
Unidad	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Concentración peligrosa para el 5% de las especies (HC5%)	7,24	0,70	52,3	0,13	0,13	30,2	124,0
Concentración ambiental estimada (PEC) en Bahía Mejillones (valor percentil 95%)	8,82	6,59	32,69	27,82	0,99	22,9	54,06
CCME. 2002 (Canadá)	ISQG	7,24	0,7	52,3	18,7	0,13	124
	PEL	41,6	4,2	160	108	0,7	271
Australia and New Zealand Environment. 2000	-	1,5	80	65	0,15	-	200

De estas tablas se observa que el principal riesgo está asociado a la matriz de sedimentos, donde se observa excedencia en los parámetros arsénico, cadmio, cobre y mercurio. En agua, se observa excedencia de cadmio, cobre y zinc. Este riesgo se incrementa por la presencia de cantidades importantes de materia orgánica que está siendo descargada a la bahía, la cual interactúa químicamente con los metales, generando bajo condiciones ambientales específicas, mayor biodisponibilidad de estos para la biota local.

Al analizar los valores de bioacumulación (Tabla 4.3-49) e puede observar que los organismos cuyo principal hábitat es la columna de agua, presentan algún grado de bioacumulación, principalmente zinc, lo que es consistente con los valores en excedencia que muestra la Tabla 4.3-51, aunque los factores son bajos. Una situación diferente es la congruencia de los valores de bioacumulación con los de excedencia que muestra la Tabla 4.3-52 en aquellos organismos cuyo hábitat principal son los sedimentos. Se observa que la señal de los elementos en excedencia en el medio como cadmio, cobre y zinc se encuentra en el tejido de los organismos, mostrando factores de bioacumulación más altos. Destacan el ostión, la jaiba, el pulpo y el locate con índices de bioacumulación sobre 10 y hasta 58 (jaiba) para zinc. En cadmio, destacan huíro, ostión, erizo rojo y choro zapato. El mercurio está siendo bioacumulado por el organismo locate, que vive así mismo en el sedimento.

Desde la perspectiva de los bioensayos, aquellos realizados en elutriado de sedimentos mostraron valores significativos de inhibición en diferentes procesos biológicos e incluso letalidad en las diferentes especies estudiadas.

Lo anterior indica que el riesgo ecológico asociado a la excedencia de algunos de los metales presente en los sedimentos de la bahía de Mejillones es alto, donde un 57% de los elementos considerados de importancia ambiental, superaron el valor considerado seguro para proteger el 95% de las especies. Lo anterior, resulta en efectos de inhibición de los procesos biológicos y/o letalidad en diversas especies marinas, además de la bioacumulación de metales en los tejidos de especies de importancia ecológica y comercial.

4.3.2 Riesgo de alteración a los procesos ecosistémicos

Un hecho importante de los ecosistemas marinos caracterizados es que estos fueron transformados en el tiempo, como consecuencia de las modificaciones realizadas en los flujos de materiales que se descargan en la bahía de Mejillones.

Principalmente, se observa que los sedimentos de la bahía presentan valores de concentración de algunos metales relativamente altos, en conjunción con la incorporación de flujos másicos importantes de materia orgánica, proveniente fundamentalmente de la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad y de descargas de RILES altos en DBO₅ (indicador de alta concentración de materia orgánica) provenientes de empresas locales. Los cuales se concentran principalmente en el saco de la bahía y a profundidades inferiores a los 25 m, debido a los patrones de circulación de las aguas. Es importante señalar que la bahía de Mejillones presenta condiciones naturales y cíclicas de baja disponibilidad de oxígeno en zonas próximas a los sedimentos a profundidades mayores de 25 m, lo cual frecuentemente genera condiciones de anaerobiosis (refrendado por valores redox inferiores a cero) y acumulación de la materia orgánica en el fondo marino.

Las condiciones en las que se encuentran los sedimentos en la bahía, entre ellos baja oxigenación y contenidos de metales en concentraciones superiores a las toleradas por el 95% de las especies, producen efectos agudos y crónicos y de bioacumulación sobre organismos de distintos niveles tróficos que habitan el fondo marino, y en menor medida, en la columna de agua. De este modo, bajo estas circunstancias, los procesos ecológicos fundamentales de los ecosistemas, que son los ciclos biogeoquímicos, flujos de energía y dinámica de las comunidades, se ven alterados. Su alteración provoca que los ecosistemas cambien en estructura y funcionamiento, generando procesos de sucesión cuyo resultado final (o intermedio) es un ecosistema nuevo, diferente al original.

A partir de lo anterior, es posible indicar que la bahía de Mejillones del Sur, dadas las condiciones ambientales que presenta, tanto por razones naturales como de origen antrópico, presenta un riesgo alto de alteración de los procesos ecosistémicos que sustentan los ecosistemas presentes, principalmente los que se organizan en torno a los sedimentos.

4.3.3 Sugerencias de comunicación del riesgo encontrado

La comunicación de los riesgos es una acción que posibilita la comprensión e internalización de una situación compleja y conflictiva que afecta, o la calidad de vida de la población, o los componentes del ambiente donde las personas y sus organizaciones se mueven y desempeñan.

En la comunicación del riesgo a los actores del territorio normalmente se observan tres reacciones comunicativas frente al mensaje. El primero dice referencia a que lo comunicado no es un problema y, por lo tanto, no es necesario ocuparse. Esta reacción en el caso de la bahía de Mejillones puede identificarse en representantes del sector de las empresas o asociaciones gremiales. La segunda opción es identificar lo comunicado como un problema

de otros, donde las acciones a seguir no están dentro del propio ámbito de preocupación. Esta reacción normalmente se da en aquellos sectores de la población que no identifican que sus acciones son parte del problema y en Mejillones puede estar representada en el sector de la pesca artesanal y la población en general. La tercera reacción es identificarlo verdaderamente como un problema, los actores corresponden frecuentemente a instituciones, gestores del riesgo, Universidades, Municipio y otras organizaciones asociadas a temas medioambientales. Estos actores son activos en hacer propuestas para mitigar y controlar, pero normalmente estas acciones se limitan a su ámbito, gubernamental o institucional, lo que diluye la comunicación del riesgo hacia la información de una eventual amenaza (Vallejos-Romero, A y Oñate M., 2013)

Dado lo anterior, uno de los aspectos clave es que los actores identifiquen que son parte del origen y solución del problema. Esto se logra, en primer lugar, desde una base de información y conocimiento compartido, y que la acción de comunicar el riesgo no se limite a una entrega de información, sino un acto orientado a generar un diálogo donde se permitan acciones desde los diferentes actores del territorio, desde el momento en que ellos reconocen que, al ser parte del origen del problema, son parte también de la solución.

Entonces, una estrategia adecuada de comunicación del riesgo es generar formas de gestión que promuevan una comunicación donde prime el diálogo recíproco con todos los involucrados, que permita iterar las veces necesarias las posibles soluciones y, en forma paralela, se den las condiciones para asumir responsabilidades conjuntas en términos de crear un sistema de gobernanza del riesgo.

El propósito fundamental de la comunicación del riesgo es la generación de conductas transformadoras, las cuales, mediante acciones concretas, puedan modificar el curso de los acontecimientos actuales.

4.3.4 Evaluación de Riesgo para la Salud Humana

Un diagnóstico de Situación de Salud de una comuna permite conocer el nivel de salud de sus habitantes, compararlo con el de otras localidades y/o el promedio del país, de modo de identificar los problemas prevenibles prioritarios que la aquejan, bajo esta premisa tiene mucha utilidad para la planificación de intervenciones en Salud Pública. En esta oportunidad se llevó a cabo un diagnóstico de salud poblacional para obtener los datos de contexto requeridos de modo de mejorar la interpretación de los resultados de la evaluación de la exposición y del riesgo para la salud de la población, que se realizó en el marco del estudio de Evaluación de Riesgo Ecológico de la bahía de Mejillones.

Por otra parte, la Evaluación de Riesgo es una metodología que permite tomar decisiones en materia de prevención de enfermedades sobre la población. Permite estimar la magnitud de la probabilidad de aparición de enfermedades y efectos adversos sobre la población en presencia de contaminación del medio ambiente. En este caso entrega respuesta a la pregunta ¿cuál es el riesgo de los habitantes de Mejillones frente a las condiciones ambientales imperantes en la bahía de Mejillones? Al ser un análisis ecológico, no infiere resultados generalizables al nivel individual, ni para los habitantes de Mejillones ni otras localidades en el país. Si permite fundamentar acciones poblacionales. Es decir entrega información para el establecimiento de política pública sobre la población de Mejillones y otras localidades que compartan similitudes con dicha comuna. La evaluación de riesgo adecuadamente realizada siempre sobre estima el riesgo, por lo mismo si los resultados del cálculo de riesgo para efectos crónicos sistémicos (IP) y para efectos cancerígenos (ILCR) que se comparan con valores referenciales, salen claramente por debajo de ellos (menor a 1 en el caso de IP y menor a 1 caso por millon cuando se evalúa efecto cancerígeno) se puede decidir que existiendo riesgo, este es aceptable para la población. Por lo que desde un punto de vista de la gestión, no se requiere continuar realizando intervenciones de prevención.

Cabe señalar que la información base utilizada en los cálculos de la presente ERSH, fue validada en el Taller de Expertos, en donde se consideró priorizar por la generalidad de los datos por sobre la precisión y validación estadística de ellos. Es por ello por lo que los resultados de esta evaluación deben ser tomados con cautela, por cuanto la información de metales evaluado en organismos para el consumo humano, no tienen la robustez estadística necesaria para determinar de forma clara un riesgo, sino más bien responden a hallazgos iniciales que den luces de potenciales riesgos que deberán ser evaluados a futuro por los organismos estatales competentes.

4.3.4.1 Metodología

La metodología utilizada para la evaluación y caracterización del riesgo a la salud humana consideró los criterios establecidos en la Resolución Exenta N° 406 que aprueba la “Guía Metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes y sus anexos” y la “Guía Evaluación de Riesgo para la Salud de la Población del Servicio de Evaluación Ambiental”.

Como se planteó en la introducción, la metodología de evaluación de riesgo comprende varias etapas: la identificación del peligro, elaboración de un mapa conceptual y evaluación de la exposición, evaluación dosis-respuesta y caracterización de la exposición.

La evaluación de riesgo de los contaminantes presentes en la bahía de Mejillones se realizó mediante un análisis que comprendió los siguientes pasos fundamentales:

- a) La identificación de contaminantes de origen químico presentes en la bahía y la búsqueda de información relativa a efectos adversos que ellos pueden provocar sobre la población que la habita.

La relación entre la exposición a los contaminantes y los efectos adversos se realizó por medio de la revisión de bases de datos públicas toxicológicas (ATSDR- IRIS – IARC) y publicaciones de estudios epidemiológicos de interés.

El resultado de este paso es proporcionar información sobre:

- Los contaminantes de interés para la salud pública que fueron objeto de la evaluación de riesgo.
 - Especificar los efectos a la salud de los contaminantes antes mencionados, particularmente identificando si se trata de contaminantes químicos no cancerígenos o cancerígenos.
- b) Modelo Conceptual (MC) del emplazamiento o Evaluación de la Exposición. El MC es una representación esquemática de las fuentes de contaminantes, los mecanismos de emisión de estos, los medios de transporte, potenciales rutas de exposición y receptores.

Se identificaron rutas de exposición completas y rutas de exposición potencial.

- c) La Evaluación de la exposición para la bahía de Mejillones contempló también la estimación de la dosis de exposición. Esto incluyó supuestos de exposición, respecto de la frecuencia, duración, vía y extensión de la exposición.

El escenario de exposición analizado corresponde a contacto directo, en actividad recreativa, que puede ser baño en el litoral, inmersión en el agua, exposición a aerosoles durante el baño o pesca en bote artesanal. Para este cálculo se consideraron los valores observados de metales disueltos en la columna de agua. También se evaluó la vía digestiva, contemplando una ingesta periódica de alimentos del mar (mariscos y pescados), provenientes de la bahía de Mejillones del Sur.

El escenario mencionado anteriormente se evaluó en la población menor de edad (edad < 18 años) y en la población adulta, utilizándose de manera precautoria los valores observados de contaminantes en la columna de agua y en los alimentos (peces, mariscos y algas) más consumidos por la población.

Para el análisis de la exposición al agua de mar se aplicó el razonamiento definido por la “Guía para la Evaluación de Impacto en la Salud del Servicio de Evaluación Ambiental” antes mencionada que en lo medular contempla evaluar el riesgo utilizando los siguientes criterios.

- “a) No supera valores de exposición establecidos en normas primarias de calidad ambiental nacional.

- b) No supera valores de exposición establecidos en normas primarias de estados de referencia.
- c) No aumenta un riesgo pre- existente.
- d) No supera el nivel de riesgo incremental aceptado para los contaminantes cancerígenos, considerando los niveles, frecuencia y duración de la exposición.
- e) No supera valores referenciales para el caso de los contaminantes no cancerígenos, considerando los niveles, frecuencia y duración de la exposición”¹.

La evaluación del literal a) tuvo en consideración los valores establecidos por el DS 144/2009 que establece normas de calidad primaria para la protección de las aguas marinas y estuarinas aptas para actividades de recreación con contacto directo y el Reglamento Sanitario de los Alimentos. Existiendo norma primaria vigente no se realizó análisis respecto de estados de referencia definidos en el literal b).

Para evaluar el literal c) resultaría interesante evaluar la incorporación de los contaminantes estudiados que pudieran estar ingresando por medio de otras exposiciones, tales como el aire y el agua potable. Sin embargo, dichos antecedentes están fuera del alcance de este informe.

Para evaluar los literales d) y e) fue menester estimar la exposición con la siguiente fórmula genérica del cálculo de dosis diarias de exposición:

$$D = \frac{C \times TC \times TE \times FE \times DE}{Pc \times TP}$$

En donde:

D = Dosis de contaminante (dosis suministrada) (mg/Kg/día)

C = Concentración² de exposición en la columna de agua de mar (mg/l)

TC = Tasa de contacto (l/hr)

TE= Tiempo de exposición (horas/día)

FE = Frecuencia de exposición (días al año)

DE = Duración de la exposición (años)

Pc = Peso corporal (Kg)

¹ Servicio de Evaluación Ambiental Guía del artículo 11 de la Ley de Bases 19300 letra a) Riesgo para la Salud de la Población, 2012.

² Se usará la concentración observada en la columna de agua

TP = Tiempo ponderado (días)

Para evaluar el riesgo de la alimentación, se calculó la ingesta diaria estimada, mediante la siguiente fórmula:

$$IDE = \frac{TI \times C \times FE \times DE}{PC_p \times TP}$$

En donde:

IDE = Ingesta diaria estimada (mg/Kg peso/ día)

TI = tasa de ingesta de pescado (g/día), correspondió al percentil 90 de los datos de consumo

C = Concentración del arsénico, cadmio, cromo, plomo, mercurio e hidrocarburo en el pescado y marisco (mg/g peso seco)

FE= Frecuencia de la exposición (días/año)

DE= Duración de la exposición (años)

PC_p = peso corporal promedio (Kg)

TP = Tiempo ponderado (días)

Se asumió que los metales se absorbían completamente y que la técnica de cocina no alteraba la concentración del metal en los alimentos, tampoco se calculó el peso seco del alimento consumido. También, se asumió para el cálculo del incremento de riesgo cancerígeno (ILCR) que el 3% del arsénico total medido en pescados y mariscos correspondería a arsénico inorgánico.³

La Dosis Total correspondió a la suma de la exposición por contacto agua más la ingesta diaria estimada por la alimentación, lo que entrega la dosis ambiental recibida por los habitantes de la comuna. El alimento seleccionado fue aquel que contenía los metales estudiados y el que se consumió con mayor frecuencia entre los adultos, contemplando que son ellos los que adquieren la alimentación y los escolares pueden estar expuestos a dicho consumo. Para el cálculo del riesgo incremental de cáncer (ILCR) se consideró la única información disponible de *slope cáncer factor*⁴ que corresponde a arsénico inorgánico en agua, pues no existe dicho factor para alimento.

Para la evaluación de la exposición se realizó un levantamiento en terreno de modo de estimar los factores de exposición y calcular la tasa de ingesta de alimentos del mar. Para este efecto se realizó una encuesta en Mejillones durante el segundo semestre del año

³ Gbogbo F et al Risk of heavy metal ingestion from the consumption of two commercially valuable species of fish from fresh and coastal water of Ghana. PLOS/one <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194682> , march 23, 2018.

⁴ EPA IRIS cancer slope factor of 1,5 mg/kg/day.

2018. Se consideró el percentil 90 de los valores observados para el cálculo de las dosis de exposición. El consumo se calculó al considerar las preferencias de consumo de la población y la cantidad de producto señalado.

Dentro de la encuesta realizada a la población de Mejillones, en las opciones de consumo se pusieron opciones de alimentos enlatados y no enlatados, seleccionando todos aquellos que tienen un consumo regular dentro de la dieta de los encuestados. Luego, se consideró que del total de días dentro del año que declaró consumir el encuestado, una fracción de estos corresponde a un consumo efectivo de alimentos no enlatados. Esta fracción se estimó al considerar isoprobable la elección de los alimentos dentro del rango de tiempo de estudio, ie, que todos los alimentos tienen la misma preferencia por parte del encuestado, obteniendo un factor “f” de la forma:

$$f = \frac{p_{ne}}{p_{ne} + p_e}$$

donde:

p_{ne} : cardinal de productos no enlatados seleccionados por el encuestado.

p_e : cardinal de productos enlatados seleccionados por el encuestado.

De manera tal que, cuando el encuestado declara no consumir productos enlatados, la frecuencia de exposición corresponderá al total de días declarados de consumo de productos del mar, mientras que, en el caso de no declarar opciones de consumo de productos no enlatados, los días de consumo serán reducidos a 0.

$$FE_i = f_i \times FE_i^*$$

Donde:

f_i : factor de ajuste de consumo del individuo i.

FE_i^* : Frecuencia de exposición declarada por el individuo i.

FE_i : Frecuencia de exposición de individuo i, ajustada según preferencias de consumo.

En cuanto al tratamiento de la información se destaca lo siguiente:

- Las preferencias de alimentos que fueron dejadas en blanco por parte de los encuestados fueron consideradas como valores “0”, es decir, no consume.
- Los valores de gramos por porción que fueron dejados vacíos se consideraron: 1) Igual a 0 cuando el encuestado no seleccionó ninguna especie en las opciones de consumo; 2) Iguales a la mediana cuando seleccionaron especies de consumo.
- Los valores de frecuencia de consumo que fueron dejado en blanco por parte de los encuestados se consideraron como: 1) 0 cuando el encuestado no seleccionó

ninguna opción de consumo en las listas de especies; 2) igual a la mediana cuando en la lista de especies seleccionó alguna opción de consumo.

- Las frecuencias de asistencia a la playa que fueron dejadas en blanco se consideraron como valores nulos.

Para la evaluación de incertidumbre, se evaluaron las fórmulas de dosis de ingesta y por contacto del agua, considerando los valores de FE y TI isoprobables, obteniendo así los valores de IP asociados a las probabilidades de ocurrencia respectivos de cada una de las variables consideradas. De manera de incorporar los valores muestreados de metales en biota, se calcularon estos valores isoprobables de IP para las concentraciones máximas, mínimas y promedio, de manera de entregar un espacio solución. Luego, se graficaron las variaciones del IP para adultos y niños en función de la probabilidad. Además, se entregaron tablas con los valores del índice IP asociado a los elementos *As, Cd, Cr, Pb, Ni, Hg e Hidrocarburos (Fluoranteno)*, para las probabilidades de 10%, 20%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95% y 98%. El mismo procedimiento se llevó a cabo para el parámetro ILCR.

A modo de ejercicio, se evaluó el valor de ILCR con una duración de exposición de 70 años, manteniendo los valores de frecuencia de exposición y tasa de ingesta correspondientes al P90 de los valores obtenidos en las encuestas.

El protocolo de investigación fue evaluado y visado por el Comité de Ética de la Universidad de los Andes, que está debidamente acreditado (Anexos Digitales: 03_OE3_Diagnostico_Ambiental/

A continuación, algunos aspectos metodológicos de la encuesta:

a. Participantes

Se invitó a participar a los residentes (con permanencia en la zona de al menos 1 año) (único criterio de inclusión), de la bahía de Mejillones. La muestra consistió en un grupo de 73 familias, seleccionadas al azar, a través de un muestreo aleatorio simple de casas por medio de una grilla de números al azar.

Una vez seleccionada la casa, se visitó a la familia, se explicó al adulto responsable los objetivos del estudio y se solicitó la firma del consentimiento informado. Posteriormente se aplicó el cuestionario de exposición ambiental. También se realizó una encuesta a escolares de Mejillones.

b. Tamaño de la muestra

1) Encuesta poblacional:

Se calculó el tamaño de la muestra para población finita para muestreo al azar. En la Tabla 4.3-53 se muestra las características de confianza y exactitud de la muestra⁵, con una confianza del 90% y exactitud o precisión del 10%, agregando un porcentaje de rechazo del 10% de la muestra. Se contempló procedimiento de reemplazo hasta el 10% de las

⁵ <https://investigacionpediahr.files.wordpress.com/2011/01/formula-para-cc3a1iculo-de-la-muestra-poblaciones-finitas-var-categorica.pdf> y <http://www.berrie.dds.nl/calcss.htm>

viviendas. Total de encuestas planificadas: 82 encuestas. Sólo se dieron 3 rechazos a la encuesta (Tasa de rechazo 3,6%) y 5 reemplazos. Estos se realizaron con una casa vecina a la que no contestó.

Si la población es finita, es decir conocemos el total de la población y deseamos saber cuántos del total tendremos que estudiar la fórmula utilizada es:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

Donde: N = Total de la población, $Z_{\alpha} = 1,65$ al cuadrado (si la seguridad es del 90%), p = proporción esperada (en este caso 50% = 0.5), q = 1 – p (en este caso 1-0.5 = 0.5) y d = precisión (10%).

Al desconocer la proporción esperada, utilizamos el 50% lo que maximiza el tamaño muestral (n).

Tabla 4.3-53: Población y tamaño de muestra, Mejillones.

Muestra	Población (2017)	Tamaño muestral
Requerida	13467	68
Lograda		73

Fuente: elaboración propia

c. Instrumentos de evaluación cuantitativa

1) Encuesta poblacional (Anexo)

La encuesta se elaboró confeccionando preguntas sobre consumo de alimentos del mar (tipo, frecuencia y cantidad). Fue aplicado por un entrevistador entrenado, usando una tableta y un programa de encuestas llamado SurveyMonkey a 73 adultos residentes por más de un año en Mejillones.

2) Encuesta Escolares (Anexo)

Se tomó una muestra de 85 escolares del Colegio Juan José Latorre de Mejillones y se visitaron sus casas para completar la encuesta de exposición, previa la recepción del Consentimiento Informado firmado por los padres u apoderados. Esta fue una muestra por conveniencia, se invitó a participar al colegio, que tiene una matrícula de 536 alumnos de 1° a 8° básico, y los primeros 85 padres que enviaron el Consentimiento Firmado se procedió a ir a las casas a entrevistarlos.

Para caracterizar el riesgo de los contaminantes no cancerígenos se utilizaron los siguientes valores de referencia. Los niveles de referencia son valores establecidos a partir de información empírica (estudios epidemiológicos) o de laboratorio (estudios toxicológicos) que determinan valores de seguridad. Es decir, bajo los cuales no se observarían efectos adversos en la población. Los valores de referencia y las fuentes utilizados para caracterizar el riesgo se describen en la Tabla 4.3-54.

Tabla 4.3-54: Niveles de referencia de sustancias de interés estudiadas en Mejillones.

Compuestos	Duración de la exposición	MRL/Rfd	Fuente
Arsénico	Aguda	0,005 mg/Kg/día	ATSDR
	Crónica	0,0003 mg/Kg/día	ATSDR
Cadmio	Intermedia	0,0005 mg/Kg/día	ATSDR
	Crónica	0,0001 mg/Kg/día	ATSDR
Cromo hexavalente (Cr (VI))	Intermedia	0,005 mg/Kg/día	ATSDR
	Crónica	0,0009 mg/Kg/día	ATSDR
Hidrocarburos (Fluoranteno)	Crónico	0,4 mg/Kg/día	ATSDR
Mercurio	Crónica	0,002 mg/kg/day	ATSDR
Níquel (*)	Crónica	0,00009 mg/m ³	ATSDR
Plomo (**)	Crónico	3-4 µg/kg/día	IPCS/OMS

(*) sólo para vía inhalatoria (**) La Ingesta Tolerable es de 25 µg/kg/semanal

Elaboración propia

4.3.4.2 Peligro asociado a contaminantes estudiados

La Tabla 4.3-55 resume información general sobre efectos establecidos por la Organización Mundial de la Salud, organismo que en forma rutinaria evalúa los efectos de los contaminantes en el agua y publica estándares y guías de seguridad. La información entregada corresponde a lo definido por la última versión disponible de la guía de calidad del agua⁶.

El arsénico, cadmio y cromo hexavalente son sustancias que provocan efectos sistémicos y son cancerígenos clasificados como tales por todas las instituciones que elaboran listado sobre la toxicidad de compuestos (EPA-OMS-IARC-ATSDR).

El arsénico está catalogado como promotor del cáncer, es decir que, asociado a otros cancerígenos, como suele ocurrir con el tabaco, aumenta en forma sinérgica el riesgo de tener cáncer de pulmón, vejiga y vías urinarias, entre otros.

El cadmio y cromo hexavalente son cancerígenos de la vía respiratoria (produciendo cáncer pulmonar y del septum paranasal). No se ha descrito efecto carcinogénico por vía digestiva, como sí ocurre con el arsénico.

El cromo trivalente no es un compuesto que produzca efectos adversos por su presencia. Todo lo contrario, al ser un elemento esencial debe consumirse en una cantidad establecida, como ingesta diaria (50-200 µg/día), para el buen funcionamiento del

⁶ Organización Mundial de la Salud http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq4-with-add1-chap12.pdf?ua=1

organismo. Su deficiencia genera un deterioro del metabolismo de la glucosa por la mala eficiencia de la insulina⁷.

Sobre los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs):

Los HAPs pueden entrar al cuerpo a través de los pulmones, al respirar aire que los contiene (generalmente se encuentran adheridos a las partículas o al polvo). El humo del cigarrillo, de la madera, del carbón y el humo proveniente de muchos lugares industriales pueden contener HAPs. Sin embargo, no se sabe qué tan rápida o cuanto absorben los pulmones. Tomar agua e ingerir alimentos, tierra o partículas de polvo que contienen HAPs son otras de las rutas por las cuales estas sustancias químicas entran al cuerpo, pero generalmente la absorción es lenta por esta vía.

En condiciones normales de exposición ambiental, los HAPs podrían llegar a entrar a través de la piel si se entra en contacto con partículas de suelo/arena/agua que contengan altos niveles de HAPs (esto podría presentarse cerca de sitios con presencia de desechos peligrosos) o si entra en contacto con aceite de cárter u otros productos (como creosota) que contienen HAPs. La rapidez con la cual entran los HAPs al cuerpo mediante el consumo, la bebida o el contacto con la piel puede ser influenciada por la presencia de otros compuestos. Los HAPs pueden entrar a todos los tejidos del cuerpo que contienen grasa y tienden a almacenarse principalmente en los riñones, el hígado y la grasa. En el bazo, las glándulas suprarrenales y los ovarios se acumulan cantidades más pequeñas.

Los tejidos del cuerpo transforman los HAPs en muchas sustancias diferentes. Algunas de estas sustancias son más dañinas y algunas de ellas menos dañinas que los HAPs originales. Los resultados de estudios realizados en animales demuestran que los HAPs no tienden a acumularse en el cuerpo durante largo tiempo. La mayor parte de los HAPs que entran al cuerpo salen del mismo en unos cuantos días, principalmente en las heces y en la orina.

En algunas circunstancias, los HAPs pueden ser dañinos para la salud. Varios HAPs, entre los que se incluyen el benzo[a]antraceno, benzo[a]pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[j]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, criseno, dibenzo[a,h]antraceno e indeno[1,2,3-c,d]pireno, han causado tumores en los animales de laboratorio que han respirado estas sustancias del aire, que las han consumido o que han entrado en contacto con las mismas a través de la piel durante largos períodos de tiempo.

Los estudios realizados en los seres humanos demuestran que las personas expuestas a través de la respiración o el contacto de la piel durante largos períodos de tiempo con mezclas que contienen HAPs y otros compuestos también pueden contraer cáncer. En general esta condición de exposición ocurre en el ámbito laboral, pues los trabajadores se exponen por varias vías a concentraciones más elevadas de lo que ocurre en la población general.

Las ratonas que se alimentaron con altos niveles de benzo[a]pireno durante el embarazo tuvieron problemas reproductivos, así como los tuvieron sus crías. Las crías de las ratonas embarazadas que se alimentaron con benzo[a]pireno también mostraron otros efectos

⁷ Ana Alvarado-Gámez, Rigoberto Blanco-Sáenz y Erick Mora-Morales. El cromo como elemento esencial en los humanos. Rev. costarric. cienc. méd vol.23 n.1-2 San José Jun. 2002

dañinos, como defectos congénitos y disminución del peso corporal. En los seres humanos se podrían presentar efectos similares, pero no se dispone de información para demostrar que estos efectos ocurren.

Los estudios realizados en animales han demostrado que los HAPs pueden causar efectos dañinos en la piel, los fluidos corporales y el sistema que utiliza el cuerpo para combatir las enfermedades después de exposiciones tanto a corto como a largo plazo. Estos efectos no se han observado en los seres humanos.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ha determinado que: el benzo[a]antraceno y el benzo[a]pireno son probables carcinógenos humanos; el benzo[b]fluoranteno, el benzo[j]fluoranteno, el benzo[k]fluoranteno y el indeno[1,2,3-c,d]pireno son posibles carcinógenos humanos; y el antraceno, el benzo[g,h,i]perileno, el benzo[e]pireno, el criseno, el fluoranteno, el fluoreno, el fenantreno y el pireno no son clasificables como carcinógenos en los seres humanos.

La EPA ha determinado que el benzo[a]antraceno, el benzo[a]pireno, el benzo[b]fluoranteno, el benzo[k]fluoranteno, el criseno, el dibenzo[a,h]antraceno y el indeno[1,2,3-c,d]pireno son probables carcinógenos humanos y que el acenaftileno, el antraceno, el benzo[g,h,i]perileno, el fluoranteno, el fluoreno, el fenantreno y el pireno no son clasificables como carcinógenos en los seres humanos. El acenafteno no sido clasificado según sus efectos cancerígenos por el DHHS, la IARC o la EPA.

El mercurio es un tóxico sistémico, es decir afecta varios sistemas del organismo humano, entre los más importantes el sistema nervioso, central y periférico, y renal. La gravedad del daño depende de la dosis de exposición, es decir la cantidad de mercurio ingerido. También determinan la gravedad el estado químico del mercurio (valencia) y algunas características del huésped. Especialmente peligrosa resulta la exposición a mercurio por parte de mujeres embarazadas, pues el mercurio atraviesa la barrera placentaria dando origen a una enfermedad congénita: Enfermedad de Minamata. También para los niños pequeños el mercurio, al igual que el plomo resulta ser un tóxico que a bajas dosis, y dependiendo de la cronicidad de la exposición produce daño en el desarrollo neurocognitivo, muchas veces irreversible.

Otras personas expuestas son los trabajadores que manipulan sustancias o productos con mercurio (mineros, trabajador agrícola, industrial, manipuladores de basura y recicladores).

La población general que consume agua o alimentos con el tóxico también se encuentra en riesgo.

El efecto adverso más común de la exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica. Aproximadamente entre un 10% y 15% de la población es sensible al níquel. Las personas pueden sensibilizarse al níquel cuando hay contacto directo prolongado de la piel con joyas u otros artículos que contienen níquel. Una vez que una persona se ha sensibilizado al níquel, el contacto adicional con el metal producirá una reacción. La reacción más común es un salpullido en el área de contacto. El salpullido también puede aparecer en un área lejos del sitio de contacto. Con menor frecuencia, algunas personas que son sensibles al níquel sufren ataques de asma luego de exposición al níquel. Algunas

personas sensibilizadas reaccionan cuando ingieren níquel en los alimentos o el agua o cuando respiran polvo que contiene níquel⁸.

Algunas personas que trabajan en refinerías de níquel o plantas que procesan níquel han sufrido bronquitis crónica y alteraciones del pulmón. Estas personas inhalan cantidades de níquel mucho más altas que los niveles que se encuentran normalmente en el ambiente. Algunos trabajadores que tomaron agua que contenía altos niveles de níquel sufrieron dolores de estómago y efectos adversos en la sangre y los riñones.

En ratas y ratones que respiraron compuestos de níquel se han observado daño de los pulmones y de la cavidad nasal. Comer o beber grandes cantidades de níquel ha producido enfermedad del pulmón en perros y ratas y ha afectado el estómago, la sangre, el hígado, los riñones y el sistema inmunitario en ratas y ratones, como también la reproducción y el desarrollo.

Los efectos del plomo son los mismos si se ingiere o inhala. El plomo puede afectar a casi todos los órganos y sistemas en el cuerpo. El más sensible es el sistema nervioso, tanto en niños como en adultos. La exposición prolongada de adultos puede causar un deterioro en el resultado de algunas pruebas que miden funciones del sistema nervioso. También puede producir debilidad en los dedos, las muñecas o los tobillos. La exposición al plomo también produce un pequeño aumento de la presión sanguínea, especialmente en personas de mediana edad y de edad avanzada, y puede causar anemia. La exposición a niveles altos de plomo puede dañar seriamente el cerebro y los riñones de niños y adultos y causar la muerte. En mujeres embarazadas, la exposición a niveles altos de plomo puede producir pérdida del embarazo. En hombres, la exposición a altos niveles puede alterar la producción de espermatozoides⁹.

⁸ ASDR https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts15.html

⁹ ATSDR https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html

Tabla 4.3-55 Compuestos de interés para la salud pública presentes en bahía de Mejillones del Sur y su potencial peligro para la salud pública

Compuestos y parámetro (*)	Medio	Tipo de efecto	Peligro
Arsénico	Agua	Cancerígeno Sistémico	Produce intoxicación aguda y crónica (hidroarsenismo) con daño en la piel, vasculopatía periférica, cáncer respiratorio, renal y de vejiga urinaria.
Cadmio	Agua	Sistémico Cancerígeno	Daño renal y respiratorio. Solamente los polvos de cadmio vía respiratoria pueden producir cáncer de pulmón y de próstata.
Cromo total y hexavalente (Cr (VI))	Agua	Cancerígeno	La exposición vía respiratoria de Cr (VI) induce cáncer nasal en mineros expuestos al metal. Vía digestiva se metaboliza rápidamente a Cromo III, que es un micronutriente que el cuerpo requiere consumir. Por lo que la vía digestiva no constituye un peligro.
Hidrocarburos	Agua	Sistémico Cancerígeno	Pueden producir alteraciones del Sistema Nervioso Central, y del Sistema Nervioso Periférico. Daños de dérmicos, en la sangre y en el sistema inmunológico. Compuestos de esta familia (benceno principalmente) puede producir cáncer.
Mercurio	Agua	Sistémico	Produce daño renal y alteración en el sistema inmune.
Níquel	Agua	Sistémico	Los compuestos de níquel inhalados vía respiratoria son cancerígenos en los mineros que lo extraen. La ingesta vía oral solo produce hipersensibilidad y alergias.
Plomo	Agua	Sistémico	Amplia variedad de efectos desde daños al sistema nervioso central, a la sangre, daño renal e hipertensión. Causa la muerte en altas dosis por intoxicación: saturnismo.

4.3.4.3 Modelo Conceptual

El análisis de riesgo se desarrolla sobre un conjunto de escenarios, cada uno de los cuales está referido a una situación temporal (situación actual o situaciones futuras previsibles). El modelo conceptual (MC) es un esquema descriptivo de los elementos presentes en el emplazamiento que se desea evaluar y que constituyen una cadena de riesgo (Figura 4.3-91).

La cadena está definida por el foco o fuente (causa de la exposición), las rutas de exposición y los individuos representativos de grupos de población expuestos a la contaminación procedente del foco denominado: receptor.

Las rutas de exposición: relaciona el foco o fuente de la exposición con los receptores finales a través del medio o componente (suelo-aire-agua- alimento), mecanismos de migración de los contaminantes y vías de exposición (respiratoria – dérmica – digestiva).

EL MC debe ser por lo tanto “la mejor representación esquemática del problema que pueda confeccionarse a partir de datos disponibles. Considerando las limitaciones e incertidumbres, inherentes a tales datos”¹⁰.

La Figura 4.3-91 muestra el Modelo conceptual del estudio. Indica como principales vías de exposición la ingesta de alimentos y de agua durante el contacto con el borde costero.

A continuación, se describen los distintos componentes de la cadena de riesgo, resumida en el MC propuesto para el análisis de riesgo.

4.3.4.3.1 Fuente de contaminantes ambientales

La fuente estudiada es la bahía de Mejillones del Sur propiamente tal. La presencia de contaminantes en sus distintas matrices (sedimento – agua y biota) depende de mecanismos naturales, interacción del mar con la costa. También esta bahía sufre el impacto de descargas antropogénicas, descritas en Informe sobre Evaluación del Riesgo Ecológico.

4.3.4.3.2 Mecanismos de liberación y transporte ambiental

Los mecanismos de destino ambiental incluyen las transformaciones físico – químicas del contaminante en el medio ambiental. Estos mecanismos conllevan a cambios en la concentración y/o naturaleza de los contaminantes presentes en la bahía. Los mecanismos de destino ambiental más importantes son la atenuación, la activación y la bioacumulación.

La atenuación consiste en la transformación del arsénico inorgánico en arsénico orgánico producto de la acción de microorganismos acuáticos y peces. El arsénico orgánico presenta menor toxicidad que el inorgánico, teniendo los compuestos metilados arsénico menor acción tóxica.

La activación se podría observar con el aumento de la valencia del cromo, que de estado (III) pase a estado (VI). El cromo hexavalente a diferencia del trivalente, que es un elemento esencial requerido por el organismo humano, es un cancerígeno.

La bioacumulación de los metales se puede dar al traspasar desde biota a la cadena alimenticia (peces- mariscos y algas comestibles).

¹⁰ EFTA Guía de Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas, 2004.

4.3.4.3.3 Vías de exposición

Una vía de exposición es el camino ambiental recorrido por el contaminante desde la fuente o foco hasta el punto del contacto físico con el receptor humano. En este caso se distinguen varias vías de exposición posibles.

Vía completa de exposición y puntos de contacto: Una vía de exposición se considera completa y el receptor expuesto, cuando existe evidencia de la presencia de todos los elementos de la vía de exposición, y estos están conectados entre ellos:

- Concentración del contaminante en la vía de transporte
- Presencia de playas públicas en donde los adultos y niños pueden entrar en contacto directo con la columna de agua; y
- Pesca y venta de peces – mariscos y algas comestibles provenientes de la bahía de Mejillones a los habitantes de la bahía.

El punto de contacto, también llamado punto de exposición es un componente crítico de la cadena causal. La exposición sólo puede ocurrir cuando en el punto de contacto concurren simultáneamente el contaminante en una concentración cuantificable (sobre el límite de detección), en un matriz identificable (agua, aire, suelo, alimento) y un receptor humano. Además, debe haber una probabilidad cierta de ocurrencia temporal y espacial de ambos eventos. En este caso los puntos de contacto estudiados son la playa y las mesas de las casas en donde se consumen alimentos del mar provenientes de la bahía de Mejillones del Sur. La vía de exposición evaluada es la oral, si bien se identifica también la inhalatoria, en el caso de la columna de agua, pues las gotas o aerosol marino se degluten al ser respiradas.

4.3.4.3.4 Concentración de los contaminantes en el receptor

Una vez que ocurre el contacto (exposición), el contaminante puede ingresar al organismo por una ruta de exposición y es absorbido a través de una membrana de intercambio. La exposición sólo ocurre cuando el contaminante ha sido absorbido y se establece una dosis interna en el organismo.

Esta dosis interna se puede calcular a través de modelos farmacocinéticos (absorción/excreción), o medir por medio de biomarcadores de exposición o de efectos. Los biomarcadores de exposición corresponden a la medición en tejidos: sangre, tejido graso, hígado, hueso, orina, leche materna, aire expirado, pelo, uñas, etc. Los biomarcadores de efecto corresponden a la medición de cambios en la actividad enzimática, cambios en los niveles de metabolitos intermedios, etc. Estas mediciones son invasivas y requieren consentimiento informado, análisis ético y patrones de referencia para su adecuado uso. En este estudio no está contemplado medir biomarcadores de exposición.

4.3.4.3.4.1 Escenarios de exposición ambiental

En el presente informe se evaluó un escenario hipotético relacionado con los receptores de interés, los que incluyen a la población de residentes de la zona y sus tasas de exposición.

- Exposición de niños de 6 a 11 años residentes: Considera una exposición vía digestiva, tragar agua.
- Exposición de adultos: Considera una exposición sin equipo de protección y considera vía digestiva, tragar agua.

4.3.4.3.4.2 Escenario de ingesta alimentaria

Se identificaron tres escenarios posibles de ingesta uno entregado por la ENCA (2016), que indicó que la población general en Chile consume 7,9 gr/día (15,8- 28,5) pescados y mariscos, con diferencia importante entre adultos y escolares. Los adultos consumen alrededor de 18,0 gr/día (9-33) y los escolares 11,8 gr/día (6-23)¹¹.

El otro escenario de ingesta de pescado proviene de un estudio realizado por el Departamento de Nutrición de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, respecto de los patrones de consumo de productos del mar en población mayor a 2 años en Huasco. Alrededor de 96% de la muestra consumió pescados, mariscos o algas el mes anterior a la entrevista, con una mediana de consumo de 28,7 g/persona, y si se considera el percentil 90 de este consumo (107,4 g diarios) la ingesta mensual alcanzaría a los 3,2 kg, levemente superiores en varones adultos. Los escolares algo menos con una mediana de 23.6 g/día.

Los escenarios anteriores se ajustaron con los resultados de las encuestas a los habitantes de Mejillones.

¹¹ Universidad de Chile Encuesta Nacional de Consumo Alimentario, 2016
http://www.minsal.cl/sites/default/files/ENCA-INFORME_FINAL.pdf

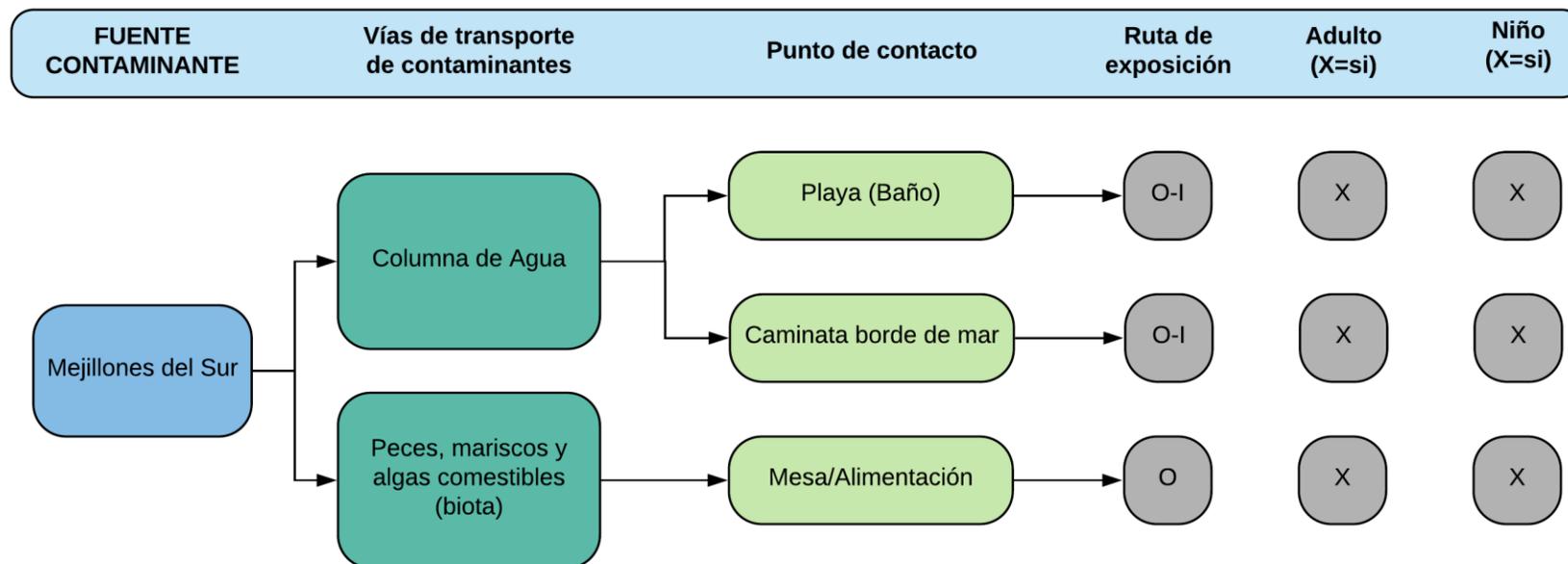


Figura 4.3-91 Modelo Conceptual Exposición bahía de Mejillones del Sur. (Ruta de exposición O=oral, I=Inhalación).

4.3.4.4 Evaluación de la exposición total

4.3.4.4.1 Niveles ambientales actuales

El estudio comprendió la realización por parte del Centro de Ecología Aplicada de una serie de muestras ambientales. En esta sección se analizan los resultados de interés para la evaluación de riesgo en la población, que son la calidad de la columna de agua de la bahía y la concentración de contaminantes en los alimentos de consumo humano producidos por la bahía de Mejillones.

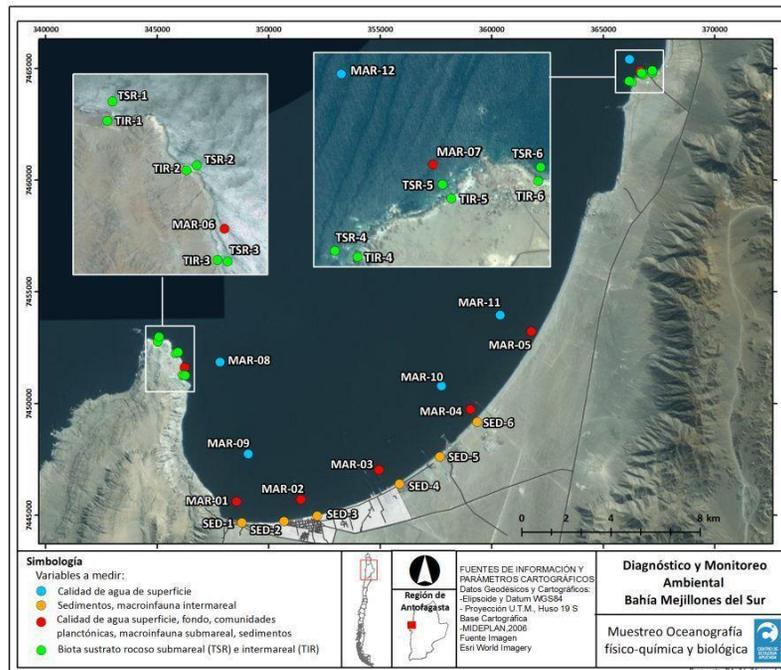


Figura 4.3-92: Muestreo Ambiental, bahía de Mejillones, 2017-2018.

Fuente: CEA, Evaluación de Riesgo Ecológico, Mejillones 2017-2018

Durante el año 2017, se tomaron 38 muestras para identificar presencia de contaminantes químicos y bacteriológicos (Tabla 4.3-56). Respecto de estos últimos, solamente se pudo identificar presencia de coliformes fecales en 4 muestras durante la campaña de primavera. En invierno no se detectó desarrollo de colonias de coliformes fecales. En relación con la presencia de metales, en ambas campañas se detectó arsénico, cadmio, níquel y plomo. No se detectó presencia de mercurio ni hidrocarburos.

En cambio, en peces, crustáceos, moluscos y algas se detectaron todos los metales seleccionados.

Los hidrocarburos se observaron solamente en organismos hidrobiológicos extraídos en zona industrial, principalmente en algas (huiro) y en pulga de mar, ostiones, y pulpo.

Tabla 4.3-56 Resultados Calidad Agua, parámetros seleccionados, bahía de Mejillones, 2017-2018

Año	Campaña	Parámetro	Laboratorio	Unidad	Límite de Detección	N	Media	Max	P75	P90
2017	invierno	Arsénico disuelto	UdeC	µg/L	0,07	19	1,47	1,79	1,69	1,75
2017	invierno	Arsénico total	UdeC	µg/L	0,07	19	1,62	1,88	1,81	1,84
2017	invierno	Cadmio disuelto	UdeC	µg/L	0,004	19	0,12	0,21	0,12	0,19
2017	invierno	Cadmio total	UdeC	µg/L	0,004	19	0,18	0,24	0,19	0,21
2017	invierno	Coliformes totales	HIDROLAB	NMP/100mL	1,8	19	1,8	1,8	1,8	1,8
2017	invierno	Cromo disuelto	UdeC	µg/L	0,03	19	0,2	0,37	0,23	0,31
2017	invierno	Cromo total	UdeC	µg/L	0,03	19	0,28	0,57	0,35	0,39
2017	invierno	Níquel disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,26	0,31	0,29	0,30
2017	invierno	Níquel total	UdeC	µg/L	0,01	19	0,29	0,38	0,31	0,33
2017	invierno	Plomo disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,13	0,61	0,11	0,17
2017	invierno	Plomo total	UdeC	µg/L	0,01	19	0,23	0,75	0,275	0,33
2017	primavera	Arsénico disuelto	SGS	µg/L	1	19	1,37	2	2	2
2017	primavera	Cadmio disuelto	UdeC	µg/L	0,004	19	0,08	0,21	0,08	0,16
2017	primavera	Coliformes totales	SGS	NMP/100mL	1,8	19	3,98	23	1,8	5,84
2017	primavera	Níquel disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,35	0,48	0,38	0,43
2017	primavera	Plomo disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,16	0,51	0,22	0,39
2018	invierno	Arsénico disuelto	SGS	µg/L	1	19	1,00	1,00	1,00	1,00
2018	invierno	Cadmio disuelto	UdeC	µg/L	0,004	19	0,12	0,25	0,12	0,14
2018	invierno	Coliformes totales	HIDROLAB	NMP/100mL	1,8	19	1,80	1,80	1,80	1,80
2018	invierno	Cromo disuelto	UdeC	µg/L	0,03	19	0,23	0,44	0,27	0,29
2018	invierno	Níquel disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,39	0,70	0,43	0,45
2018	invierno	Plomo disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,14	0,37	0,17	0,27
2018	primavera	Arsénico disuelto	SGS	µg/L	1	10	1	1	1	1
2018	primavera	Cadmio disuelto	UdeC	µg/L	0,004	19	0,15	0,21	0,15	0,16
2018	primavera	Coliformes totales	SGS	NMP/100mL	1,8	19	1,8	1,8	1,8	1,8

Año	Campaña	Parámetro	Laboratorio	Unidad	Límite de Detección	N	Media	Max	P75	P90
2018	primavera	Níquel disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,47	0,86	0,50	0,65
2018	primavera	Plomo disuelto	UdeC	µg/L	0,01	19	0,10	0,33	0,13	0,14

Se midió mercurio e hidrocarburos en ambas campañas sin detectar su presencia
Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones CEA, Evaluación de Riesgo Ecológico, Mejillones.

Tabla 4.3-57 Resultado contenido contaminantes en peces (máximo valor observado), Mejillones 2017-2019

Parámetro	As	Cd	Cr	Pb	Ni	Hg
Tipo	mg/kg wwt					
<i>Bilagay</i>	0,836	0,022	0,026	0,017	0,040	0,062
<i>Caballa</i>	0,841	0,013	0,010	0,008	0,040	0,024
<i>Cabinza</i>	0,937	0,007	0,010	0,007	0,040	0,028
<i>Castañeta</i>	0,368	0,012	0,013	0,010	0,040	0,016
<i>Jerguilla</i>	0,456	0,012	0,010	0,006	0,040	0,014
<i>Lenguado</i>	0,830	0,002	0,010	0,008	0,040	0,012
<i>Lisa</i>	0,950	0,001	0,011	0,005	0,040	0,002
<i>Pejerrey</i>	0,810	0,070	0,030	0,230	0,048	0,013

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3-58 Resultado contenido contaminantes en crustáceos y moluscos (máximo valor observado), Mejillones 2017-2019

Parámetro	As	Cd	Cr	Pb	Ni	Hg	Fluoranteno
Tipo	mg/kg wwt						
<i>Choro zapato</i>	1,500	1,690	0,056	0,044	0,140	0,003	mg/kg wwt
<i>Culengue</i>	1,750	0,215	0,063	0,009	0,045	0,005	0,005
<i>Jaiba</i>	13,700	0,520	0,285	0,042	0,151	0,013	-
<i>Lapa</i>	1,120	0,208	0,150	0,039	0,089	0,001	0,005
<i>Loco</i>	5,120	0,297	0,092	0,031	0,060	0,006	0,005
<i>Ostión</i>	0,960	1,290	0,078	0,150	0,205	0,003	0,005
<i>Pulga de mar</i>	1,390	4,420	2,280	0,440	1,500	0,012	0,036
<i>Pulpo</i>	14,000	0,098	0,016	0,081	0,049	0,021	0,005

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3-59 Resultado contenido contaminantes en algas (máximo valor observado), Mejillones 2017-2018

Parámetro	As	Cd	Cr	Pb	Ni	Hg	Fluoranteno
Tipo	mg/kg ww						
Huiro	10,1000	0,6170	0,0560	0,0764	0,2910	0,0011	0,2500
Pelillo	1,3800	0,4470	0,0650	0,0585	0,1630	0,0010	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3-60 Resultado contenido de hidrocarburos, Mejillones 2017-2018

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Choro zapato	2 Metilnaftaleno	5,0
Choro zapato	Acenafteno	5,0
Choro zapato	Acenaftileno	5,0
Choro zapato	Antraceno	5,0
Choro zapato	Benzeno (a) antraceno	5,0
Choro zapato	Benzo (a) pireno	5,0
Choro zapato	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Choro zapato	Criseno	5,0
Choro zapato	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Choro zapato	Dibenzofurano	5,0
Choro zapato	Fenantreno	5,0
Choro zapato	Fluoreno	5,0
Choro zapato	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Choro zapato	Naftaleno	5,0
Choro zapato	Pireno	5,0
Choro zapato	Fluoranteno	5,0
Choro zapato	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Choro zapato	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Huiro	2 Metilnaftaleno	5,0
Huiro	Acenafteno	51,0
Huiro	Acenaftileno	22,0
Huiro	Antraceno	9,7
Huiro	Benzeno (a) antraceno	6,8
Huiro	Benzo (a) pireno	32,0
Huiro	Benzo (g.h.i) perileno	93,0
Huiro	Criseno	12,0
Huiro	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Huiro	Dibenzofurano	5,0
Huiro	Fenantreno	170,0
Huiro	Fluoreno	7,3
Huiro	Indeno (123-cd) pireno	19,0
Huiro	Naftaleno	5,0
Huiro	Pireno	950,0
Huiro	Fluoranteno	250,0
Huiro	Benzo (b) fluoranteno	17,0
Huiro	Benzo (k) fluoranteno	5,0

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Jaiba	2 Metilnaftaleno	5,0
Jaiba	Acenafteno	5,0
Jaiba	Acenaftileno	5,0
Jaiba	Antraceno	5,0
Jaiba	Benzeno (a) antraceno	5,0
Jaiba	Benzo (a) pireno	5,0
Jaiba	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Jaiba	Criseno	5,0
Jaiba	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Jaiba	Dibenzofurano	5,0
Jaiba	Fenantreno	5,0
Jaiba	Fluoreno	5,0
Jaiba	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Jaiba	Naftaleno	5,0
Jaiba	Pireno	5,0
Jaiba	Fluoranteno	5,0
Jaiba	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Jaiba	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Lapa	2 Metilnaftaleno	5,0
Lapa	Acenafteno	5,0
Lapa	Acenaftileno	5,0
Lapa	Antraceno	5,0
Lapa	Benzeno (a) antraceno	5,0
Lapa	Benzo (a) pireno	5,0
Lapa	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Lapa	Criseno	5,0
Lapa	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Lapa	Dibenzofurano	5,0
Lapa	Fenantreno	5,0
Lapa	Fluoreno	5,0
Lapa	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Lapa	Naftaleno	5,0
Lapa	Pireno	5,0
Lapa	Fluoranteno	5,0
Lapa	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Lapa	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Lisa	2 Metilnaftaleno	5,0
Lisa	Acenafteno	5,0
Lisa	Acenaftileno	5,0
Lisa	Antraceno	5,0

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Lisa	Benzeno (a) antraceno	5,0
Lisa	Benzo (a) pireno	5,0
Lisa	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Lisa	Criseno	5,0
Lisa	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Lisa	Dibenzofurano	5,0
Lisa	Fenantreno	5,0
Lisa	Fluoreno	5,0
Lisa	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Lisa	Naftaleno	5,0
Lisa	Pireno	5,0
Lisa	Fluoranteno	5,0
Lisa	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Lisa	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Locate	2 Metilnaftaleno	5,0
Locate	Acenafteno	5,0
Locate	Acenaftileno	5,0
Locate	Antraceno	5,0
Locate	Benzeno (a) antraceno	5,0
Locate	Benzo (a) pireno	5,0
Locate	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Locate	Criseno	5,0
Locate	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Locate	Dibenzofurano	5,0
Locate	Fenantreno	5,0
Locate	Fluoreno	5,0
Locate	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Locate	Naftaleno	5,0
Locate	Pireno	5,0
Locate	Fluoranteno	5,0
Locate	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Locate	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Loco	2 Metilnaftaleno	5,0
Loco	Acenafteno	5,0
Loco	Acenaftileno	5,0
Loco	Antraceno	5,0
Loco	Benzeno (a) antraceno	5,0
Loco	Benzo (a) pireno	5,0
Loco	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Loco	Criseno	5,0

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Loco	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Loco	Dibenzofurano	5,0
Loco	Fenantreno	5,0
Loco	Fluoreno	5,0
Loco	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Loco	Naftaleno	5,0
Loco	Pireno	5,0
Loco	Fluoranteno	5,0
Loco	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Loco	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Ostión	2 Metilnaftaleno	5,0
Ostión	Acenafteno	5,0
Ostión	Acenaftileno	5,0
Ostión	Antraceno	5,0
Ostión	Benzeno (a) antraceno	13,0
Ostión	Benzo (a) pireno	5,0
Ostión	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Ostión	Criseno	15,0
Ostión	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Ostión	Dibenzofurano	5,0
Ostión	Fenantreno	14,0
Ostión	Fluoreno	5,0
Ostión	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Ostión	Naftaleno	5,0
Ostión	Pireno	34,0
Ostión	Fluoranteno	36,0
Ostión	Benzo (b) fluoranteno	5,9
Ostión	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Pejerrey	2 Metilnaftaleno	5,0
Pejerrey	Acenafteno	5,0
Pejerrey	Acenaftileno	5,0
Pejerrey	Antraceno	5,0
Pejerrey	Benzeno (a) antraceno	5,0
Pejerrey	Benzo (a) pireno	5,0
Pejerrey	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Pejerrey	Criseno	5,0
Pejerrey	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Pejerrey	Dibenzofurano	5,0
Pejerrey	Fenantreno	5,0
Pejerrey	Fluoreno	5,0

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Pejerrey	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Pejerrey	Naftaleno	5,0
Pejerrey	Pireno	5,0
Pejerrey	Fluoranteno	5,0
Pejerrey	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Pejerrey	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Pulga de mar	2 Metilnaftaleno	5,0
Pulga de mar	Acenafteno	5,0
Pulga de mar	Acenaftileno	5,0
Pulga de mar	Antraceno	5,0
Pulga de mar	Benzeno (a) antraceno	18,8
Pulga de mar	Benzo (a) pireno	5,0
Pulga de mar	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Pulga de mar	Criseno	5,0
Pulga de mar	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Pulga de mar	Dibenzofurano	5,0
Pulga de mar	Fenantreno	5,0
Pulga de mar	Fluoreno	5,0
Pulga de mar	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Pulga de mar	Naftaleno	5,0
Pulga de mar	Pireno	5,0
Pulga de mar	Fluoranteno	5,0
Pulga de mar	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Pulga de mar	Benzo (k) fluoranteno	5,0
Pulpo	2 Metilnaftaleno	5,0
Pulpo	Acenafteno	5,0
Pulpo	Acenaftileno	5,0
Pulpo	Antraceno	5,0
Pulpo	Benzeno (a) antraceno	5,0
Pulpo	Benzo (a) pireno	5,0
Pulpo	Benzo (g.h.i) perileno	5,0
Pulpo	Criseno	5,0
Pulpo	Dibenzo (a.h) antraceno	5,0
Pulpo	Dibenzofurano	5,0
Pulpo	Fenantreno	5,0
Pulpo	Fluoreno	5,0
Pulpo	Indeno (123-cd) pireno	5,0
Pulpo	Naftaleno	5,0
Pulpo	Pireno	6,8
Pulpo	Fluoranteno	6,7

Organismo	Tipo de Hidrocarburo	Valor Observado (ug/kg) L.D = 5
Pulpo	Benzo (b) fluoranteno	5,0
Pulpo	Benzo (k) fluoranteno	5,0

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.4.2 Normativa nacional

Tabla 4.3-61 Decreto Supremo 144/2009 Establece NCP para la protección de aguas marinas y estuarinas aptas para actividad de recreación con contacto directo

Compuesto o Elemento	Unidad	Percentil	Valor Máximo
Color	Escala Pt-Co	80	100
pH	Unidad de pH	95	6,0 -8,5
Cianuro	mg/L	95	0,77
Arsénico	mg/L	95	0,11
Cadmio	mg/L	95	0,033
Cromo	mg/L	95	0,55
Mercurio	mg/L	95	0,011
Plomo	mg/L	95	0,11
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	95	1000

Tabla 4.3-62 Mariscos y pescados frescos Límites máximos permitidos, Reglamento Sanitario de los Alimentos (DTO, N° 977/96)

Compuesto	Unidad	Límite máximo
Arsénico inorgánico (moluscos)	mg/kg de producto final	2,0
Arsénico total (pescado fresco)	mg/kg de producto final	1
Cobre	mg/kg de producto final	10
Mercurio	mg/kg de producto final	0,5 - 1,5
Plomo	mg/kg de producto final	2,0
Selenio	mg/kg de producto final	0,30
Zinc	mg/kg de producto final	100
Dioxinas	pg EQT/OMS/g de grasa)	2,0
Radio nucleótidos	Bq/kg	35 – 3500

4.3.4.4.3 Resultados evaluación poblacional

4.3.4.4.3.1 Estimación de la exposición en población adulta de Mejillones

La Tabla 4.3-63 muestra las características etarias, tiempo de residencia en la comuna y en el hogar de la muestra poblacional evaluada, determinando un promedio de 47,11 años de edad, un tiempo medio de 24,64 años de residencia en la comuna de Mejillones y 10,61

años en la vivienda actual. Respecto del sexo, el 63,01 % correspondieron al sexo femenino y 36,99% al sexo masculino (Figura 4.3-93).

Tabla 4.3-63 Características de edad y tiempo de residencia de la muestra evaluada), Mejillones, 2018.

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Edad</i>	47,11	16,12	18,00	83,00
<i>Tiempo de residencia en mejillones</i>	24,64	21,06	1,00	79,00
<i>Tiempo de residencia en actual casa</i>	10,61	12,83	1,00	61,00

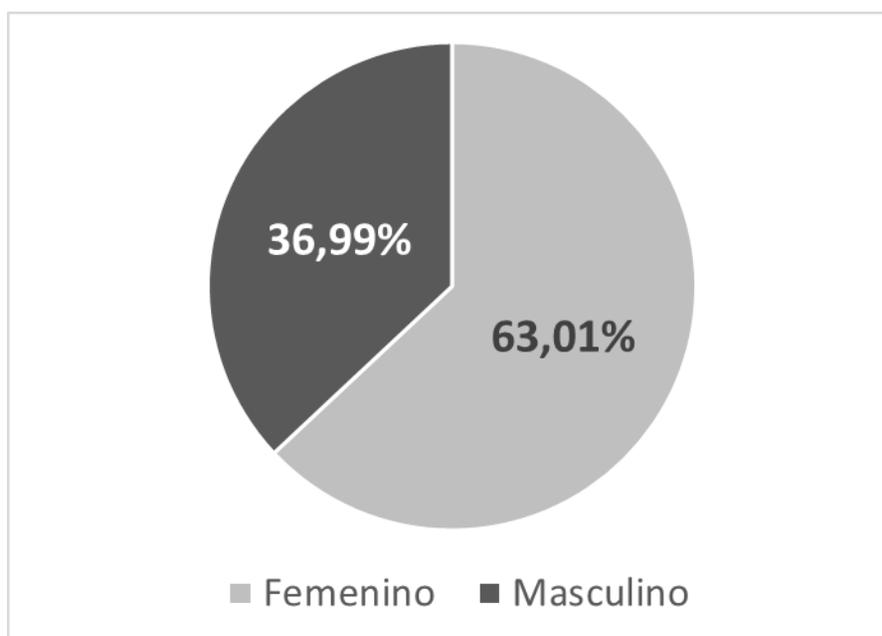


Figura 4.3-93: Frecuencia relativa según sexo, población adulta.

Al analizar la participación de los evaluados según grupo etario, se determinó que el mayor porcentaje, un 28,77 % correspondía al tramo de entre 50 a 59 años, lo sigue el grupo entre 40 a 49 años con un 20,55% y de 30 a 39 años un 17,81% (Tabla 4.3-64).

Tabla 4.3-64: Evaluados según grupo etario en años.

Grupo Etario (años)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
18-20	2	2,74%
21-29	10	13,70%
30-39	13	17,81%
40-49	15	20,55%
50-59	21	28,77%

Grupo Etario (años)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
60 o más	12	16,44%

Fuente: Elaboración propia

Respecto al consumo de pescados y crustáceos, en relación con cada tipo destacan el consumo de atún en conserva en donde un 69,86% declaró consumirlo, lo siguen el pejerrey con un 56,16% y la jaiba con un 50,68% que declaro consumirla (Tabla 4.3-65) estos últimos de extracción local.

Tabla 4.3-65: Frecuencia de consumo población de Mejillones según tipo de pescado y crustáceos, Mejillones, 2018.

Ha consumido	Frecuencia Absoluta No	Frecuencia Absoluta Si	Frecuencia Relativa % Si
<i>Pulga de mar</i> (*)	72	1	1,37%
<i>Erizo</i>	50	23	31,51%
<i>Bilagay</i> (*)	57	16	21,92%
<i>Pejerrey</i> (*)	32	41	56,16%
<i>Jerguilla</i> (*)	68	5	6,85%
<i>Congrio</i>	41	32	43,84%
<i>Castañeta</i> (*)	68	5	6,85%
<i>Lenguado</i> (*)	45	28	38,36%
<i>Cabinza</i> (*)	57	16	21,92%
<i>Liza</i> (*)	56	17	23,29%
<i>Jaiba</i> (*)	36	37	50,68%
<i>Caballa</i> (*)	65	8	10,96%
<i>Salmón</i>	53	20	27,40%
<i>Otro</i>	47	26	35,62%
<i>Jurel en conserva</i>	39	34	46,58%
<i>Atún en conserva</i>	22	51	69,86%
<i>Sardinas en conserva</i>	59	14	19,18%

Elaboración propia

Respecto de la frecuencia del consumo de pescado (Tabla 4.3-66), destaca el 27,40% que declaró consumirlo 2 veces al mes, seguido del 26,03% que declaró consumirlos 1 sola vez por semana.

Tabla 4.3-66 Frecuencia de consumo de pescado al mes, días/año, Mejillones, 2018.

Frecuencia de consumo de pescado	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa	Días/año
<i>1 sola vez al mes</i>	10	13,70%	12,17
<i>1 sola vez por semana</i>	19	26,03%	52,14
<i>2 veces al mes</i>	20	27,40%	24,33
<i>3 veces al mes</i>	8	10,96%	36,50
<i>5 veces por semana</i>	3	4,11%	260,71

Frecuencia de consumo de pescado	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa	Días/año
<i>unas pocas veces al año</i>	13	17,81%	5,00

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la cantidad de consumo (Tabla 4.3-67), el 80,82% de las preferencias de corresponden a la opción de 150 gramos, mientras que el 13,70% refiere a la opción de 120 gramos de pescado. A su vez, el 5,48% corresponde a la opción de 50 gr

Tabla 4.3-67 Frecuencia relativa, respecto a la cantidad de consumo según cantidad en gramos de pescado, Mejillones, 2018.

Respecto de la cantidad de consumo de pescados	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
<i>No consume</i>	0	0,00%
<i>Figura 1 (50 gramos)</i>	4	5,48%
<i>Figura 2 (120 gramos)</i>	10	13,70%
<i>Figura 3 (150 gramos)</i>	59	80,82%

Fuente: Elaboración propia

La distribución del factor de consumo “f” resultante de las opciones seleccionadas por los encuestados, se adjunta en la Figura 4.3-94. Se destaca la mayor concentración de preferencias en los valores del factor 0% y 100%.

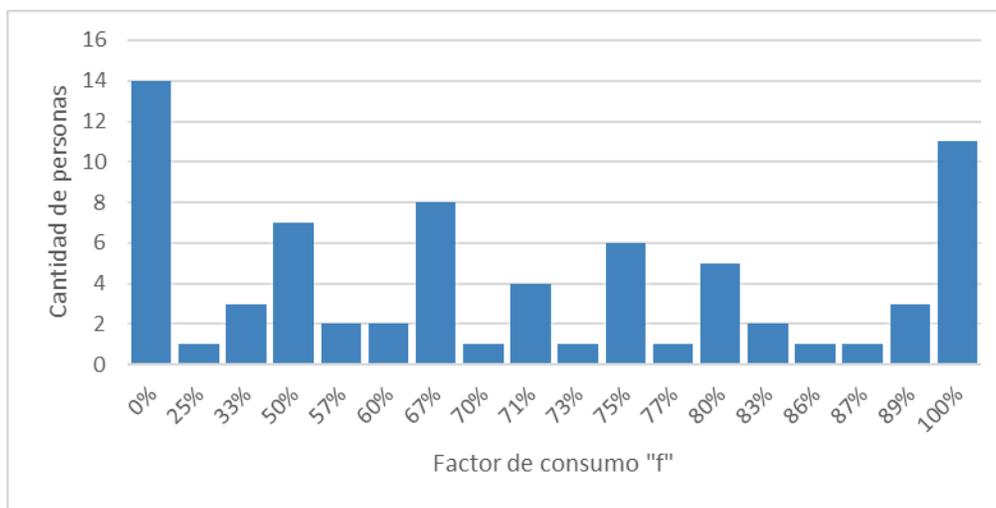


Figura 4.3-94: Frecuencia absoluta de factores de consumo “f” en pescados en población adulta de Mejillones.

Integrando los valores antes señalados, se puede estimar que los habitantes adultos de Mejillones consumen entre 0,00 gr/día y 75,00 gr/día de pescado al año, con un promedio de 9,88 gr/día (Tabla 4.3-68). En cuanto a la frecuencia de consumo, los habitantes de Mejillones consumen pescados entre 0,00 y 225,95 días al año, con un valor promedio de 25,73 días. Los valores P90 obtenidos de la muestra se adjuntan en la Tabla 4.3-68.

Tabla 4.3-68: Estadísticos de Frecuencia de Exposición (FE) y Tasa de Ingesta (TI) de muestra de consumo de pescados en población adulta de Mejillones.

Estadístico	FE (días/año)	TI (gr/día)
Promedio	25,73	9,88
Mediana	16,22	6,67
Desviación estándar	37,59	14,20
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	225,95	75,00
P90	46,35	18,81

Elaboración propia

En cuanto al consumo de mariscos por la población adulta de Tocopilla, la Tabla 4.3-69 muestra la frecuencia de consumo según tipo, donde destaca el pulpo y el loco con un 49,32% de las preferencias de consumo, y la lapa con un 43,84% de evaluados que declaró consumirlos. La población refiere no consumir ni huiro ni pelillo.

Tabla 4.3-69: Frecuencia de consumo de mariscos según tipo.

Ha consumido	Frecuencia Absoluta		Frecuencia Relativa %
	No	Si	Si
<i>Lapa</i>	41	32	43,84%
<i>Loco</i>	37	36	49,32%
<i>Clueque</i>	70	3	4,11%
<i>Ostión</i>	46	27	36,99%
<i>Pulpo</i>	37	36	49,32%
<i>Locate</i>	55	18	24,66%
<i>Huiro</i>	73	0	0,00%
<i>Pelillo</i>	73	0	0,00%
<i>Otro</i>	46	27	36,99%
<i>Mariscos en conserva</i>	49	24	32,88%

Elaboración propia

Respecto de la frecuencia del consumo de mariscos, en la Tabla 4.3-70 destaca con un 27,40% la opción de “1 sola vez al mes”, seguido de un 26,03% que refiere un consumo de “1 vez por semana”.

Tabla 4.3-70: Frecuencia relativa respecto a la cantidad de consumo según cantidad en gramos de mariscos y algas.

Frecuencia de consumo de mariscos y algas	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %	Días/año
<i>Todos los días, almuerzo y cena</i>	0	0,00%	730,00
<i>Todos los días, almuerzo o cena</i>	0	0,00%	365,00
<i>5 veces por semana</i>	1	1,37%	260,71
<i>3 veces por semana</i>	3	4,11%	156,43
<i>1 vez por semana</i>	19	26,03%	52,14
<i>2 veces al mes</i>	12	16,44%	24,33
<i>1 sola vez al mes</i>	20	27,40%	12,17
<i>Pocas veces al año</i>	18	24,66%	5,00

Elaboración propia

Respecto a la cantidad en gramos de este consumo (Tabla 4.3-71), destaca con un 53,42% de las preferencias un consumo igual o mayor a 150 gramos, seguido de un 19,18% que refirió un consumo de 120 gramos y un 12,33% que consume 50 gr.

Tabla 4.3-71: Frecuencia relativa, respecto a la cantidad de consumo según cantidad en gramos de mariscos.

Respecto de la cantidad del consumo de mariscos y algas	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
<i>No consume</i>	11	15,07%
<i>Figura 1 (50 gr.)</i>	9	12,33%
<i>Figura 2 (120 gramos)</i>	14	19,18%
<i>Figura 3 (150 gramos)</i>	39	53,42%

Elaboración propia

La distribución del factor de consumo “f” resultante de las opciones seleccionadas por los encuestados, se adjunta en la Figura 4.3-95. Al igual que para el consumo de pescados, se destaca la mayor concentración de preferencias en los valores del factor 0% y 100%.

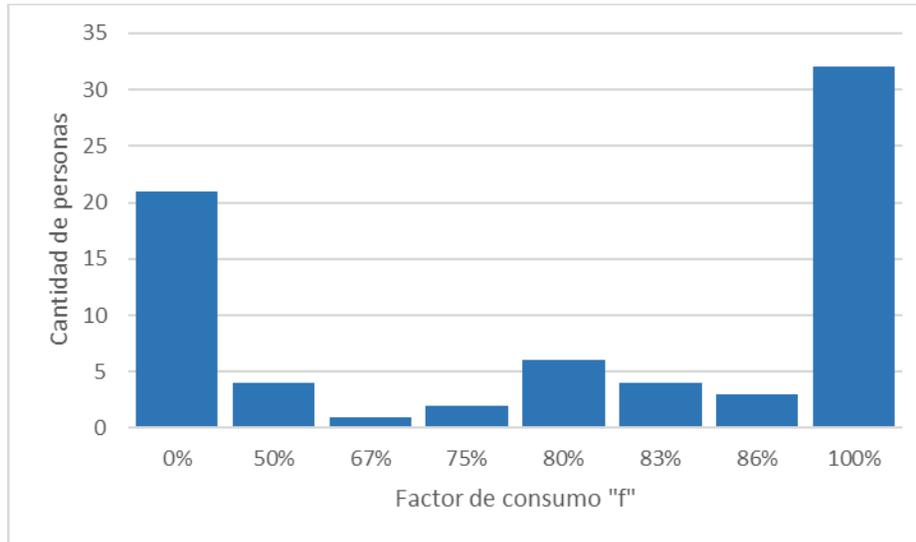


Figura 4.3-95: Frecuencia absoluta de factores de consumo “f” en mariscos, de habitantes adultos de Mejillones.

Integrando los valores antes señalados, se puede estimar que los habitantes adultos de Mejillones consumen entre 0,00 gr/día y 107,14 gr/día de marisco al año, con un promedio de 9,59 gr/día (Tabla 4.3-72). En cuanto a la frecuencia de consumo, los habitantes de Mejillones consumen pescados entre 0,00 y 260,71 días al año, con un valor promedio de 26,07 días. Los valores P90 obtenidos de la muestra se adjuntan en la Tabla N°20.

Tabla 4.3-72: Estadísticos de Frecuencia de Exposición (FE) y Tasa de Ingesta (TI) de muestra de consumo de mariscos en población adulta.

Estadístico	FE (días/año)	TI (gr/día)
Promedio	26,07	9,59
Mediana	12,17	4,29
Desviación estándar	40,86	15,94
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	260,71	107,14
P90	52,14	21,43

Elaboración propia

Por otro lado, en la Tabla 4.3-73 se muestra la frecuencia reportada de visitas a la playa, donde destaca con un 61,43% quienes refirieron asistir “solo el fin de semana durante el verano”, seguido de un 15,71% que refirió asistir “1 vez por-semana “y un 8,57% que declaró asistir “3 veces por semana” y “todos los días”.

Tabla 4.3-73: Frecuencia con que los encuestados refirieron asistir a la playa.

Frecuencia de asistencia a la playa	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
Todos los días (365)	6	8,22%
5 veces a la semana	1	1,37%
3 veces a la semana	6	8,22%
1 vez a la semana	12	16,44%
Sólo fines de semana en verano	45	61,64%
No va a la playa	3	4,11%

Elaboración propia

4.3.4.4.3.2 Estimación de la exposición en escolares de Mejillones

La Tabla 4.3-74 muestra las características etarias de la muestra de escolares evaluada, determinando un promedio de 10 años. Respecto del sexo de un total de 85 evaluados, el 48,24 % son de sexo femenino y el 51,76% de sexo masculino (Figura 4.3-96).

Tabla 4.3-74 Características de edad y tiempo de residencia de la muestra evaluada.

Variable	Media	Mínimo	Máximo
Edad	10,19	6	17

Elaboración propia

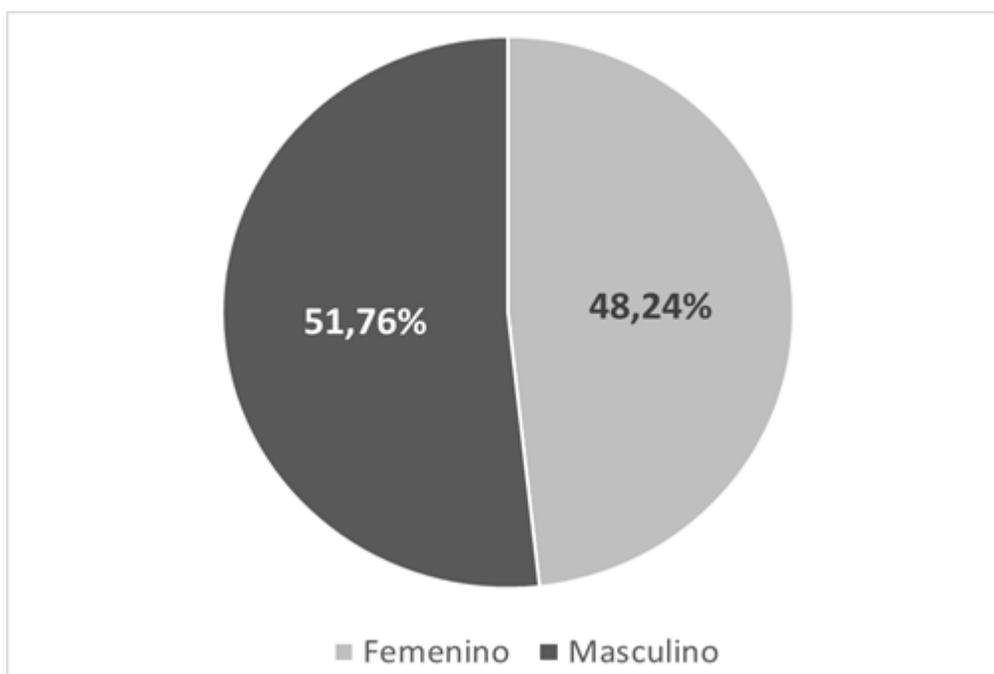


Figura 4.3-96: Frecuencia relativa según sexo en escolares, Mejillones, 2018.

Respecto al consumo de pescados, en relación con cada tipo destacan el consumo de atún en conserva en donde un 67,06% declaró consumirlo, lo siguen el jurel en conserva con un 37,65% y otro tipo con un 27,06% (Tabla 4.3-75). Con respecto a las especies no enlatadas, se destacan el pejerrey con un 20,00% y el salmón con un 21,18% de las preferencias, mientras que sólo un 14,12% refiere consumir jaiba.

Tabla 4.3-75: Frecuencia de consumo según tipo de pescado y crustáceos.

Ha consumido	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
	No	Si	Si
<i>Pulga de mar</i>	79	6	7,06%
<i>Erizo</i>	81	4	4,71%
<i>Bilagay</i>	82	3	3,53%
<i>Pejerrey</i>	68	17	20,00%
<i>Jerguilla</i>	83	2	2,35%
<i>Congrio</i>	80	5	5,88%
<i>Castañeta</i>	82	3	3,53%
<i>Lenguado</i>	76	9	10,59%
<i>Cabina</i>	82	3	3,53%
<i>Lisa</i>	80	5	5,88%
<i>Jaiba</i>	73	12	14,12%
<i>Caballa</i>	81	4	4,71%
<i>Salmón</i>	67	18	21,18%
<i>otro</i>	62	23	27,06%
<i>Jurel en conserva</i>	53	32	37,65%
<i>Atún en conserva</i>	28	57	67,06%
<i>Sardinias en conserva</i>	64	21	24,71%

Elaboración propia

Tabla 4.3-76: Frecuencia de consumo de pescados al mes (días/año), en población escolar de Mejillones.

Frecuencia de consumo de pescado	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa %	Días/año
<i>2 veces al mes</i>	16	18,82%	24,33
<i>3 veces por semana</i>	6	7,06%	156,43
<i>unas pocas veces al año</i>	20	23,53%	5,00
<i>1 vez al mes</i>	18	21,18%	12,17
<i>2 veces al mes</i>	0	0,00%	24,33
<i>1 vez a la semana</i>	15	17,65%	52,14
<i>5 veces por semana</i>	1	1,18%	260,71
<i>No consume</i>	9	10,59%	0,00

Elaboración propia

Respecto de la frecuencia del consumo de pescado, en la Tabla 4.3-76 se destaca el 23,53% que declaró consumirlos unas pocas veces al año. En cuanto a la cantidad de consumo, el 41,18 % declaró consumir 50 gramos, el 31,76%, 100 gramos de pescado, y un 12,94% 150 gramos (Tabla 4.3-77).

Tabla 4.3-77: Frecuencia relativa, respecto a la cantidad de consumo según cantidad en gramos de pescado.

Respecto de la cantidad de consumo de pescados	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
No consume	12	14,12%
Figura 1 (50 gramos)	35	41,18%
Figura 2 (100 gramos)	27	31,76%
Figura 3 (150 gramos)	11	12,94%

Elaboración propia

La distribución del factor de consumo “f” resultante de las opciones seleccionadas por los encuestados, se adjunta en la Figura 4.3-97. Se destaca la mayor concentración de preferencias en el valor del factor 0%. Lo siguen en importancia los valores 50%, 33%, 67% y 100% respectivamente.

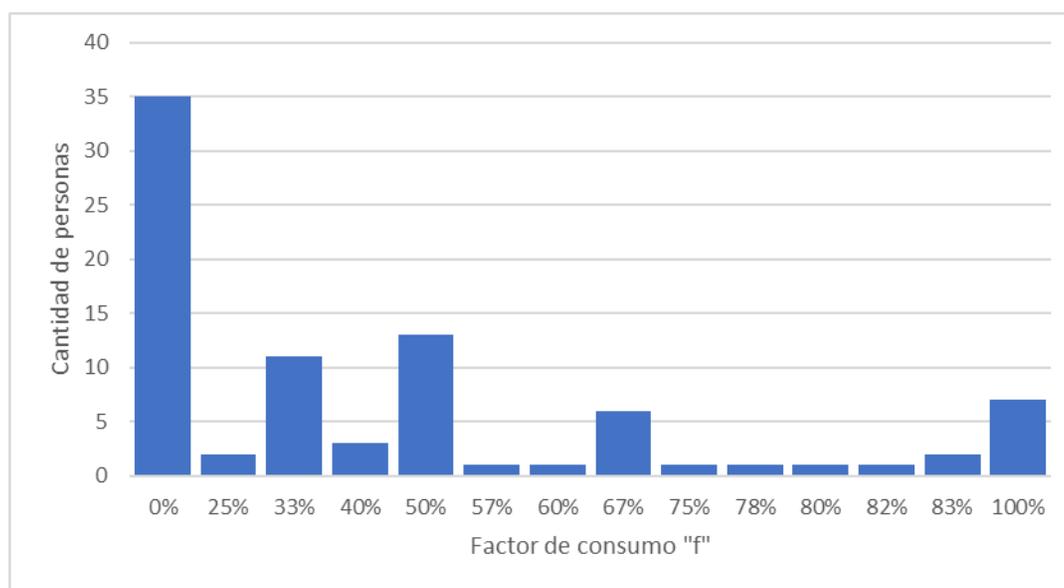


Figura 4.3-97: Frecuencia absoluta de factores de consumo “f” en pescados, habitantes escolares de Mejillones.

Integrando los valores antes señalados, se puede estimar que los habitantes escolares de Mejillones consumen entre 0,00 gr/día y 35,71 gr/día de pescado al año, con un promedio de 3,19 gr/día (Tabla 4.3-78). En cuanto a la frecuencia de consumo, los habitantes escolares de Mejillones consumen pescados entre 0,00 y 130,36 días al año, con un valor promedio de 13,29 días, siendo menor al registrado para la población adulta. Los valores P90 obtenidos de la muestra se adjuntan en la Tabla 4.3-78.

Tabla 4.3-78: Estadísticos de Frecuencia de Exposición (FE) y Tasa de Ingesta (TI) de muestra de consumo de pescados en población escolar.

Estadístico	FE (días/año)	TI (gr/día)
Promedio	13,29	3,19
Mediana	4,06	0,56
Desviación estándar	25,55	6,12
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	130,36	35,71
P90	32,78	9,52

Elaboración propia

En cuanto al consumo de mariscos, la Tabla 4.3-79 muestra la frecuencia de consumo según tipo, donde destaca el bajo consumo general. Sólo el pulpo y el loco alcanzaron sobre un 10% de preferencia de consumo.

Tabla 4.3-79: Frecuencia de consumo de mariscos según tipo.

Ha consumido	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
	No	Si	Si
<i>Lapa</i>	82	3	3,53%
<i>Loco</i>	73	12	14,12%
<i>Clueque</i>	85	0	0,00%
<i>Ostion</i>	82	3	3,53%
<i>Pulpo</i>	75	10	11,76%
<i>Locate</i>	79	6	7,06%
<i>Otro</i>	76	9	10,59%
<i>Huiro</i>	85	0	0,00%
<i>Pelillo</i>	85	0	0,00%
<i>Mariscos en conserva</i>	78	7	8,24%

Elaboración propia

En cuanto a la cantidad de consumo, un 55,29 % declaró no consumir mariscos, mientras que un 28,24% de las preferencias indicaron un consumo de una porción de 50 gr. A su vez, sólo un 3,53% de los registros arrojaron un consumo de una porción de 150 gr, indicando que en general los escolares consumen una porción de un tercio del consumo adulto (Tabla 4.3-80).

Tabla 4.3-80: Frecuencia relativa, respecto a la cantidad de consumo según cantidad en gramos, de mariscos.

Respecto de la cantidad del consumo de mariscos y algas	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa %
No consume	47	55,29%
Figura 1 (50 gr.)	24	28,24%
Figura 2 (100 gramos)	11	12,94%
Figura 3 (150 gramos)	3	3,53%

Elaboración propia

La distribución del factor de consumo “f” resultante de las opciones seleccionadas por los encuestados, se adjunta en la Figura 4.3-98. Al igual que para el consumo de pescado, se destaca la mayor concentración de preferencias en el valor del factor 0.

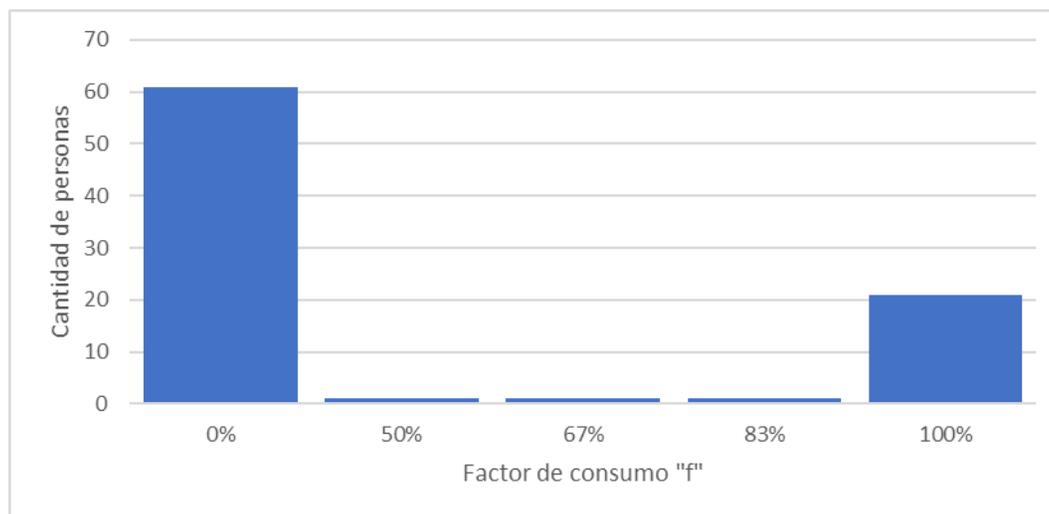


Figura 4.3-98: Frecuencia absoluta de factores de consumo “f” en mariscos, habitantes escolares de Mejillones.

Integrando los valores antes señalados, se puede estimar que los habitantes escolares de Mejillones consumen entre 0,00 gr/día y 21,43 gr/día de marisco al año, con un promedio de 0,81 gr/día (Tabla 4.3-81). En cuanto a la frecuencia de consumo, los habitantes escolares de Mejillones consumen pescados entre 0,00 y 156,43 días al año, con un valor promedio de 5,19 días, siendo menor al registrado para la población adulta. Los valores P90 obtenidos de la muestra se adjuntan en la Tabla 4.3-81.

Tabla 4.3-81: Estadísticos de Frecuencia de Exposición (FE) y Tasa de Ingesta (TI) de muestra de consumo de mariscos en población escolar. Elaboración propia

Estadístico	FE (días/año)	TI (gr/día)
Promedio	5,19	0,81
Mediana	0,00	0,00
Desviación estándar	18,79	2,72

Estadístico	FE (días/año)	TI (gr/día)
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	156,43	21,43
P90	12,17	1,67

La Tabla 4.3-82 muestra la frecuencia reportada de visitas a la playa, donde destacan con un 34,12% quienes refirieron asistir “solo el fin de semana durante vacaciones”, seguido de un 28,24% que refirió asistir “rara vez a la playa” y un 20,0% que declaró asistir “solo los fines de semana”.

Tabla 4.3-82: Frecuencia con que los encuestados refirieron asistir a la playa.

Con que frecuencia vas a la playa (días)	Frecuencia absoluta	Frecuencia Relativa %
<i>Todos los días (365)</i>	8	9,41%
<i>Sólo los días fines de semana (96)</i>	17	20,00%
<i>cuando están en vacaciones, todos los días (112)</i>	7	8,24%
<i>cuando están en vacaciones, los fines de semana (32)</i>	29	34,12%
<i>Rara vez van a la playa (5)</i>	24	28,24%

Elaboración propia

4.3.4.4.3.3 Estimación de Dosis de Exposición

Las Tablas siguientes muestran los resultados de las estimaciones realizadas, considerando una exposición subcrónica en niños entre 6 y 11 años y adultos de la bahía de Mejillones. Se contempló una exposición producto de actividad de juego en el borde del mar, con contacto directo e ingesta de agua de mar, y la ingesta de productos del mar provenientes de la bahía de Mejillones del Sur. La Tabla 4.3-83 resume los supuestos utilizados para el cálculo de las exposiciones.

Tabla 4.3-83: Valores utilizados para el cálculo de la Exposición.

Símbolo	Sentido (unidad)	Matriz	Valor utilizado	Referencia (Fuente, año)
C	Concentración (mg/L)	Agua	Tabla N° 8	CEA, 2017
	Concentración (mg/g)	Biota	Tablas N° 9 y 10	CEA, 2017
	Concentración (mg/g)		Conversión	CIAMA
TC	Tasa de Contacto Agua (L/hr)	-	0,0239 en niños	Dufour et al., 2017 (IC95%) ¹²
		-	0,0124 en adultos	
TI	Tasa Ingesta Alimento (gr/día)	Peces	9,52 en niños	CIAMA, P90
			18,81 en adultos	
		Mariscos	1,67 en niños	
			21,43 en adultos	
FE	Frecuencia de Exposición (día/año) a la playa	-	112,00 en niños	
		-	156,43 en adultos	
	Peces	32,78 en niños		
		46,35 en adultos		
	Mariscos	12,17 en niños		
		52,14 en adultos		
DE	Duración de Exposición (años)	-	6 años en niños	Grupo de estudio 6 a 11 años (inclusive)
		-	30 años en adultos	Juicio Experto, CIAMA
TE	Tiempo de Exposición (horas/días)	-	4 horas por día en niños	Juicio Experto, CIAMA
		-	4 horas por día en adultos	
PC	Peso Corporal (Kg)	-	35 Kg (Niño)	Rev Chil Nutr Vol 43, N° 2, 2016
		-	70 Kg (Adulto)	Referencia N° 17
TP	Tiempo ponderado(días)	Agua- Alimento	2190 días en niños	Yang-Guang Gu et al., 2016 ¹³
			10950 días en adultos	
			25550 días en adultos, ILCR.	

¹²Dufour et al., Ingestion of swimming pool water by recreational swimmers, Table 4.

¹³ Yang-Guang Gu et al., Heavy metals in fish tissues/stomach contents in four marine wild commercially valuable fish species from the western continental shelf of South China Sea.

Tabla 4.3-84: Estimación de Dosis de Exposición Contacto Agua de mar, niños en bahía Mejillones.

Niño de 6 a 11 años	C (mg/l)	TC (l/hr)	FE(días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	TE (horas/días)	Dosis (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,00200	0,0239	112	6	35	2190	4	1,68
Cadmio (Cd)	0,00025	0,0239	112	6	35	2190	4	0,21
Cromo (Cr)	0,00044	0,0239	112	6	35	2190	4	0,37
Plomo (Pb)	0,00061	0,0239	112	6	35	2190	4	0,51
Níquel (Ni)	0,00086	0,0239	112	6	35	2190	4	0,72

Elaboración propia

Tabla 4.3-85: Estimación de Dosis de Exposición Contacto Agua de mar, adulto en bahía de Mejillones.

Adulto	C (mg/l)	TC (l/hr)	FE(días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	TE (horas/días)	Dosis (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,00200	0,0124	156,43	30	70	10950	4	0,61
Cadmio (Cd)	0,00025	0,0124	156,43	30	70	10950	4	0,08
Cromo (Cr)	0,00044	0,0124	156,43	30	70	10950	4	0,13
Plomo (Pb)	0,00061	0,0124	156,43	30	70	10950	4	0,19
Níquel (Ni)	0,00086	0,0124	156,43	30	70	10950	4	0,26

Elaboración propia

Tabla 4.3-86: Estimación de Dosis de Exposición por Ingesta de peces (pejerrey), niños bahía de Mejillones.

Niño de 6 a 11 años	C (mg/gr)	TI (gr/día)	FE (días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	IDE (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,00081	9,52	32,78	6	35	2190	19,79
Cadmio (Cd)	0,00007	9,52	32,78	6	35	2190	1,71
Cromo (Cr)	0,00003	9,52	32,78	6	35	2190	0,73
Plomo (Pb)	0,00023	9,52	32,78	6	35	2190	5,62
Níquel (Ni)	0,00005	9,52	32,78	6	35	2190	1,17
Mercurio (Hg)	0,00001	9,52	32,78	6	35	2190	0,32

Elaboración propia

Tabla 4.3-87: Estimación de Dosis de Exposición por Ingesta de peces (pejerrey), adultos bahía de Mejillones.

Adulto	C (mg/gr)	TI (gr/día)	FE (días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	IDE (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,000810	18,81	46,35	30	70	10950	27,64
Cadmio (Cd)	0,000070	18,81	46,35	30	70	10950	2,39
Cromo (Cr)	0,000030	18,81	46,35	30	70	10950	1,02
Plomo (Pb)	0,000230	18,81	46,35	30	70	10950	7,85
Níquel (Ni)	0,000048	18,81	46,35	30	70	10950	1,64
Mercurio (Hg)	0,000013	18,81	46,35	30	70	10950	0,45

Elaboración propia

Tabla 4.3-88: Estimación de Dosis de Exposición por Ingesta de mariscos (pulpos), niños bahía de Mejillones.

Niño de 6 a 11 años	C (mg/gr)	TI (gr/día)	FE (días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	IDE (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,014000	1,67	12,17	6	35	2190	22,22
Cadmio (Cd)	0,000098	1,67	12,17	6	35	2190	0,16
Cromo (Cr)	0,000016	1,67	12,17	6	35	2190	0,03
Plomo (Pb)	0,000081	1,67	12,17	6	35	2190	0,13
Níquel (Ni)	0,000049	1,67	12,17	6	35	2190	0,08
Mercurio (Hg)	0,000021	1,67	12,17	6	35	2190	0,03
Hidrocarburos	0,000007	1,67	12,17	65	35	2190	0,01

Elaboración propia

Tabla 4.3-89: Estimación de Dosis de Exposición por Ingesta de mariscos (pulpo), adultos Bahía de Mejillones.

Adulto	C (mg/gr)	TI (gr/día)	FE (días/año)	DE (años)	PC (Kg)	TP (días)	IDE (mg/kg/día) x10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,014000	21,43	52,14	30	70	10950	612,24
Cadmio (Cd)	0,000098	21,43	52,14	30	70	10950	4,29
Cromo (Cr)	0,000016	21,43	52,14	30	70	10950	0,70
Plomo (Pb)	0,000081	21,43	52,14	30	70	10950	3,54
Níquel (Ni)	0,000049	21,43	52,14	30	70	10950	2,14
Mercurio (Hg)	0,000021	21,43	52,14	30	70	10950	0,91
Hidrocarburos	0,000007	21,43	52,14	30	70	10950	0,29

Elaboración propia

Tabla 4.3-90: Estimación de Dosis Totales, exposición niños bahía de Mejillones.

Niño de 6 a 11 años	Dosis Contacto Agua (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	IDE total (mg/kg/día) x10 ⁻⁶	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶
Arsénico (As)	1,68	42,01	43,69
Cadmio (Cd)	0,21	1,87	2,07
Cromo (Cr)	0,37	0,76	1,13
Plomo (Pb)	0,51	5,75	6,26
Níquel (Ni)	0,72	1,25	1,97
Mercurio (Hg)		0,36	0,36
Hidrocarburos		0,00	0,00

Elaboración propia

Tabla 4.3-91: Estimación de Dosis Totales, exposición adulto bahía de Mejillones.

Adulto	Dosis Contacto Agua (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	IDE (mg/kg/día) x10 ⁻⁶	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶
Arsénico (As)	0,61	639,88	640,49
Cadmio (Cd)	0,08	6,67	6,75
Cromo (Cr)	0,13	1,72	1,86
Plomo (Pb)	0,19	11,39	11,57
Níquel (Ni)	0,26	3,78	4,04
Mercurio (Hg)		1,36	1,36
Hidrocarburos		0,29	0,29

Elaboración propia

4.3.4.5 Caracterización del Riesgo

4.3.4.5.1 Caracterización del riesgo a la salud

La caracterización del riesgo tiene por finalidad responder la pregunta de investigación planteada por las autoridades de la Región de Antofagasta, que solicitaron evaluar el nivel de riesgo que la exposición a la bahía de Mejillones del Sur le puede producir a la población de residentes en la comuna.

Para responder esta pregunta, se realizó un cálculo de la exposición sitio-específica, es decir contemplando valores de concentraciones observadas en la columna de agua y en la biota comestible de la bahía. Además, se estimaron factores de exposición medidos a partir de una encuesta poblacional. Por lo tanto, para caracterizar el peligro, se utilizaron datos locales. Solamente los valores de las dosis de referencia y de factor de pendiente (cáncer slope factor) utilizados son los descritos en la literatura toxicológica actualmente vigentes, todos los otros valores usados para la estimación corresponden a valores empíricos.

Del análisis de concentraciones de metales presentes en el agua de la bahía y en la biota comestible de la misma, y considerando los valores P90 de FE y de TI y una DE=30 años, se puede establecer que los habitantes de la Comuna de Mejillones presentan riesgo de tener efectos crónicos debido a la ingesta de arsénico debido a dicha exposición, puesto el valor mayor a 1 del índice IP, y una probabilidad de cáncer por arsénico (cáncer en la piel) de aproximadamente 24 personas cada 1.000.000 expuestas, ie, $2,4 \times 10^{-5}$. Para una duración de exposición de 70 años se obtuvo un valor del ILCR de 30 en 1.000.000, presentando un nivel de riesgo similar al obtenido para DE=30 años.

Health Canada, en su estudio “Federal contaminated site risk assessment in Canada”, apéndice C, plantea un margen conservativo de riesgo de cáncer recomendado de 1×10^{-5} como valor límite para evaluar y administrar sitios públicos contaminados con sustancias cancerígenas ¹⁴. De esta forma, considerando la referencia internacional, se corrobora el comportamiento presentado por el factor IP.

Tabla 4.3-92: Índice de Peligro y Riesgo de Cáncer, exposición por metales bahía de Mejillones adultos.

Adulto	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	Dosis referencia (mg/kg/día) x10 ⁻⁶	IP
Arsénico (As)	640,49	300,00	2,13
Cadmio (Cd)	6,75	100,00	0,07
Cromo (Cr)	1,86	900,00	0,00
Plomo (Pb)	11,57	3.000,00	0,00
Níquel (Ni)	4,04	No	No
Mercurio (Hg)	1,36	500,00	0,00
Hidrocarburos	0,29	400.000,00	0,00

Elaboración propia

¹⁴ Guidance on Human Health Preliminary Quantitative Risk Assessment (PQRA), V2, Part 1 (2010), Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada, Health Canada, APENDIX C.

Tabla 4.3-93: Índice de Peligro, exposición por metales bahía de Mejillones niños.

Niño de 6 a 11 años	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	Dosis referencia (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	IP
Arsénico (As)	43,69	300,00	0,15
Cadmio (Cd)	2,07	100,00	0,02
Cromo (Cr)	1,13	900,00	0,00
Plomo (Pb)	6,26	3.000,00	0,00
Níquel (Ni)	1,97	No	No
Mercurio (Hg)	0,36	500,00	0,00
Hidrocarburo	0,00	400.000,00	0,00

Elaboración propia

Tabla 4.3-94: Riesgo de Cáncer, P90 (DE=30 años).

Adulto	Dosis Contacto Agua (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	IDE total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	ILCR x 10 ⁻⁶
Arsénico (As)*	0,49	15,63	16,13	24,19

*Calculado considerando 3% de arsénico inorgánico. Elaboración propia

Tabla 4.3-95: Riesgo de Cáncer, P90 (DE=70 años).

Adulto	Dosis Contacto Agua (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	IDE total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	Dosis Total (mg/kg/día) x 10 ⁻⁶	ILCR x 10 ⁻⁶
Arsénico (As)*	0,61	19,20	19,80	29,71

*Calculado considerando 3% de arsénico inorgánico. Elaboración propia

4.3.4.5.2 Evaluación de la Incertidumbre

En la Tabla 4.3-96 se adjuntan los estadísticos de las mediciones de metales en biota para las especies "Pejerrey" y "Pulpo", donde se destaca el mayor valor de concentración de arsénico en ambas especies con respecto al resto de las componentes estudiadas. Del mismo modo, las concentraciones de este compuesto son de 1 orden de magnitud mayor en el pulpo, por lo que esta especie presenta una mayor influencia en la sensibilidad del parámetro IP.

Tabla 4.3-96: Estadísticos de mediciones de metales en biota para especies Pejerrey y Pulpo.

Componente	Pejerrey [mg/kg ww]					Pulpo [mg/kg ww]				
	N	Prom	DesvStd	Max	Min	N	Prom	DesvStd	Max	Min
As	7	0,657	0,128	0,810	0,390	2	9,640	4,360	14,000	5,280
Cd	7	0,054	0,021	0,070	0,010	2	0,097	0,001	0,098	0,096
Cr	7	0,023	0,004	0,030	0,015	2	0,014	0,002	0,016	0,012
Pb	7	0,065	0,069	0,230	0,013	2	0,058	0,023	0,081	0,035
Ni	7	0,041	0,003	0,048	0,040	2	0,045	0,005	0,049	0,040

Hg	7	0,010	0,002	0,013	0,008	2	0,014	0,007	0,021	0,007
Hidrocarburo	-	-	-	-	-	1	0,007	0,000	0,007	0,007

Luego, las curvas de variación de IP según compuesto en función de la probabilidad se adjuntan en la Figura 4.3-99 y la Tabla 4.3-97 y Tabla 4.3-98 para la población adulta de Mejillones, y en la Figura 4.3-100 y la Tabla 4.3-99 y Tabla 4.3-100 para la población escolar.

De los resultados obtenidos se destaca que el parámetro IP resulta menor a 1 para todos los componentes, a excepción del arsénico, tanto para la población adulta como para la escolar.

Para la población adulta, se destaca que un 70% de los datos se encuentran bajo el valor de IP de 0,5, incluso en su condición más conservadora (valor Máx). Sobre un 75% se observó un aumento de la tasa de variación en función del porcentaje del valor de IP con respecto a lo mostrado en porcentajes menores (Figura 4.3-99). Luego, para el criterio utilizado (P90), se obtuvo que el valor promedio de IP fue de 1,48 para el componente arsénico, con un valor mínimo de 0,82 y un máximo de 2,13. El resto de las componentes fue inferior a 0,04 en sus valores mínimo, promedio y máximo (Tabla 4.3-97 y Tabla 4.3-98).

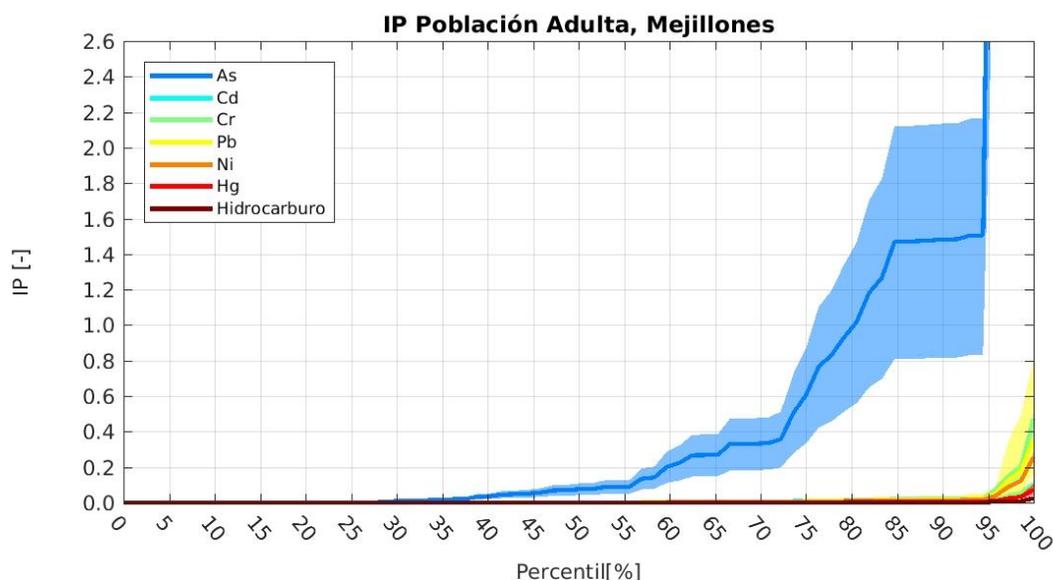


Figura 4.3-99: Probabilidad del índice de Peligro (IP) en población adulta de Mejillones.

Tabla 4.3-97: Valores del índice de peligro IP en población adulta de Mejillones para distintas probabilidades, en las componentes As, Cd, Cr y Pb.

IP	As			Cd			Cr			Pb		
	Mín	Prom	Máx									
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,04	0,08	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70%	0,18	0,33	0,48	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
80%	0,54	0,98	1,41	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03

90%	0,82	1,48	2,13	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04
95%	1,94	3,53	5,11	0,04	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06
98%	5,65	10,23	14,63	0,11	0,18	0,20	0,04	0,05	0,06	0,05	0,16	0,43

Tabla 4.3-98: Valores del índice de peligro IP en población adulta de Mejillones, para distintas probabilidades, en las componentes Ni, Hg e Hidrocarburos.

IP	Ni			Hg			Hidrocarburo		
	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80%	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90%	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
95%	0,02	0,02	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
98%	0,10	0,11	0,12	0,02	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01

Para la población escolar, se destaca que un 90% de los datos se encuentran bajo el valor de IP de 0,15 en su condición más conservadora (valor Máx). Sobre un 95% se observó un aumento de la tasa de variación en función del porcentaje del valor de IP con respecto a lo mostrado en porcentajes menores. Luego, para el criterio utilizado (P90), se obtuvo que el valor promedio de IP fue de 0,11 para el componente arsénico, con un valor mínimo de 0,07 y un máximo de 0,15. El resto de las componentes fue inferior a 0,02 en sus valores mínimo, promedio y máximo.

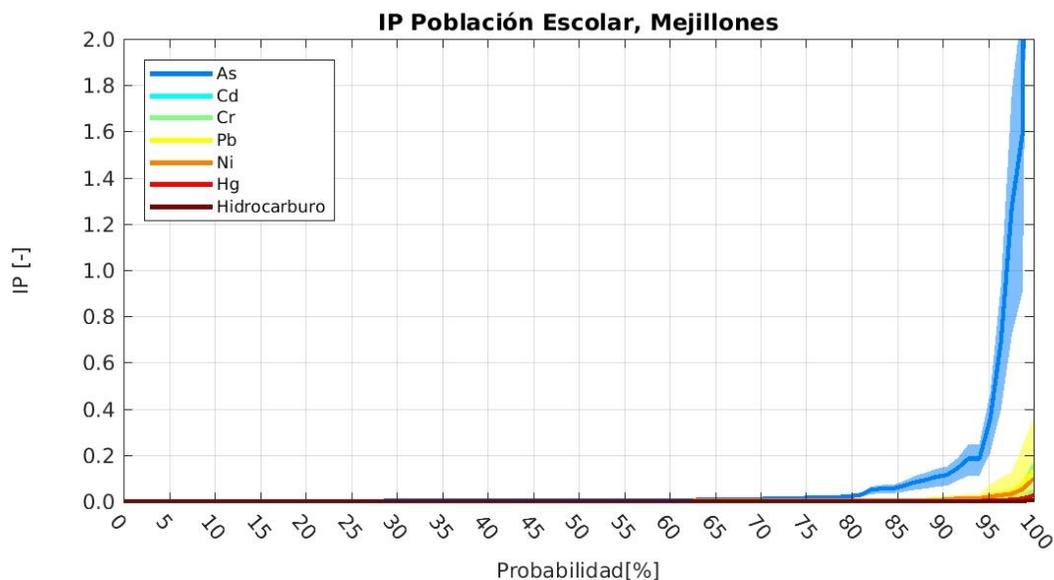


Figura 4.3-100: Probabilidad del índice de Peligro (IP) en población de escolares de Mejillones.

Tabla 4.3-99: Valores del índice de peligro IP en población de escolares de Mejillones para distintas probabilidades, en las componentes As, Cd, Cr y Pb.

IP	As			Cd			Cr			Pb			
	Prob	Mín	Prom	Máx									
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70%	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80%	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
90%	0,07	0,11	0,15	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
95%	0,19	0,32	0,42	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06
98%	0,78	1,38	1,90	0,02	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,16

Tabla 4.3-100: Valores del índice de peligro IP en población de escolares de Mejillones, para distintas probabilidades, en las componentes Ni, Hg e Hidrocarburos.

IP	Ni			Hg			Hidrocarburo			
	Prob	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90%	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
95%	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
98%	0,04	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Considerando los resultados obtenidos para la población adulta y que el 3% del arsénico consumido corresponde a inorgánico, se obtuvo la variación del parámetro ILCR en función de la probabilidad (Figura 4.3-101 y Tabla 4.3-101). Luego, considerando el criterio P90, se obtuvo un valor promedio de 21×10^{-6} , con un mínimo de 12×10^{-6} y un máximo de 30×10^{-6} para dicho percentil.

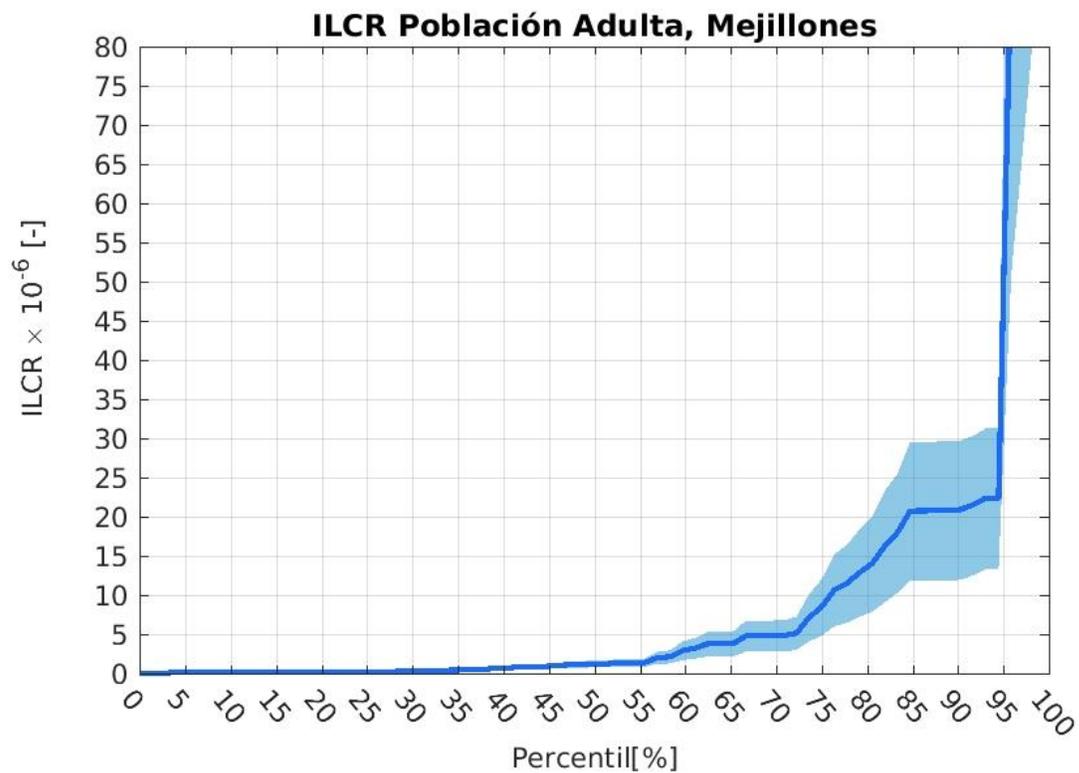


Figura 4.3-101: Parámetro ILCR para distintas probabilidades en población adulta de Mejillones.

Tabla 4.3-101: Valores del parámetro ILCR en población adulta de Mejillones, para distintas probabilidades.

Prob	10%	20%	50%	70%	80%	90%	95%	98%
<i>ILCR min</i>	0	0	1	3	8	12	28	78
<i>ILCR prom</i>	0	0	1	5	14	21	50	140
<i>ILCR max</i>	0	0	2	7	19	30	71	200

4.3.4.6 Conclusiones

La bahía de Mejillones tiene una población que ha ido incrementando paulatinamente su magnitud, con un aumento mayor al 50% de su población del año 2002 al año 2017. Este incremento poblacional en paralelo al auge industrial de la zona ha provocado un aumento de la presión sobre los recursos naturales, particularmente los de la bahía de Mejillones del Sur.

Este estudio tuvo por finalidad dar respuesta a la inquietud de las autoridades, respecto de un posible impacto sobre la salud de la población frente a la exposición a contaminantes presentes en el agua y los alimentos (peces, crustáceos, mariscos, etc.) producidos por la bahía.

Para responder esta pregunta se llevó a cabo un diagnóstico de situación de salud de la población y una estimación del riesgo frente a la exposición de sus habitantes.

Se estimaron las dosis totales de ingesta de metales presentes en el agua y alimentos de la bahía de Mejillones, por medio de la estimación de ingesta a través de escenarios de exposición dado por contacto durante los meses de verano en actividad de juego en el borde del mar y el consumo diario de pescados, mariscos y crustáceos provenientes de la misma bahía.

La población de Mejillones presenta algunas particularidades en su salud. Al igual que otras comunas de la Región de Antofagasta, se caracteriza por presentar tasas elevadas, en comparación al resto del país, de tumores. Además, presenta elevadas tasas de problemas respiratorios, digestivos, cardiovasculares y patologías de la piel.

Se estimó el riesgo proveniente de la presencia de metales en la columna de agua de mar y en algunos alimentos hidrobiológicos extraídos en la bahía. Los resultados muestran que existe un riesgo a la salud de los adultos por el consumo de algunos alimentos provenientes de la bahía, que presentan alto contenido de arsénico.

Estos resultados pueden estar sobre estimados pues se utilizó el supuesto que toda la concentración medida es absorbida por el organismo humano, lo que puede sobre estimar las dosis de exposición. Sin embargo, se mantuvo este análisis, pues por lo que respecta al arsénico, se podría establecer que existen también otras fuentes de exposición, que no fueron integradas al análisis como son la ingesta a partir de agua de consumo humano, ingesta por medio del suelo y/o el polvo sedimentable e ingesta vía aérea. Dichas vías se encuentran fuera del alcance del estudio, y al no existir datos locales fácilmente trazables, no se pudieron incorporar al análisis. Por lo anterior puede ser que la real exposición de la población a estos metales sea la calculada o mayor.

4.3.4.7 Bibliografía

1. ATSDR Minimal Risk Level, 2018 https://www.atsdr.cdc.gov/mrls/pdfs/atsdr_mrls.pdf
2. Bird D and Cothorn C Introduction to risk analysis A Systematic Approach to Science-Based Decision Making. Ed. Government Institutes, 2000.
3. GermanCano-Sancho y cols-Oral bioaccessibility of arsenic, mercury and methylmercury in marines pecies commercialized in Catalonia (Spain) and health risks for the consumers. Food and Chemical Toxicology 86(2015)34–40.
4. Clay's Habdbook of Environmental Health. Twentieth Editoiptn. Ed. Stephen Battersby, Spon Press, 2011.
5. Helena A.Kehrig Selenium and mercury in widely consumed seafood from South Atlantic Ocean. Ecotoxicology and Environmental Safety 93(2013)156–162.
6. Fjeld R, Eisenberg N and Compton K Quantitative Environmenatl Risk Analysis for human health . Ed Wiley 2007.
7. F. Roth et al Impacts of a high-discharge submarine sewage outfall on water quality in the coastal zone of Salvador (Bahia, Brazil). Marine Pollution Bulletin 106 (2016) 43–48.
8. LI Xiu Ting, et al, Association between Plasma Metal Levels and Diabetes Risk: a Case-control Study in China Biomed Environ Sci, 2017; 30(7): 482-491
9. Merrill Ray Environmental Epidemiology, Ed jOnes and Bartlett Publishers, 2008.
10. Ricci P Environmental and Health Risk Assessment and Management. Principles ans Practices. Ed. Springer, 2006
11. Saliba LJ, Helmer R. Health risks associated with pollution of coastal bathing waters. World Health Stat Q. 1990;43(3):177-87.
12. SEA, 2012 Guía de Evaluación de Impacto Ambiental Riesgo para la Salud de la Población en el SEIA. ISBN: 978-956-9076-06-0. 52 pp.
13. N. Salgueiro-González y cols. Occurrence of endocrine disrupting compounds in five estuaries. Chemosphere 131 (2015) 241–247.
14. of the northwest coast of Spain: Ecological and human health impact
15. USEPA Child-Specific Exposure Scenarios Examples EPA 600/R-14/217F/September 2014/ www.epa.gov/ncea
16. SeaYang-Guang Gua, Hong-Hui Huang, Qin Lina, Concentrations and human health implications of heavy metals inwild aquatic organisms captured from the core area of Daya Bay'sFishery Resource Reserve, South China Sea. Environmental Toxicology and Pharmacology 45 (2016) 90–94.
17. Yang-Guang Gu et al Heavy metals in fish tissues/stomach contents in four marine wild commercially valuable fish species from the western continental shelf of South China Sea. Marine Pollution Bulletin 114 (2017) 1125–1129.

4.3.4.8 ANEXOS

4.3.4.8.1 Revisión de antecedentes

4.3.4.8.1.1 Principales Antecedentes de la comuna de Mejillones

La población de la Región de Antofagasta corresponde al 3,4% del total de la población del país, la proyección INE para el 2017 indica que la población alcanza los 607.534 habitantes, con una densidad poblacional de 4,5 habitantes por km².

El 52,1% de la población corresponde a población masculina y el 47,9% a femenina, lo que proporciona un índice de masculinidad de 107,7, es decir, hay cerca de 108 hombres por cada 100 mujeres.

En la Región, tanto las tasas ajustadas de mortalidad por tumores como por enfermedades del sistema circulatorio presentan valores mayores a las tasas del país; sólo la tasa ajustada de mortalidad por traumatismos y envenenamiento tiene una menor tasa que la nacional, con 7 muertes menos por cada cien mil habitantes para el trienio 2004-2006.

La región de Antofagasta históricamente ha presentado una contaminación natural y antropogénica muy alta por arsénico. El consumo de esta sustancia cancerígena se produjo por varias décadas a través del consumo de agua potable no abatida; en la actualidad las plantas de agua potable cuentan con sistemas para depurar el tóxico y están dispuestas en gran parte de la región y el uso de agua potable desalinizada, han ayudado a reducir la exposición.

Sin embargo, el efecto en la aparición de tumores relacionados al arsénico, principalmente cáncer de pulmón, vejiga, riñón y piel es a largo plazo, por lo que aún se puede observar el efecto del tóxico en la población. Otro punto que gatilla la aparición de tumores y que potencia la acción del arsénico es el consumo tabáquico el cual alcanza el 45,6% de la población en la región de Antofagasta. También es importante considerar la alta radiación solar, la cual tiene implicancias en la morbilidad y en la mortalidad por cáncer de piel.

Esta comuna ha tenido un sostenido aumento de su actividad económica principalmente en el rubro generación eléctrica, de insumos para la minería y servicios de importación y exportación. Esto ha provocado un aumento de las emisiones atmosféricas que, si bien no han alterado la calidad del aire, han provocado inquietud en la población, por lo que el Municipio solicitó un estudio sobre la salud de la comuna¹⁵.

Dicho estudio identificó la mortalidad por tumores maligno de los bronquios como un problema que requería de la identificación de factores de riesgo que pudieran estar propiciando la situación.

4.3.4.8.1.1 Antecedentes del área de estudio

La bahía de Mejillones del sur constituye un sistema ambiental que muestra la existencia de una zona mínima de oxígeno (ZMO) asociada a determinadas profundidades, que oscila de acuerdo a cambios estacionales o bien a fenómenos de mayor escala como puede ocurrir con la presencia del fenómeno del “El Niño” y la dinámica asociada a la surgencia. Las bajas concentraciones de oxígeno pueden determinar el fenómeno de hipoxia en los

¹⁵ ILUSTRART Perfil Epidemiológico de morbimortalidad de la Comuna de Mejillones, Informe Final 2013.

organismos. Se han medido importantes volúmenes de DBO5 en aguas que se descargan desde el litoral, pudiendo ser un factor determinante en los niveles de oxígeno del agua y sedimentos. De acuerdo con lo anterior, en bahía Mejillones pueden existir al menos dos causas importantes para las bajas concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua. La primera determinada por procesos de gran escala en función de la profundidad y que corresponde a las ZMO. La segunda, por generación de altas descargas de DBO5 o descomposición de materia orgánica en las aguas costeras superficiales, a menos de 30 metros de profundidad.

Para parámetros, principalmente en puntos de monitoreo, medidos en el agua, para los que se dispone de una serie de varios años, como por ejemplo temperatura, pH, oxígeno disuelto, la distribución espacial y temporal muestra en general cambios que indican un aumento de la variabilidad de los valores obtenidos en una misma fecha. Los metales pesados como por ejemplo cobre y cadmio y metaloides como arsénico en la columna de agua también presentan un aumento de la variabilidad en sus valores, coincidentes con los aumentos de la variabilidad de los parámetros indicados más arriba. Es importante señalar que entre las fuentes de variabilidad se incluyen aspectos metodológicos, tales como los límites de detección de los métodos analíticos utilizados. En relación con los sedimentos, cabe destacar que las variables materia orgánica y potencial de óxido reducción, muestran cambios a lo largo del eje suroeste-noreste. Los metales como cadmio y cobre y los metaloides como arsénico muestran una tendencia a presentar valores más altos y una mayor variabilidad hacia el suroeste. Estas distribuciones de los datos generales pueden tener relación con patrones de circulación de las masas de agua y/o la localización de las descargas de las unidades productivas.

4.3.4.8.1.1.2 Demografía

Una de las características principales de la comuna es su gran crecimiento demográfico, con un incremento de su población muy por sobre el país y la región (Tabla 4.3-102), a pesar de presentar una tasa de natalidad (15,2 por 1000) más baja que la regional (17,4 por 1000). Esto se debe por lo tanto a las migraciones estimuladas por las ofertas laborales de la actividad económica mencionada en la introducción. El 15.73% de la población es de nacionalidad extranjera, principalmente bolivianos¹⁶.

Como Chile se encuentra en una situación de Transición Demográfica avanzada, el mejor indicador del riesgo de morir corresponde a la Esperanza de vida al Nacer. Se observa que los hombres de Mejillones tienen mayor probabilidad de morir que sus congéneres de la Región de Antofagasta y que Chile, mostrando casi un año menos de expectativa de vida al nacer que los de la Región de Antofagasta. Las mujeres no presentan el mismo patrón, tienen mayor expectativa de vida que la Región y el país (Tabla 4.3-103).

¹⁶ Casen 2015

Tabla 4.3-102 Población Total Censo año 2002 y 2017

Territorio	Año 2002	Año 2017	Variación (%)
Comuna de Mejillones	8.418	13.467	59,9
Región de Antofagasta	493.984	607.534	22,9
País	15.116.435	17.574.003	16,3

Fuente: Elaboración propia a partir datos del INE

Tabla 4.3-103 Esperanza de vida al nacer comparación comunas de la Comuna de Mejillones, Región de Antofagasta y Chile, 2014

Localidades	Hombre	Mujeres
Mejillones	74,48	82,86
Región de Antofagasta	75,46	80,78
Chile	75,1	80,8

Fuente: Elaboración propia a partir de INE Chile Esperanza de vida al nacer en comunas de 10 mil habitantes o más, 2012-2014

4.3.4.8.1.1.3 Clima

El clima de Mejillones es de "desierto". No hay virtualmente ninguna lluvia durante el año. El clima se clasifica como BWh por el sistema Köppen-Geiger. En Mejillones, la temperatura media anual es de 18.3 ° C. Hay alrededor 2 mm de precipitaciones anuales. El mes más seco es enero, con 0 mm de lluvia. La mayor parte de la precipitación cae en julio, promediando 1 mm. Enero es el mes más cálido del año. La temperatura en enero promedia 22.0 ° C. julio es el mes más frío, con temperaturas promediando 15.0 ° C.

Desde un punto de vista de la salud el rango de temperatura que Mejillones muestra permite el desarrollo de la vida y salud de la población sin ser un factor de riesgo.

4.3.4.8.1.1.4 Determinantes sociales estructurales

Mejillones muestra un nivel socioeconómico dispar presenta algunos indicadores más deteriorados que la región de Antofagasta y el país (rendimiento educacional, hacinamiento crítico), pero menor porcentaje de pobreza y mayores remuneraciones, que su base de comparación (Tabla 4.3-104).

Tabla 4.3-104 : Caracterización Socio-Económica de Mejillones

Indicadores	Mejillones	Región	País
Pobreza (Ministerio Desarrollo Social):			
% de personas en situación de pobreza, 2011 Áreas Pequeñas	6,2	7,5	14,4
% de personas en situación de pobreza, 2011 por Conglomerados	-	7,5	14,4
Educación (Agencia Calidad de la Educación y Consejo de Rectores):			
Promedio Simce Lectura 2° Básico, 2012	235	248	250
Promedio Simce Matemática II° Medio, 2012	203	258	265
PSU Lenguaje, 2012	442	491	488
PSU Matemáticas, 2012	446	500	491
Ingreso (Administradora de Fondos de Cesantía de Chile):			
Remuneración imponible promedio, 2013	694.747	838.428	563.414
Vivienda (Ministerio de Desarrollo Social):			
% Hogares con Hacinamiento Crítico	3,3	3,0	2,3
% Hogares con Saneamiento Deficitaria	8,6	13,7	17

Fuente: Ministerio de Desarrollo Social Reporte Comunal: Mejillones, febrero 2014

4.3.4.8.1.1.5 Sistema de Salud

Mejillones tiene rápido acceso a la infraestructura de salud de la Comuna de Antofagasta. También cuenta con un Hospital de baja complejidad perteneciente al sistema público de atención de salud y un policlínico de un organismo administrador del seguro de accidentes y enfermedades profesionales, que atiende a trabajadores adscritos a la ACHS.

Tabla 4.3-105 Sistema de Atención de Salud de Mejillones

Establecimiento	Pertenencia	Dirección	Teléfono
Policlínico Asociación Chilena de Seguridad AChS Mejillones	Privado	Calle Almirante Latorre 720	
Hospital de Mejillones	Público	Avenida Bernardo O'Higgins 451	552655250

Fuente: Listado de Establecimientos DEIS/MINSAL

4.3.4.8.1.1.6 Otros factores determinantes de la salud

4.3.4.8.1.1.6.1 Entorno ambiental

La creciente actividad económica de la Región de Antofagasta en especial el desarrollo de la gran minería ha tenido como consecuencia un aumento de la actividad de importación y exportación a través de los puertos y de la demanda de energía eléctrica.

La ciudad de Mejillones ha experimentado un sostenido aumento de proyectos, tanto de generación de energía eléctrica, de insumos para la minería y de servicios de importación y exportación, que se han ubicado en el sector industrial al Noroeste de la ciudad.

Desde la promulgación en el año 1994 de la Ley de Bases del Medio Ambiente y posteriormente del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, la mayoría de los proyectos han sido sometidos a evaluación ambiental en el SEIA, por lo que todas las instalaciones industriales cuentan con medidas de control de las emisiones y sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

4.3.4.8.1.1.6.2 Calidad del Aire ¹⁷

La Superintendencia de Medio Ambiente ha realizado auditorías del cumplimiento de las normas de calidad del aire durante los años 2015, 2016 y 2017 con el objetivo de evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire primaria para MP10, NO₂ y CO; en su nivel horario, diario y anual, en las estaciones que cuentan con representatividad poblacional para material particulado MP10, gases NO₂ y CO.

La estación utilizada para la evaluación de datos de MP10, CO y NO₂, que cumplen con ser estaciones con EMRP y/o EMRRN para MP10, CO y NO₂ es la estación Compañía de Bomberos de Mejillones.

En el año 2014: la comparación de norma de MP10 a nivel diario (150 µg/m³N), se determinó el valor del percentil 98 de la norma de 24 horas, para los años 2012, 2013 y 2014, constatándose que la norma no fue superada en la estación Compañía de Bomberos y los valores obtenidos se encontraron por debajo del 80% de la norma de 24 horas.

Respecto del cumplimiento de la norma anual de MP10 que establece como límite una concentración de 50 µg/m³N, se concluye que la norma anual de MP10 no fue superada en la estación Compañía de Bomberos. El promedio trianual de las medias aritméticas de MP10, fue inferior al 80% de la norma anual.

La determinación de la norma de 1 hora por NO₂, mediante el promedio del percentil 99, concluyó que la norma no fue superada en la estación Compañía de Bomberos. Para el caso de evaluación de la norma anual de NO₂, los valores obtenidos mostraron que las concentraciones anuales de NO₂, al realizar una comparación referencial, no fue superada en el año 2012 y ni en el año 2014. Para el año 2013, debido al número de datos disponibles (menor al 75% el último trimestre del 2013), no fue posible analizar la norma anual de NO₂.

La evaluación de la Norma de 1 hora para CO, mediante el cálculo del percentil 99, determinó que la esta no fue superada en la estación Compañía de Bomberos y tampoco se superó el 80% de la norma. En la evaluación del cumplimiento de la norma de CO, mediante el promedio trianual del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de

¹⁷ SMA Sistema Nacional de Fiscalización Ambiental
<http://snifa.sma.gob.cl/v2/UnidadFiscalizable/Ficha/13203>

8 horas, se determinó que la norma no fue superada en la estación Compañía de Bomberos, y los valores se encontraron muy por debajo del 80% de la norma.

Durante el año 2017:

La evaluación de la norma 24 horas para MP10 determinó que los valores correspondientes al percentil 98 de las concentraciones diarias para los años 2014, 2015 y 2016 no superaron el límite de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ establecido en la normativa. Para el año 2016 el valor de la concentración, obtenido mediante al cálculo del percentil 98, fue de 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ correspondiente al 29% de la norma de 24 horas.

De la evaluación de la norma anual para MP10 se obtuvo que la concentración del promedio trianual de los años 2014, 2015 y 2016, no sobrepasó el límite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ establecido en la normativa. El valor obtenido mediante el cálculo del promedio trianual fue de 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, correspondiente al 45% de la norma anual.

La evaluación de la norma 1 hora para NO_2 obtuvo como resultado que los valores del percentil 99 de las concentraciones de 1 hora no superaron el límite de los 213 ppbv establecidos en la norma, alcanzando el promedio anual un 1% de ella.

Con respecto a la evaluación de la norma anual para NO_2 , no fue posible realizar la evaluación de la norma mediante el cálculo del promedio trianual de las concentraciones, debido a que el año 2016 se presentó incompleto para el primer y tercer semestre, por lo tanto, no se contó con el 75% de datos válidos que establece la normativa.

La evaluación de la norma 1 hora para CO determinó que el límite de 26 ppmv establecido en ella no fue superado, obteniéndose como promedio trianual de los percentiles 99 de las concentraciones de 1 hora para los años 2014, 2015 y 2016 una concentración equivalente a 1,96 ppmv, lo que corresponde a un 8 % de la norma.

Con respecto a la norma 8 horas para CO se obtuvo, para el periodo analizado, que el promedio trianual de los percentiles 99 de las concentraciones de 8 horas fue de 14,49 ppmv, lo que equivale a un 17 % de la norma.

En resumen, la Comuna de Mejillones no ha presentado episodios de mala calidad del aire por los contaminantes evaluados en la estación Ferrocarril.

4.3.4.8.1.1.6.3 Infraestructura Sanitaria¹⁸

En términos de la infraestructura sanitaria de la comuna, lo primero que debe destacarse es lo que dice relación con la red de Agua Potable que sirve a la ciudad de Mejillones, la cual pertenece al gran sistema del norte que incluye a las localidades de Antofagasta, Calama, Mejillones, Playa Brava, Taltal y Tocopilla.

En toda la zona norte el recurso agua es escasa y se encuentra a grandes distancias de los centros de consumo, lo que necesariamente implica elevados costos en la producción y transporte de agua potable. Debido a la composición química de las aguas, éstas deben ser tratadas para abatir el arsénico en exceso, existiendo tres

plantas de tratamiento: una en Calama, con una capacidad de 550 l/s que atiende a esta ciudad, Tocopilla y Pampa Salitrera, y dos ubicadas en Salar del Carmen de Antofagasta,

¹⁸ PLADECO 2008-2018

las que atienden a Antofagasta y Mejillones con una capacidad total de 1.070 l/s (CICA, 2002).

La situación de cobertura de agua potable urbana en la región de Antofagasta, al año 2005, fue de un 100%, lo que en la práctica significa que todos los sectores poblacionales bien definidos poseen matrices de agua potable, restando instalar redes sólo en pequeños sectores aislados. Así mismo la cobertura de alcantarillado para la zona alcanza a un 99,2% a diciembre de 2005.

De acuerdo con lo informado por la I. Municipalidad de Mejillones, actualmente la comuna cuenta con agua potable y alcantarillado en la totalidad del área urbana habitada. Las empresas ubicadas en el Barrio Industrial se abastecen de agua mediante camiones aljibes municipales y/o mediante plantas desalinizadoras de agua de mar, para abastecer de agua industrial a sus procesos.

De acuerdo con el “Informe Anual de Coberturas Agua Potable y Alcantarillado” (2003), preparado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios SISS, a esa fecha la cobertura de agua potable alcanzaba a un 100% y la de alcantarillado a 99,2% en el área urbana de Mejillones.

Respecto a la disposición final de las aguas servidas generadas en Mejillones, se realiza un tratamiento primario que permite retener los sólidos en suspensión, para luego el efluente ser descargado al océano a través de un emisario submarino de 850 m de longitud, ubicado al noroeste de la ciudad.

Por otra parte, en cuanto a la cobertura eléctrica a nivel domiciliario en la comuna, esta es cercana al 100%. La energía eléctrica es distribuida en Mejillones por la concesionaria ELECDA (Empresa Eléctrica de Antofagasta S.A.).

4.3.4.8.1.2 Indicadores De Salud

La situación de salud de una comuna se estudia por medio del análisis de la situación más actual y las tendencias observadas de los principales indicadores de salud tales como las defunciones, la tasa general de mortalidad y tasas específicas por algunas causas.

Los egresos hospitalarios dan cuenta del comportamiento de las enfermedades que requieren hospitalización para su estudio y/ o tratamiento, las consultas de urgencia y los registros de algunas enfermedades de notificación obligatoria permiten caracterizar los principales problemas existentes en la salud de la población.

4.3.4.8.1.2.1 Análisis de la Mortalidad

La mortalidad es uno de los indicadores o estadística vital más ilustrativa y que permite entregar una visión de la situación de salud de una comunidad. Analizaremos la mortalidad general, es decir por todo tipo de causa y su tendencia. También se analizan la mortalidad infantil y la mortalidad por algunas causas específicas de muertes y el indicador tasa de años de vida perdida (AVPP)¹⁹. Se comparan los indicadores de la Comuna de Mejillones con los de la Región de Antofagasta y Chile, para destacar sus particularidades.

¹⁹ El indicador Años de Vida Potenciales Perdidos (AVPP) ilustra sobre la pérdida que sufre la sociedad como consecuencia de la muerte de personas jóvenes o de fallecimientos prematuros. El supuesto en el que se basan los AVPP es que cuando más prematura es la muerte, mayor es la pérdida de vida.

La mortalidad general de la Región de Antofagasta ha presentado una tendencia leve al alza, al igual que la del país, la comuna de Mejillones muestra mayor inestabilidad y tendencia estacionaria, pero siempre por debajo del promedio nacional (Figura 4.3-102). La inestabilidad de la tasa de mortalidad es común en las poblaciones menores a 10.000 habitantes. Esto mismo se observa, con mayor claridad en las Tasas de mortalidad infantil en las que se vieron dos años consecutivos con tasa cero (ninguna muerte) y otros en que la tasa se “dispara” por sobre el promedio regional y/o del país (Figura 4.3-103).

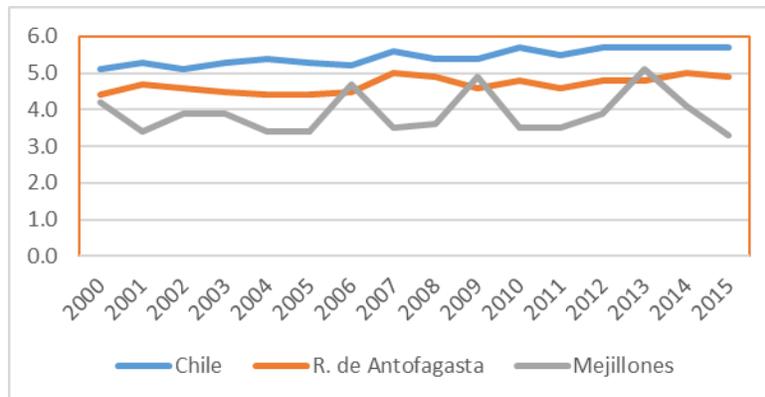


Figura 4.3-102 Tendencia Mortalidad General Chile, Región Antofagasta y Mejillones. Fuente: Elaboración propia, a partir de estadísticas vitales, DEIS, MINSAL

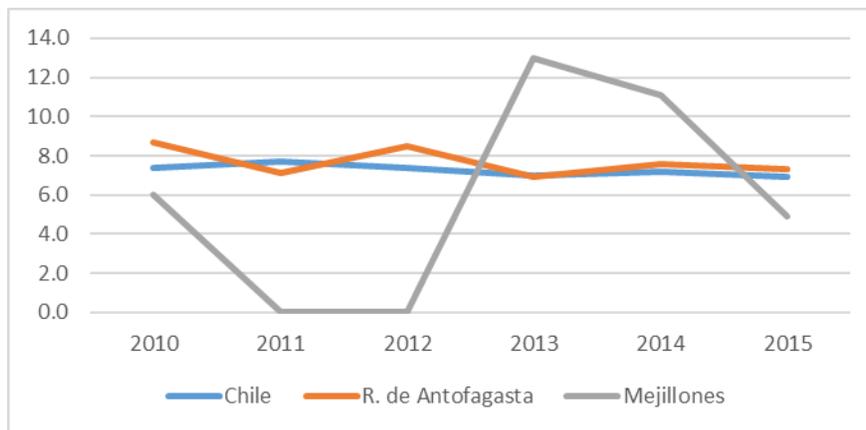


Figura 4.3-103 Tendencia de la Mortalidad Infantil Chile, Región de Antofagasta y Mejillones. Fuente: Elaboración propia, a partir de estadísticas vitales, DEIS, MINSAL

Respecto de las causas de muerte las figuras siguientes muestran la tendencia de las distintas causas de muerte diagnosticadas en el país y región estudiada, durante el quinquenio 2010 al 2014.

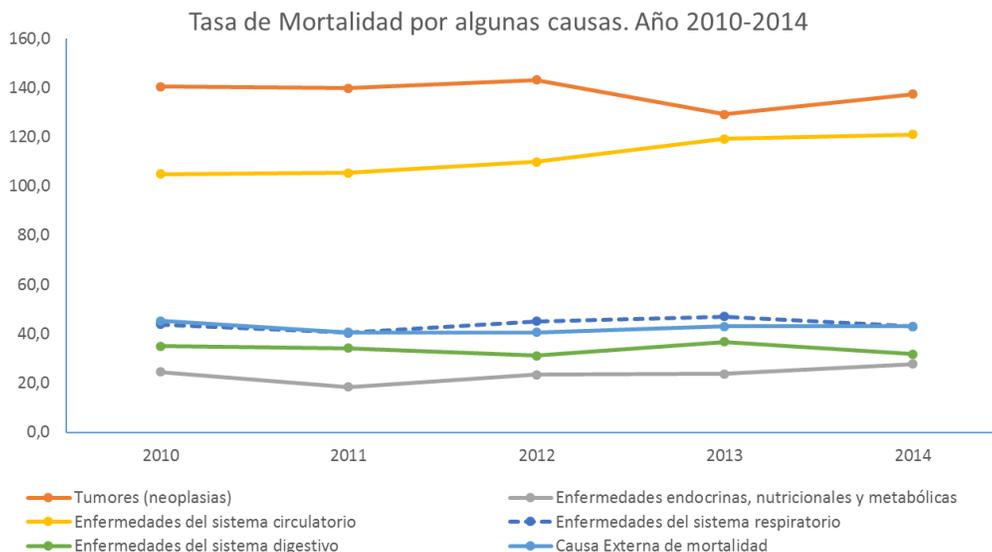


Figura 4.3-104 Causas de mortalidad Región Antofagasta, 2010-2014. Fuente: DEIS, MINSAL

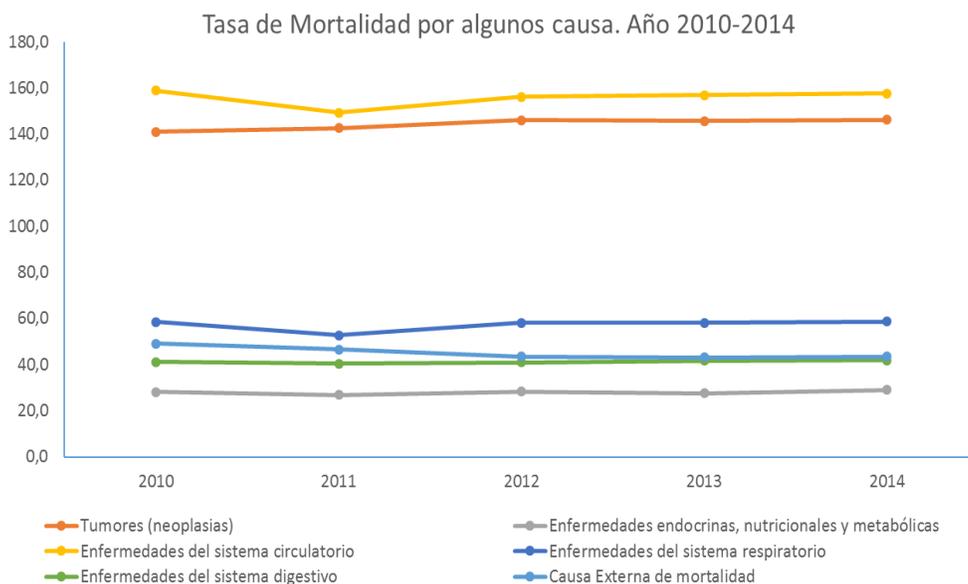


Figura 4.3-105 Causas de mortalidad Chile, 2010-2014. Fuente: DEIS, MINSAL

La región de Antofagasta presenta como principal causa de muerte en el quinquenio descrito, las muertes debido a Tumores, seguida de las patologías del aparato circulatorio, mostrando lo contrario respecto a lo que ocurre en el país, en donde este tipo de enfermedad es la que más mata. Por debajo se encuentran las enfermedades del aparato respiratorio.

Finalmente, a nivel de mortalidad, se puede observar que la tasa de años de vida potenciales perdidos en la comuna presentó durante los años 2012 al 2014, un incremento en comparación con la región de Antofagasta y el país.

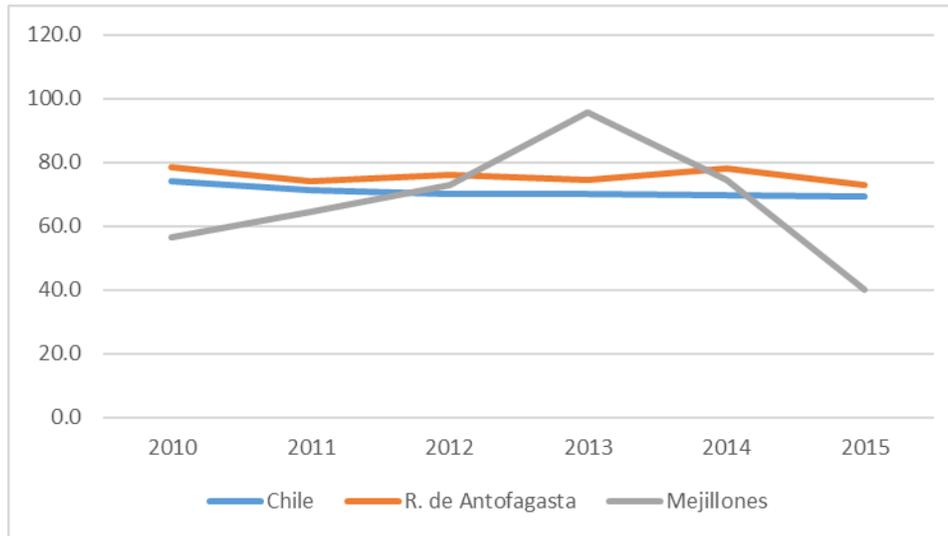


Figura 4.3-106 Tasas de Años de Vida Potenciales Perdidos Chile, Región de Antofagasta y Mejillones. Fuente: Elaboración propia, a partir de estadísticas vitales, DEIS, MINSAL

4.3.4.8.1.2.2 Egresos Hospitalarios

El estudio de las hospitalizaciones permite tener una idea respecto de las patologías de mayor gravedad, que requieren hospitalización para mejorar su evolución. Chile cuenta con un registro nacional de egresos hospitalarios, que permite conocer el comportamiento de todas las hospitalizaciones de los habitantes por comuna de residencia, sean ellos atendidos en el sistema público o privado, en la propia comuna, en la región o en otra localidad del país, pues existen patologías que son derivadas para su estudio o tratamiento a hospitales de mayor complejidad y también se registran en las bases de datos del Departamento de Estadística e Información del Ministerio de Salud.

El Figura 4.3-107 muestra la tendencia de las hospitalizaciones de los habitantes de la Comuna de Mejillones.

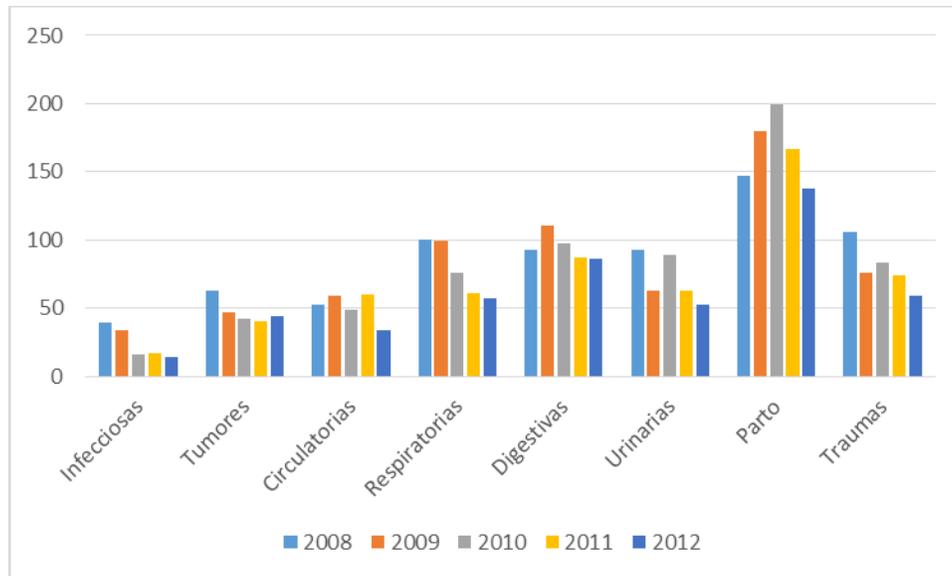


Figura 4.3-107 Hospitalizaciones por causas seleccionadas, Mejillones 2008-2012, Números Absolutos. Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas de egresos hospitalarios del DEIS

Se observa que, con excepción de los partos, las patologías que concentran las hospitalizaciones son las digestivas, respiratorias y los traumas. Llama la atención la magnitud de las hospitalizaciones por enfermedades del sistema genito-urinario, que son más frecuentes que las circulatorias. Esto podría estar asociado a la prevalencia de enfermedades de transmisión sexual que se presentan más adelante en el informe.

Evaluando el comportamiento comparativo de las hospitalizaciones de residentes de la comuna de Mejillones (es decir aquellas que se producen en cualquier hospital o clínica del país) llama la atención las tasas elevadas, por sobre los esperado respecto de la región y/o el país en materia de Tuberculosis e Infección por VIH. Ambas condiciones están asociadas, y a su vez probablemente facilitadas por la migración.

También resultan llamativos a pesar de ser bajo el número de hospitalizaciones por tumor maligno de vejiga urinaria (2); el tumor maligno de vías biliares (1) y el tumor de útero (1). Estas patologías son muy poco frecuentes y como el número de habitantes de Mejillones es reducido (sólo miles) no se espera observarlas. El tumor de vejiga se encuentra fuertemente asociado a la exposición a arsénico y tabaco, el de útero pudiera estar asociado a la migración. El de hígado sin embargo no pareciera estar relacionado directamente con características descritas del lugar. Sin embargo, la literatura internacional reconoce para algunos cánceres de hígado la etiología ocupacional, es decir los relaciona con exposiciones laborales en industrias químicas y del petróleo.

Tabla 4.3-106 Egresos por causas seleccionadas Mejillones comparación con región de Antofagasta y país, 2011

Código CIE-10	Grupo de causas	Total	Tasa	Región	Tasa	Mejillones	Tasa	RT
	Todas las Causas	1.648.687	956	68.936	1.185	845	762	0,80
A15 - A16	Tuberculosis respiratorias	1.450	1	32	1	3	3	3,22
B20 - B24	Infección por VIH y SIDA	1.440	1	39	1	2	2	2,16
C22	Tumor maligno del hígado y vías biliares intrahepáticas	960	1	31	1	1	1	1,62
C54,C55	Tumor del útero	1.247	1	29	0	1	1	1,25
C67	Tumor maligno de la vejiga urinaria	1.440	1	126	2	2	2	2,16
F00 - F09	Trastornos mentales orgánicos, incluidos los trastornos sintomáticos	1.377	1	34	1	1	1	1,13
H60 - H95	Enfermedades del oído y de la apófisis mastoides	5.696	3	194	3	4	4	1,09
I21 - I22	Infarto agudo de miocardio	9.402	5	428	7	8	7	1,32
I60 - I62	Hemorragia intracraneal	5.417	3	128	2	5	5	1,43
J03	Amigdalitis aguda	2.551	1	83	1	2	2	1,22
J40 - J42	Bronquitis NE y bronquitis crónica	1.380	1	13	0	1	1	1,13
L00 - L99	Enfermedades de la piel y del tejido subcutáneo	23.892	14	1.017	17	22	20	1,43
M05 - M14	Artritis reumatoide y otra poli artropatías inflamatorias	2.592	2	121	2	2	2	1,20
M41	Escoliosis	937	1	32	1	1	1	1,66
M80 - M94	Osteopatías y condropatías	4.626	3	204	4	3	3	1,01
O00 - O08	Abortos	30.860	18	1.703	29	20	18	1,01
Q35 - Q37	Labio leporino y fisura palatina	1.247	1	80	1	1	1	1,25

4.3.4.8.1.2.3 Atenciones de Urgencias

Las atenciones de urgencia en la comuna de Mejillones, presentan un patrón relativamente estacionario, promediando las 500 consultas semanales (Figura 4.3-108). Las causas más frecuentes de consulta son las enfermedades del sistema respiratorio, seguida por las diarreas (Figura 4.3-109).

Como ocurre en otras localidades del país, las enfermedades respiratorias presentan variaciones estacionales claras. Aumentando las consultas en el período invernal (Figura 4.3-110).

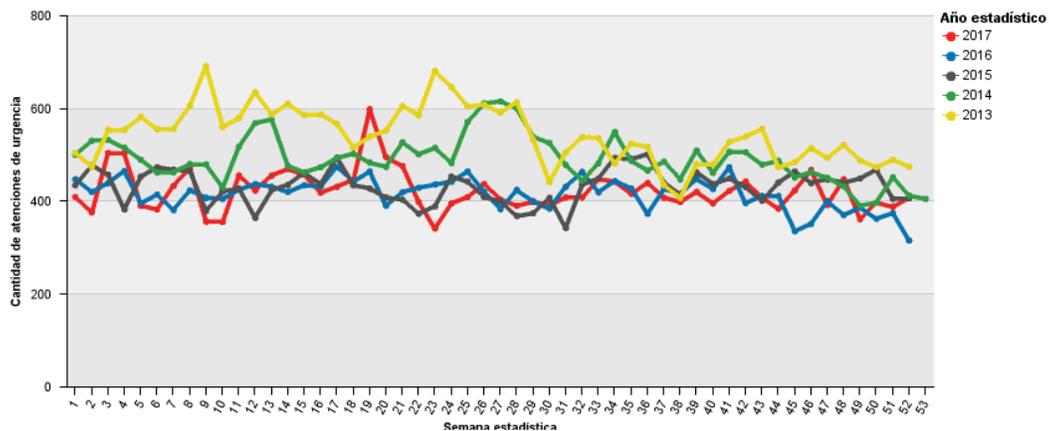


Figura 4.3-108 Total de Consultas de Urgencia Comuna Mejillones 2013-2017. Fuente: Minsal, registro de atenciones de urgencia, DEIS

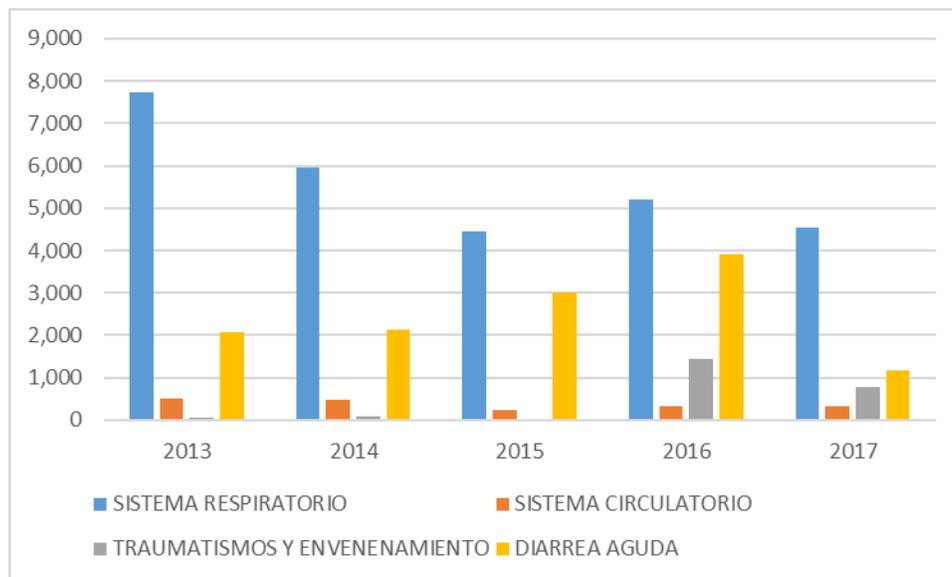


Figura 4.3-109 Causas principales de consultas de Urgencia, Mejillones 2013-2017. Fuente: Minsal, registro de atenciones de urgencia, DEIS

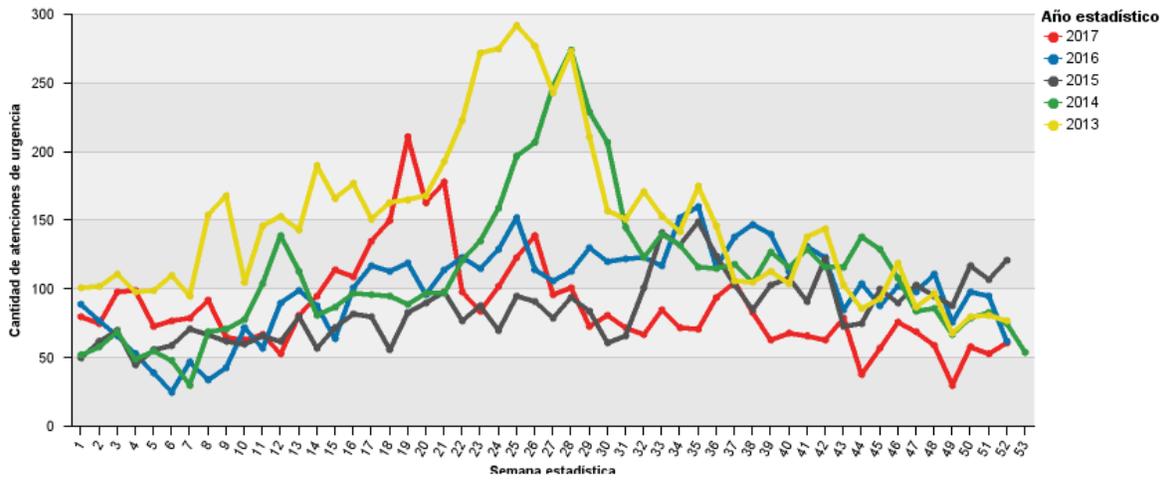


Figura 4.3-110 Consultas Respiratorias, Mejillones 2013-2017. Fuente: Minsal, registro de atenciones de urgencia, DEIS

4.3.4.8.1.2.4 Enfermedades de Notificación Obligatoria

Respecto de las Enfermedades de Notificación Obligatoria, durante los años 2008 a 2013 en Mejillones, se notificaron un total de 36 casos de enfermedades principalmente de transmisión sexual y algunas hepatitis virales.

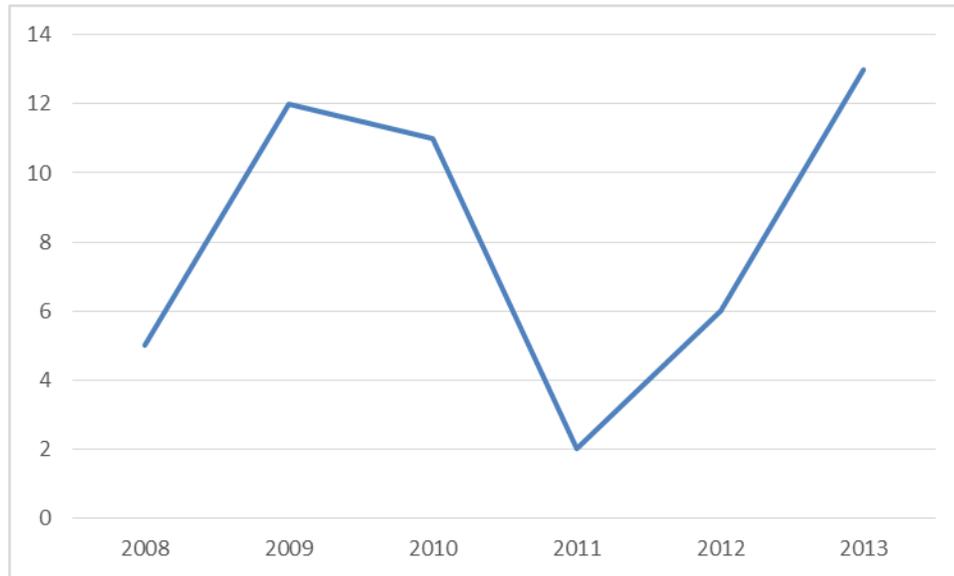


Figura 4.3-111 Evolución de la Enfermedades de Transmisión Sexual, Mejillones. Fuente: Elaboración propia a partir de registro ENO, DEIS

4.3.4.8.2 Encuesta de consumo

1. ID
2. Fecha Fecha / Hora de la Encuesta
3. Nombre y Apellido
4. Fecha de Nacimiento
5. Dirección
- 6 Tiempo de residencia en Mejillones (en años)
7. ¿Cuál es tu sexo?
 - Masculino
 - Femenino
8. Ha consumido pescado el último mes? ¿Cuáles?
 - Merluza
 - Reineta
 - Salmón
 - Pejerrey
 - Pejegallo
 - Congrio
 - Albacora
 - Corvina

Cojinova
Pescado de roca (vieja, rollizo, cabrilla, apañado, bilagay)
Jurel en conserva
Atún en conserva Sardinas en conserva

9 Respecto de la frecuencia del consumo de pescado

Todos los días almuerzo y cena
Todos los días solo almuerzo o cena
5 veces por semana
3 veces por semana 1 vez por semana
2 veces al mes
1 sola vez al mes

10. Respecto de la cantidad

Figura 1 (50 gramos)
Figura 2 (100-150 gramos)
Figura 3 (sobre 150 gramos)

11. ¿Ha consumido mariscos o algas el último mes? ¿cuáles?

Almejas
Choritos
machas
ostiones
pulpo
Jibia
Camarón
Puire
mariscos en conserva
Cochayuyo
Luche
Otro

12. Respecto de la frecuencia y cantidad del consumo de mariscos y algas

Todos los días almuerzo y cena
todos los días almuerzo o cena
5 veces por semana
3 veces por semana 1 vez por semana
2 veces al mes
1 sola vez al mes

13. Respecto de la cantidad

Figura 1 (50 gr.)
Figura 2 (100 gr a 150 gramos)
Figura 3 (mayor a 150 gramos)

14. ¿Con qué frecuencia Ud va a la playa? Todos los días

5 veces a la semana
3 veces a la semana
1 vez a la semana
sólo fin de semana en verano

15. ¿Con qué frecuencia van los niños de la casa a la playa?

Todos los días

- Sólo los días fines de semana
Sólo cuando están en vacaciones, todos los días
Sólo cuando están en vacaciones, los fines de semanas Rara vez van a la playa
18. ¿En la playa, Ud nada?
Si
No
Sólo me remojo los pies
19. Respecto de los niños, ¿en la playa ellos nadan?
Si
no
Sólo se remojan los pies y juegan al borde del mar

FICHAS PORTE RACION

Reineta Filete



Salmon Filete





4.3.5 Herramienta de respuesta temprana

La herramienta corresponde a un desarrollo realizado en el lenguaje Python (**GNU GPL**), que permite realizar simulaciones numéricas de corto plazo para la proyección futura de corrientes y condiciones hidrodinámicas en la bahía de forma automática (simulación numérica de pronóstico “*Forecast*”). La herramienta numérica se entrega de forma empaquetada y para su uso en el sistema operativo Linux, la cual fue probada para las versiones libres Mint y Ubuntu.

La simulación de la bahía de Mejillones es realizada en el modelo numérico AEM3D, para la semana del año en la cual se ejecuta la herramienta, permitiendo conocer el patrón de circulación y características hidrodinámicas, que permiten proyectar las condiciones de mezcla más probables y de forma distribuida en el espacio.

Para lo anterior, se considera realizar las simulaciones numéricas de Bahía Mejillones del Sur con forzantes meteorológicas futuras a nivel semanal (pronóstico meteorológico regional cercano a Bahía Mejillones del Sur) provenientes desde la fuente pública de pronóstico del NOAA, correspondiente a los resultados del modelo NCEP/GSF (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html>). La descarga de esta información y el procesamiento de ella es realizada de forma automática, mediante una subrutina desarrollada en Python. Junto con la meteorología, el modelo es alimentado con los pronósticos de marea del SHOA para el sector de Mejillones del Sur, para lo cual se desarrolló una subrutina automatizada de la descarga y procesamiento de la información disponible en el SHOA (<http://www.shoa.cl/php/mareas.php>).

Con la información de pronóstico de una semana futura, se realiza la simulación y proyección a nivel semanal de los parámetros y condiciones físicas de la bahía (p.ej. corrientes, temperatura, salinidad). De este modo, se cuenta con una aproximación de los patrones de circulación y tiempos de residencia en el espacio, información relevante ante algún evento de emergencia y/o alerta de contaminación en la bahía, que permite contar con una base de información de consulta para la toma de decisiones y la ejecución de medidas de acción y mitigación. Junto con la proyección de la hidrodinámica del sistema, y como parte de la modelación, se considera la inclusión de descargas puntuales de trazadores que permitan determinar los patrones de migración de agentes liberados a la costa. Los trazadores utilizados son conservativos y de boyancia nula, por lo que no existirá degradación y/o reacciones de ellos en el tiempo. Además, estos son liberados en ubicaciones asociadas a los principales puntos de descarga existente en la bahía que, a su vez, se encuentran bien distribuidos y permitirán evaluar eventos de descarga a lo largo de gran parte del borde costero.

Junto con la simulación de pronóstico de la semana futura, se generan las condiciones de inicio de la modelación de la semana siguiente, basadas en la condición final del escenario proyectado. Lo anterior, permite contar con un sistema automatizado para la proyección de corrientes, de otros parámetros físicos y de la dinámica de agentes externos posibles de ser vertidos en bahía Mejillones del Sur.

En la Figura 4.112 se muestra del diagrama de implementado en la herramienta de pronóstico, el cual cuenta con un desarrollo cíclico, en donde, con una simulación base (desde el modelo calibrado y validado) e información de pronósticos tanto meteorológica como de las mareas, se construye un modelo de simulación de aproximadamente una semana adelante. Este modelo es construido mediante la ejecución de diferentes

módulos desarrollados como parte de la herramienta, los cuales se encargan de procesar los inputs y los resultados de la simulación anterior, configurar los archivos de AEM3D para la nueva simulación y ejecutar el programa. Tras la finalización de la simulación, la herramienta realiza el procesamiento de los resultados, la entrega de productos para análisis y la preparación de los archivos para una nueva simulación.

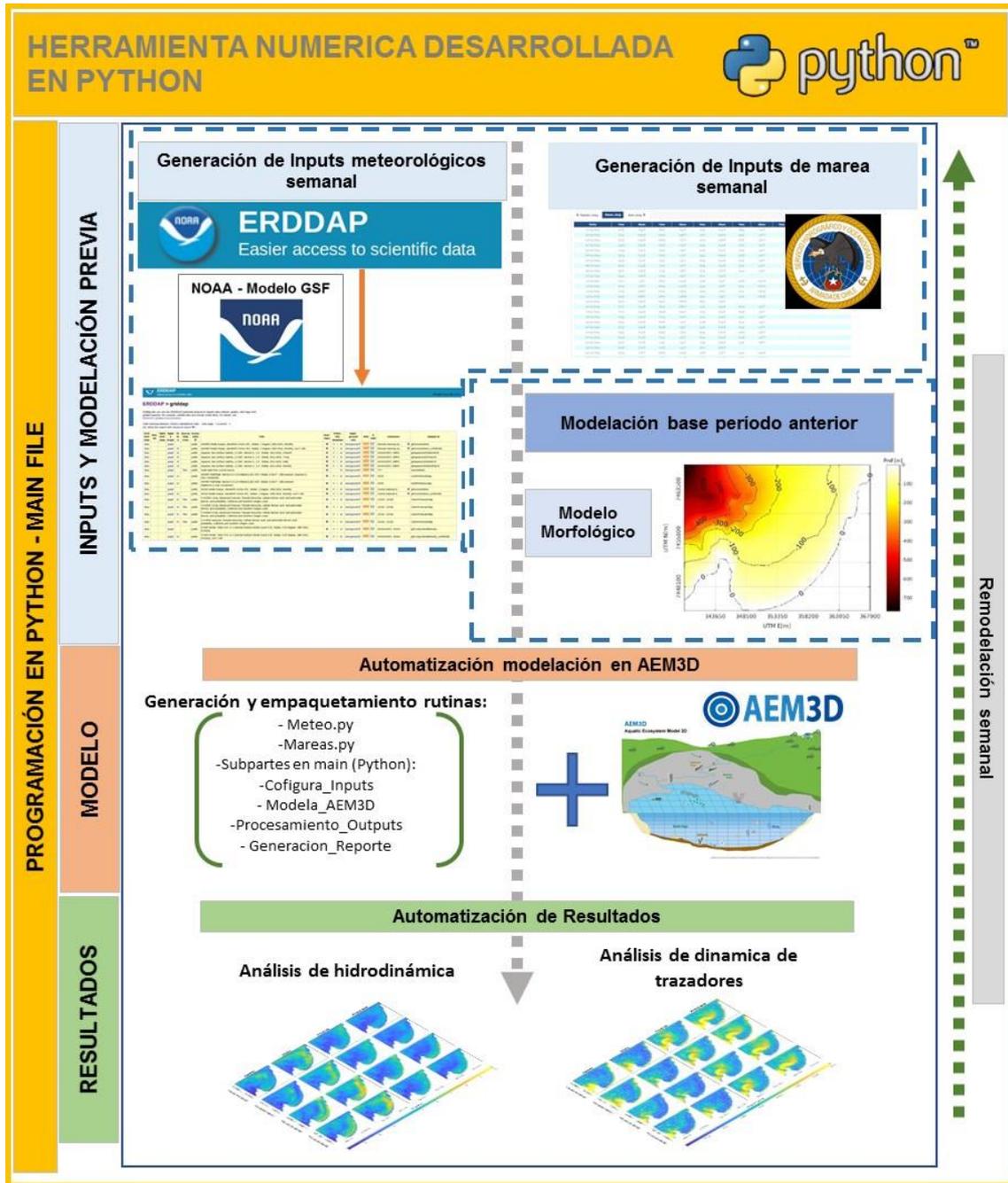


Figura 4.112 Herramienta para respuesta temprana mediante simulaciones numéricas semanales.

En cuanto a los resultados y el documento entregado como resultados, a continuación, se entrega la descripción de ellos.

4.3.5.1 Descripción del documento de resultados

El documento contiene los siguientes resultados:

1. Datos meteorológicos y pronóstico de marea utilizado como input

Se incluyen tablas con los datos de meteorología y de pronóstico de marea que fueron procesados e ingresado al modelo para la simulación.

2. Mapa de corrientes (intensidad y dirección)

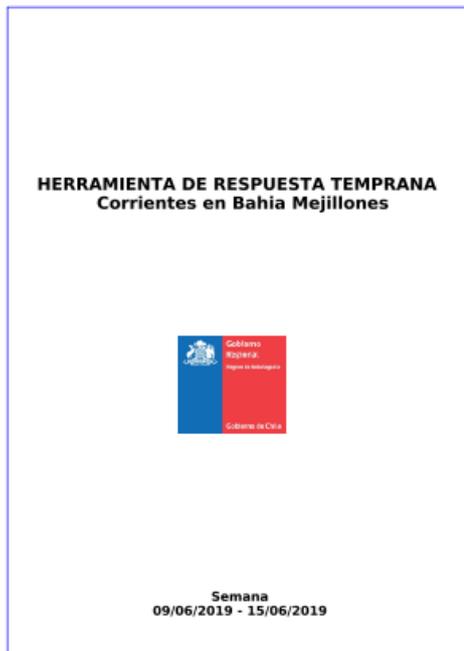
Se incluyen diagramas cada 3 horas, durante los 7 días de la semana correspondiente, con la magnitud de la velocidad en escala de colores y una matriz de vectores que indican la dirección de la corriente instantánea, en las siguientes capas:

- a) Capa superficial (primer metro)
- b) Capa a 2.5 metros de profundidad
- c) Capa a 5 metros de profundidad
- d) Capas promediadas en la vertical ("Average")

3. Mapas de concentración de 10 trazadores particulares (conservativos y de boyancia nula), los cuales están asociados a los principales puntos de descarga existente en la bahía que, a su vez, se encuentran bien distribuidos y permitirán evaluar eventos de descarga a lo largo de gran parte del borde costero. Las consideraciones asociadas al análisis de los trazadores son las siguientes:

- a) Existen 10 trazadores particulares, cada uno de ellos asociados a una zona o sector de liberación.
- b) La concentración de todos los trazadores liberados es unitaria durante toda la modelación, pudiendo variar los caudales de descarga entre los distintos puntos.

A continuación, se muestran parte de los contenidos del documento de salida de la herramienta numérica a modo de ejemplo.



INTRODUCCION Y PROPOSITO

El presente documento entrega los resultados gráficos obtenidos de la simulación de la hidrodinámica y transporte de elementos, pronosticados para los 7 días siguientes desde el día de ejecución de la herramienta.

La herramienta utilizada corresponde al desarrollo realizado por el Centro de Ecología Aplicada Ltda. (CoEa_SA_SL_CG) como parte del ESTUDIO FNDP Código BIP 30126368 - Diagnóstico y Monitoreo Ambiental de la bahía Mejillones del Sur, y que se enmarca en el desarrollo de una herramienta de alerta temprana que permita contar con información sobre la condición futura de la bahía ante posibles eventos puntuales de liberación de agentes a la costa.

Así, el propósito de la herramienta es poder entregar información futura de las condiciones hidrodinámica al interior de la bahía, y sobre la dinámica que tendrá cualquier agente que sea liberado a la bahía por medio de un fáta en los procesos que habitualmente se desarrollan al interior de ella. Esta información se hace relevante ante eventos futuros de vertimiento, entregando información para la toma de decisiones, y para la definición y planificación de las acciones de respuesta.

DESCRIPCION DEL DOCUMENTO

El documento contiene los siguientes resultados:

1. Mapa de corrientes (intensidad y dirección) en las siguientes capas:
 - a) Capa superficial (primer metro)
 - b) Capa a 2.5 metros de profundidad
 - c) Capa a 5 metros de profundidad
 - d) Capas promediadas en la vertical (average)

2. Mapas de concentración de 10 trazadores particulares (conservativos y de biogeoquímica), los cuales están asociados a los diferentes puntos de descarga existentes en la bahía. Los puntos de liberación de los trazadores se muestran como parte del documento. Las consideraciones asociadas al análisis de los trazadores son las siguientes:

- a) Existen 10 trazadores particulares, cada uno de ellos asociados a una zona o sector de liberación.
- b) La concentración de todos los trazadores liberados es unitaria durante toda la modelación, pudiendo variar los caudales de descarga entre los distintos puntos.

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Los resultados de la hidrodinámica en el tiempo permitirán conocer las condiciones de esperadas para el transporte de los elementos vertidos, y con ello generar escenarios de acción en el tiempo para el control del evento.

Los resultados de concentración en la bahía permitirán identificar posibles zonas de concentración (temporal o permanente) de cada trazador, permitiendo establecer los sectores y metodologías más propicias para el control y remoción de los agentes. Cabe señalar que el modelo no considera los procesos de deposición de fondo adsorción u otros, que pudieran generarse por la naturaleza del agente, por lo que junto con la información acá entregada será necesaria la interpretación del proceso de evolución y cambio del agente por parte de especialistas en la materia.

NOTA: Debido al uso de una codificación UTF-8 en la programación de la herramienta numérica, se omiten todos los dígitos en los textos generados en el procesamiento de los outputs.

Figura 4.113 Portada de reporte de simulación y muestra del texto explicativo del documento.

Tabla de Mareas SHOA, Mejillones del Sur, Mayo del 2019

Fecha	Hora	Albura	Hora	Albura	Hora	Albura	Hora	Albura	Hora	Albura	Hora	Albura
01/05/2019	01:29	0.42 B	07:51	1.19 F	13:43	0.57 B	19:37	1.26 F				
02/05/2019	01:59	0.39 B	08:20	1.27 F	14:23	0.52 B	20:16	1.25 F				
03/05/2019	02:28	0.37 B	08:49	1.34 F	15:03	0.48 B	20:53	1.24 F				
04/05/2019	02:58	0.36 B	09:19	1.41 F	15:42	0.43 B	21:29	1.21 F				
05/05/2019	03:24	0.35 B	09:51	1.46 F	16:21	0.43 B	22:05	1.17 F				
06/05/2019	03:54	0.36 B	10:26	1.50 F	17:04	0.42 B	22:43	1.12 F				
07/05/2019	04:26	0.38 B	11:04	1.52 F	17:52	0.43 B	23:26	1.06 F				
08/05/2019	05:02	0.42 B	11:46	1.51 F	18:45	0.45 B						
09/05/2019	05:58	1.00 F	03:43	0.48 B	12:37	1.48 F	19:44	0.46 B				
10/05/2019	01:18	0.95 F	04:32	0.55 B	13:33	1.43 F	20:40	0.47 B				
11/05/2019	02:34	0.93 F	07:39	0.61 B	14:38	1.39 F	21:56	0.46 B				
12/05/2019	03:53	0.96 F	09:04	0.65 B	15:47	1.37 F	23:00	0.45 B				
13/05/2019	05:05	1.03 F	10:27	0.63 B	16:53	1.36 F	23:54	0.38 B				
14/05/2019	06:05	1.13 F	11:40	0.59 B	17:52	1.35 F						
15/05/2019	06:40	0.34 B	06:54	1.25 F	12:43	0.53 B	18:47	1.34 F				
16/05/2019	01:21	0.30 B	07:09	1.31 F	13:41	0.46 B	19:30	1.31 F				
17/05/2019	01:59	0.28 B	08:21	1.41 F	14:35	0.41 B	20:20	1.27 F				
18/05/2019	02:38	0.28 B	09:03	1.55 F	15:26	0.38 B	21:17	1.21 F				
19/05/2019	03:16	0.30 B	09:45	1.59 F	16:17	0.36 B	22:04	1.15 F				
20/05/2019	03:55	0.35 B	10:28	1.60 F	17:08	0.37 B	22:51	1.08 F				
21/05/2019	04:34	0.41 B	11:12	1.57 F	17:58	0.40 B	23:39	1.02 F				
22/05/2019	05:14	0.48 B	11:57	1.51 F	18:48	0.43 B						
23/05/2019	05:30	0.97 F	05:55	0.55 B	12:43	1.44 F	19:30	0.47 B				
24/05/2019	01:27	0.93 F	06:40	0.62 B	13:31	1.38 F	20:30	0.50 B				
25/05/2019	02:31	0.92 F	07:27	0.66 B	14:23	1.31 F	21:25	0.52 B				
26/05/2019	03:41	0.93 F	08:50	0.73 B	15:18	1.26 F	22:21	0.52 B				
27/05/2019	04:49	0.97 F	10:08	0.74 B	16:14	1.22 F	23:12	0.50 B				
28/05/2019	05:47	1.04 F	11:17	0.72 B	17:08	1.20 F	23:55	0.49 B				
29/05/2019	06:31	1.12 F	12:17	0.68 B	17:59	1.18 F						
30/05/2019	00:22	0.45 B	07:07	1.21 F	12:09	0.63 B	18:47	1.16 F				
31/05/2019	01:05	0.42 B	07:40	1.30 F	12:55	0.57 B	19:21	1.14 F				

Fuente: https://www.shoa.cl/ghg/mareas.php?local=mejillones_sur

Figura 4.114 Tablas de mareas utilizada como inputs en la simulación.

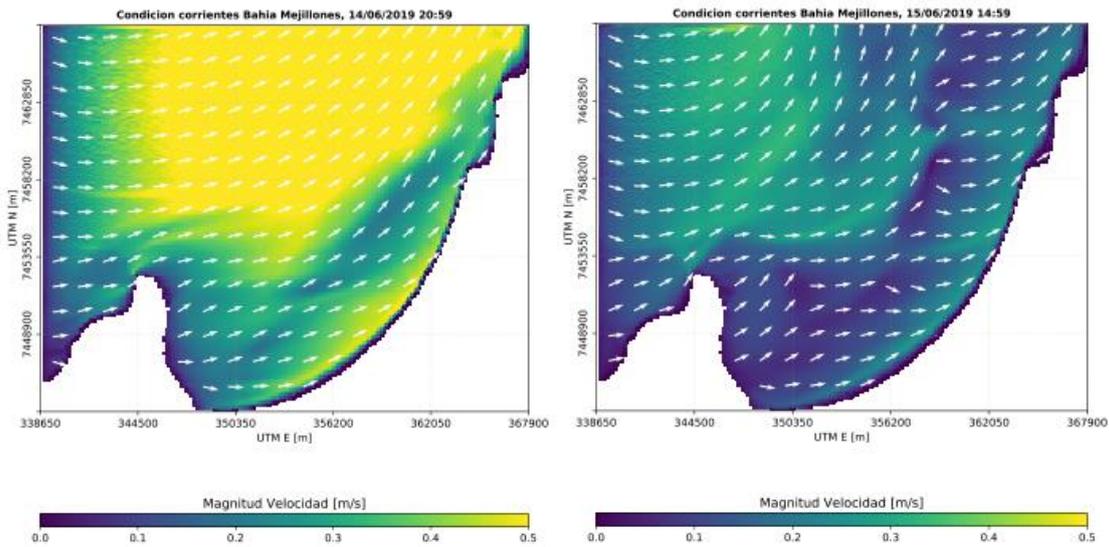


Figura 4.115 Ejemplo de gráficos de magnitud y dirección de velocidad (corrientes) entregado como resultado en el documento.

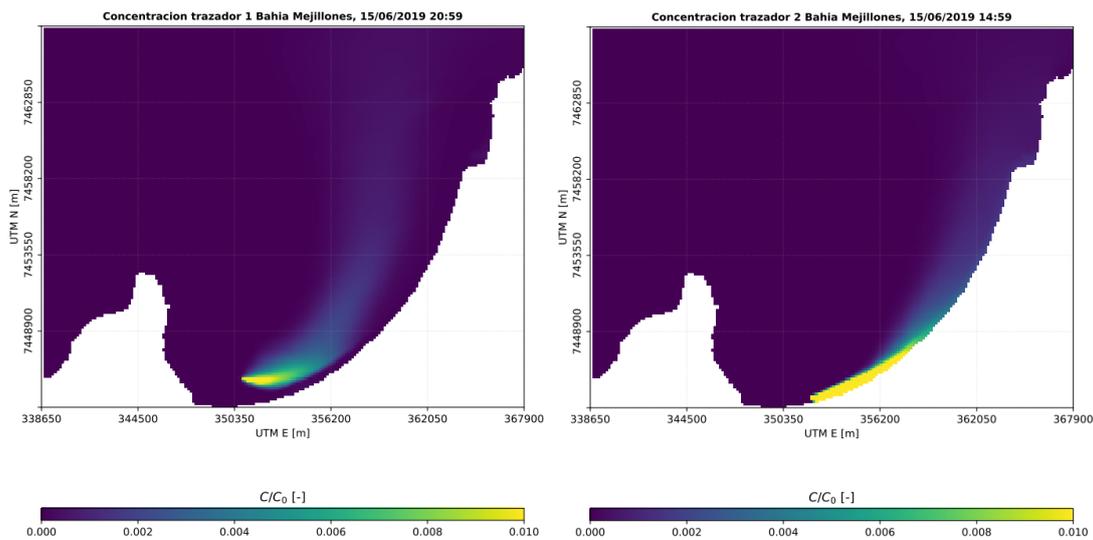


Figura 4.116 Ejemplo de gráficos de dinámica de trazadores entregado como resultado en el documento.

4.3.5.2 Interpretación de resultados

Los resultados de la hidrodinámica en el tiempo permitirán conocer las condiciones de esperadas para el transporte de los elementos vertidos, y con ello generar escenarios de acción en el tiempo para el control del evento. Cabe señalar que en los resultados obtenidos para la capa más superficial (primer metro), el modelo numérico podría contar con celdas que presenta indefiniciones en el cálculo, ya sea por encontrarse

mayormente secas y/o por errores asociados al cálculo de las mayores velocidades de estas celdas. Estas celdas podrán ser identificadas como celdas en blanco en el mapa resultante, y como podrá observarse, están asociadas principalmente a frente de desplazamiento de mayor velocidad.

Los resultados de concentración en la bahía permitirán identificar posibles zonas de concentración (temporal o permanente) de cada trazador, permitiendo establecer los sectores y metodologías más propicias para el control y remoción de los agentes. Cabe señalar que el modelo no considera los procesos de depositación de fondo adsorción u otros, que pudieran generarse por la naturaleza del agente, por lo que junto con la información acá entregada será necesaria la interpretación del proceso de evolución y cambio del agente por parte de especialista en la materia.

4.3.6 Discusión y conclusiones

4.3.6.1 Evaluación de riesgo ecológico

El enfoque propuesto para desarrollar este estudio, donde por una parte se pide evaluar el riesgo ecológico en la Bahía de Mejillones del Sur, pero al mismo tiempo, el mandante solicita incorporar los potenciales efectos en salud humana, plantean un desafío enorme de integración multidisciplinaria.

Se ha hecho un esfuerzo por integrar los resultados de las distintas disciplinas, obtenidas con diferentes técnicas y metodologías de análisis como es la Evaluación de Riesgo Ecológico, herramienta que tiene limitaciones, propias de la complejidad de los ecosistemas y de los sistemas ambientales.

Se debe tener presente, que la integración es una tarea compleja, que requiere análisis y reflexiones cuidadosas, donde las decisiones de cómo llevar a cabo el trabajo fueron compartidas con las autoridades técnicas del Gobierno Regional de Antofagasta y de la SEREMI de Medio Ambiente de dicha región, y una vez acordadas, se llevaron a cabo. Así, el estudio adquirió un enfoque más amplio y general, que permitió explorar la complejidad de las vías por donde un elemento (como un metal) puede pasar a través de los componentes bióticos de los ecosistemas. Por otra parte, es necesario recordar que las demandas que la autoridad intenta resolver con este estudio son de gran complejidad, y es en ese contexto que deben ser considerados los resultados.

Los aspectos fundamentales del análisis se refieren a la importancia que puede alcanzar el ingreso de materiales potencialmente contaminantes, por materiales que ingresan a los ecosistemas a partir de las actividades humanas que se realizan en Mejillones como una totalidad y como la organización natural de los ecosistemas determinan sus flujos.

Los resultados asociados a la cuantificación de emisiones dan cuenta de la existencia de un ingreso constante en términos máxicos de ciertos metales que podrían considerarse como potencialmente contaminantes. Por otro lado, las concentraciones son lo suficientemente bajas para no generar un efecto inmediato en términos toxicológicos, pero no sus cargas máxicas, que en definitiva se traducen en una acumulación de elementos precipitados o adsorbidos en el detritus o materia orgánica, tanto en suspensión como en los sedimentos, esto último tiene especial importancia en Bahía de Mejillones del Sur, donde se sabe que el fondo marino presenta acumulación

de materia orgánica debido a la alta productividad primaria en el sector, que es en parte causada por los eventos de surgencia que tienen una alta frecuencia, hecho que favorece la producción primaria especialmente del fitoplancton.

El ingreso de contaminantes a los ecosistemas, dado la forma de aplicación del ERE, se orientó a información que se obtiene desde los organismos (especies), y en la elaboración de un modelo de malla trófica basada en grupos funcionales, fundamentado en el conocimiento existente de las relaciones de alimentación de las especies. La malla permite describir las relaciones de alimentación que se conforman en los ecosistemas y así establecer las vías por donde un material potencialmente contaminante (por ejemplo, un metal) llega hasta los organismos que están en la parte superior de la malla, es decir los depredadores incluyendo al hombre.

Los estudios de riesgo ecológico cuando incorporan la malla trófica permiten una mejor comprensión de la complejidad de los procesos de ingreso de materiales potencialmente tóxicos como los metales en los ecosistemas.

La malla trófica elaborada, y los análisis de las concentraciones de metales en distintos organismos, de los diferentes grupos funcionales, muestra las principales vías por donde puede fluir un elemento potencialmente tóxico en los ecosistemas y llegar potencialmente a afectar la población humana.

Los factores de bioacumulación calculados sugieren que el proceso ocurre en diferente grado para los distintos organismos y metales. En general, los organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales Arsénico, Cadmio y Cobre, Los organismos pelágicos (peces) presentan los mayores factores de bioacumulación para el metal Mercurio, Tanto organismos pelágicos, como organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales Hierro y Zinc. Así también, dado las relaciones de alimentación de los organismos y su posición en la malla trófica, se puede inferir procesos de biomagnificación, que requieren ser analizados con mayor detalle.

En la bahía de Mejillones del Sur, los valores encontrados en algunos de los componentes de los grupos funcionales como son *carnívoros bentónicos* (pulpo y loco), presentan valores altos de As en sus tejidos. Para el Cu los carnívoros bentónicos presentan también los niveles más altos en la malla trófica. En contraste, organismos del grupo funcional Peces carnívoros, presentan niveles inferiores de Cu en sus tejidos. Los *herbívoros bentónicos* por su parte presentan niveles menores que los carnívoros bentónicos, pero a su vez mayores que las macroalgas. Los valores de concentración específicos de los metales deben ser observados con cautela, porque provienen, en algunos casos, de una única medida sobre esos organismos y en otros (los más relevantes desde la perspectiva del consumo o su capacidad de bioacumular) de tres muestras independientes. No obstante, el orden de los valores está de acuerdo con el conocimiento científico acerca de los niveles de metales en organismos marinos, donde las especies carnívoras presentan los niveles de contaminantes más altos, y también donde los organismos bentónicos presentan en general niveles relativos mayores.

Las descargas de detritus o materia orgánica son parte de la actividad propia de Mejillones y de acuerdo con los resultados son másicamente importantes. Más allá de las responsabilidades asociadas a la generación de estas descargas, es importante enfatizar que el análisis de datos revela que hay un gran aporte de detritus por parte de

las plantas de enfriamiento de las generadoras termoeléctricas que utilizan agua de mar para enfriar. Se sabe que el área 3, se asocia al emisario de la industria sanitaria (ver Figura 4.3-1), por lo que es de esperar que exista una descarga de materia orgánica producto de las aguas servidas del sector urbano. Sin embargo, a nivel comparativo, las cargas másicas de materia orgánica son muy inferiores respecto a la descarga de la industria energética, por lo cual se debería poner especial atención a este punto.

La razón de este aporte se muestra en la Figura 4.3-117, los ecosistemas de la Bahía de Mejillones presentan una alta productividad, dada por condiciones que ocurren en la bahía. Por otra parte, las plantas de enfriamiento tienen aducciones que transportan agua con organismos pequeños, propios de la columna de agua, fundamentalmente fitoplancton y zooplancton, que son la base de la producción de biomasa de los ecosistemas marinos pelágicos y la base de las mallas tróficas. También se encuentran partículas de materia orgánica muerta que constituyen parte del detritus. En el proceso de intercambio de calor de las plantas de enfriamiento, estos organismos mueren al subir la temperatura y generan detritus, material que posteriormente es descompuesto por microorganismos o bacterias.

Así, las plantas de enfriamiento están incorporando grandes flujos de materia orgánica degradable o detritus en la columna de agua en forma superficial, en los ecosistemas marinos del borde o litoral. Este material es distribuido espacialmente de acuerdo con los patrones de circulación de diferente escala temporal que ocurren en la bahía.

Este proceso, desarrollado en forma continua, provoca alteraciones de los procesos ecosistémicos y afecta la sobrevivencia de diferentes tipos de organismos, vía una reducción de los niveles de oxígeno en la columna de agua en las áreas de descargas o en los sedimentos en la vecindad de los puntos de descargas de la termoeléctricas, o toxicidad aguda o crónica por metales, abundantes en el sedimento, que interactúan químicamente con la materia orgánica y, bajo algunas condiciones, aumentando su biodisponibilidad.

Simultáneamente, las áreas de menor circulación de la bahía reciben también en su vecindad descargas de materia orgánica propias de plantas sanitarias, disminuyendo los niveles de oxígeno y con pH inferiores a los que regularmente ocurren en el mar, favoreciendo los procesos de descomposición anaeróbica de la materia orgánica que se encuentra en el sedimento.

En el muestreo de sedimentos se observó en esos sectores que el sedimento presentaba fuertes emanaciones de malos olores, probablemente H_2S , producto de la descomposición anaeróbica del detritus depositado en el fondo marino, especialmente en la cercanía de las descargas del emisario de la sanitaria.

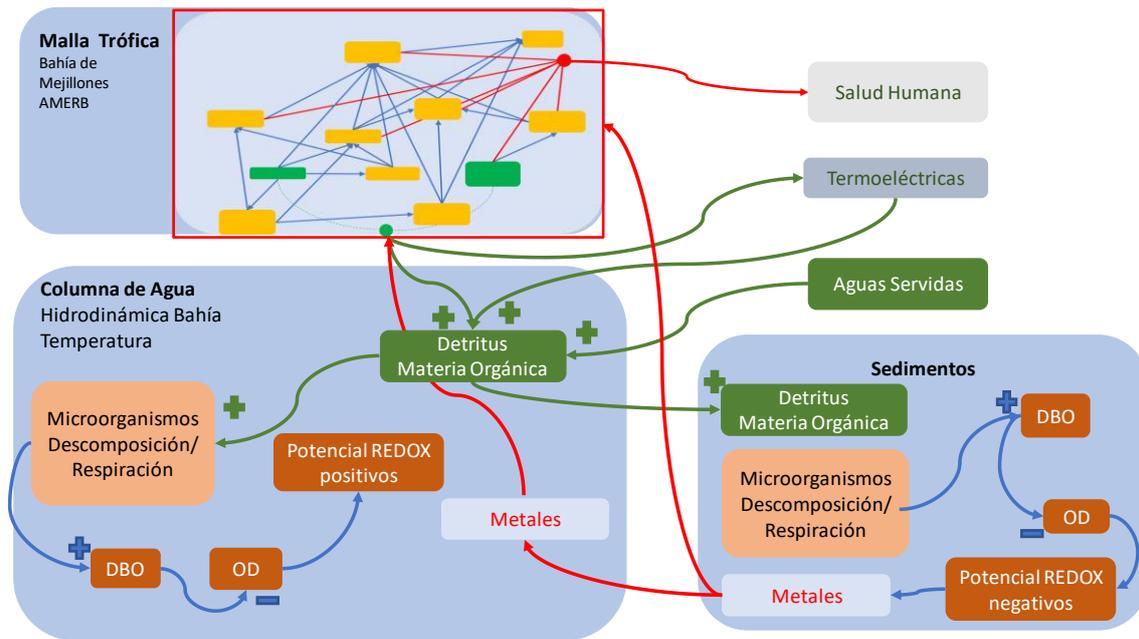


Figura 4.3-117 Modelo de interacciones ecosistémicas en función de flujos de detritus y metales como materiales relevantes. DBO = demanda bioquímica de oxígeno; OD = oxígeno disuelto.

La bahía de Mejillones del Sur es un área donde los ecosistemas pelágicos representan la mayor parte de la superficie y por lo tanto de la productividad de los ecosistemas. De esta forma la producción primaria del fitoplancton es más relevante en la producción de material orgánico que sedimenta, que la producción de los ecosistemas intermareales y submareales. Dado la existencia de la surgencia Punta Angamos, y su influencia en la bahía de Mejillones, la mayor parte del fondo está sometido frecuentemente a la zona mínima de oxígeno (ZMO).

Los microorganismos son los principales responsables de la descomposición del detritus o materia orgánica muerta. Es un componente biótico fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas y muy significativo en ecosistemas marinos. Cuando existen descargas de materia orgánica o detritus al medio marino, el proceso de descomposición genera una reducción importante del OD en la columna de agua, y si la masa de agua presenta niveles bajos de OD, se produce una descomposición anaeróbica. Agotado el OD del agua, aumenta el potencial redox negativo. En el caso de los metales, se producen fenómenos de especiación química, y así cambia la solubilidad de los metales. El sedimento, cuando decanta el detritus, es un sumidero de materia orgánica y/o metales absorbidos a ella. Cuando ocurren condiciones de pH reducidos y potencial redox negativo, el sedimento puede pasar a ser fuente de metales, que quedan disponibles para los organismos y así ingresar a la malla trófica.

Habitualmente cuando se habla de la ZMO (zona mínima de oxígeno) se refiere a las necesidades de oxígeno disuelto para organismos multicelulares que realizan respiración celular aeróbica. No incluye a los microorganismos que pueden desarrollar respiración en condiciones anaeróbicas para obtener los materiales y energía para su actividad metabólica. En condiciones de bajos niveles de OD o ausencia de este, los microorganismos anaeróbicos realizan la degradación de la materia orgánica muerta,

proceso que es menos eficiente y produce materiales intermedios diferentes. La ZMO es muy importante, para la distribución vertical de la mayoría de los organismos marinos, en ecosistemas litorales y en especial en la Bahía Mejillones del Sur, donde existe evidencia del efecto de la surgencia en la profundidad de esta zona en la columna de agua. Es conveniente recordar que el flujo de materiales, desde un componente a otro en los ecosistemas, puede estar mediado por cambios, físicos, químicos y biológicos (como la alimentación) y de ahí la complejidad de las interacciones en dichos sistemas.

Se puede afirmar que la complejidad del sistema ambiental está dada por la naturaleza del funcionamiento ecológico natural de la bahía acoplado a las características de las actividades humanas que se desarrollan. El modelo elaborado a partir de los principales hallazgos enfatiza la importancia de la materia orgánica muerta, detritus en el funcionamiento de los ecosistemas y su potencial relación con los niveles de los metales en los organismos. Muestra la relevancia de los sedimentos de la bahía en los procesos ecológicos y su relación con los procesos sanitarios y de producción de energía en interacción con los procesos oceanográficos como las corrientes y las surgencias.

La identificación de residuos potencialmente contaminantes, como también las vías de exposición, dan luces de que el potencial riesgo radica principalmente en el lecho marino y las porciones de agua cercanas a este, Por un lado se sabe que agentes a nivel histórico se estarían acumulando en el sedimento, no así en la columna de agua donde las condiciones de calidad físico-química de las aguas no permiten que existan elementos tóxicos, lo cual concuerda con concentraciones bajas de metales y metaloides, Sin embargo, en Bahía de Mejillones existe un proceso que no guarda relación con toxicidad, sino más bien con la ausencia de un cierto elemento, el oxígeno disuelto. Desde el punto de vista de riesgo ecológico correspondería a una alteración ecosistémica por una excesiva demanda de este elemento esencial para los organismos, donde se sabe que de forma natural Mejillones se ve alterada estacionalmente por los procesos de surgencia costera, las cuales traen porciones de agua con baja o nula cantidad de oxígeno disuelto, siendo perjudicial para organismos sensibles, Es por lo anterior, que se ha hecho un enfoque también en los procesos que ocurren respecto al oxígeno disuelto, en contraste con estudios anteriores donde se había determinado que las zonas mínimas de oxígeno no superan los 25 m de profundidad, sin embargo, el presente estudio da luces de que las zonas mínimas de oxígeno estarían llegando de forma permanente hasta los 15 m de profundidad, lo cual limita el área donde los organismos pueden subsistir.

Los resultados asociados a la cuantificación de emisiones dan cuenta de la existencia de un ingreso constante en términos máxicos de ciertos metales que podrían considerarse como potencialmente contaminantes, Por otro lado, las concentraciones son lo suficientemente bajas para no generar un efecto inmediato en términos toxicológicos, pero no sus cargas máxicas, que en definitiva se traducen en una acumulación de elementos precipitados o adsorbidos en el detritus o materia orgánica, tanto en suspensión como en el lecho marino, esto último tiene especial importancia en Bahía de Mejillones del Sur, donde se sabe que el lecho presenta ciertos niveles de materia orgánica debido a la alta productividad primaria en el sector, debido a su vez por los eventos de surgencia que fuerzan el sistema.

Se sabe que el área 3 se asocia al emisario de la industria sanitaria, por lo que es de esperar que exista una descarga de materia orgánica producto de las descargas del sector urbano, Sin embargo a nivel comparativo, la cargas máxicas de materia orgánica

son muy inferiores respecto a la descargas de la industria energética, por lo cual se debería poner especial atención, dado que esta industria no genera este tipo de residuo en sus procesos, por lo que se deduce que su origen proviene más bien de sus puntos de captación.

Es importante recordar que el DBO_5 no es directamente una carga másica, ya que corresponde más bien a la demanda bioquímica de oxígeno y no a un agente propiamente tal, sin embargo resulta de utilidad cuantificarlo a nivel másico para tener una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica bioquímicamente degradable, Por otro lado, se sabe que este parámetro se encuentra directamente asociado a una disminución en el oxígeno disuelto de la columna de agua, generando cambios a nivel ecosistémico traducidos en una mayor demanda de oxígeno y al mismo tiempo genera un sumidero para agentes que puedan adsorberse, ya que la materia orgánica corresponde a material fangoso, con una mayor capacidad para retener elementos metálicos precipitados por ejemplo.

Con respecto a los agentes metaloides y metales, se desconoce cuál es la real acumulación en el detritus (materia orgánica disuelta en el agua), sin embargo con los resultados encontrados de la información histórica, sí existe una presencia significativa de algunos elementos, como el arsénico, cadmio, zinc y cobre en el sedimento, no así en la columna de agua, por lo cual es posible inferir que los ingresos de carga másica respecto a estas sustancias se acumulen en el lecho marino, en el largo plazo.

Resulta importante señalar que no existe información de las concentraciones de metaloides y metales de las descargas del emisario de la planta de tratamiento de las aguas servidas de Mejillones, lo cual no permite dilucidar si tales descargas estuviesen o no aportando cantidades de agentes potencialmente contaminantes.

En general, los organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales arsénico, cadmio y cobre, Los organismos pelágicos (peces) presentan los mayores factores de bioacumulación para zinc, y eventualmente mercurio, Tanto organismos pelágicos, como organismos bentónicos presentan los mayores factores de bioacumulación para los metales hierro y zinc.

La evaluación de riesgo ecológico determinó la existencia de un riesgo alto a los ecosistemas, por cuanto se determinaron probabilidades de riesgo en algunos casos sobre el 90%, lo cual indica que existe una alta probabilidad de afectación de ciertas especies sensibles, producto de las concentraciones actuales de ciertos elementos. Los elementos que presentaron las mayores probabilidades de ocurrencia de riesgo fueron el cadmio y cobre en el sedimento (con valores sobre el 90%). Le siguen el cromo y mercurio con probabilidades por sobre el 65%. En el caso del agua, el cobre presentaría el mayor nivel de riesgo (57,6% de probabilidad), le siguen el zinc y cadmio con niveles sobre el 40% de probabilidad de ocurrencia de riesgo.

Se determinaron los niveles de protección ambiental para la bahía de Mejillones del Sur. Estos niveles límites permitirían proteger al 95% de las especies, según la metodología utilizada. De esta forma, se podrían dar los primeros lineamientos para establecer límites normativos para una futura norma secundaria, tomando en consideración estos valores.

Lo anterior indica que el riesgo ecológico asociado a la excedencia de algunos de los metales presente en los sedimentos de la bahía de Mejillones es alto, donde un 57% de

los elementos considerados de importancia ambiental, superaron el valor considerado seguro para proteger el 95% de las especies. Lo anterior, resulta en efectos de inhibición de los procesos biológicos y/o letalidad en diversas especies marinas, además de la bioacumulación de metales en los tejidos de especies de importancia ecológica y comercial.

A partir de lo anterior, es posible indicar que la bahía de Mejillones del Sur, dadas las condiciones ambientales que presenta, tanto por razones naturales como de origen antrópico, presenta un riesgo alto de alteración de los procesos ecosistémicos que sustentan los ecosistemas presentes, principalmente los que se organizan en torno a los sedimentos.

4.3.6.2 Evaluación de riesgo a la salud humana

La bahía de Mejillones tiene una población que ha ido incrementando paulatinamente su magnitud, con un aumento mayor al 50% de su población del año 2002 al año 2017. Este incremento poblacional en paralelo al auge industrial de la zona ha provocado un aumento de la presión sobre los recursos naturales, particularmente los de la bahía de Mejillones del Sur.

Este estudio tuvo por finalidad dar respuesta a la inquietud de las autoridades, respecto de un posible impacto sobre la salud de la población frente a la exposición a contaminantes presentes en el agua y los alimentos (peces, crustáceos, mariscos, etc.) producidos por la bahía.

Para responder esta pregunta se llevó a cabo un diagnóstico de situación de salud de la población y una estimación del riesgo frente a la exposición de sus habitantes.

Se estimaron las dosis totales de ingesta de metales presentes en el agua y alimentos de la bahía de Mejillones, por medio de la estimación de ingesta a través de escenarios de exposición dado por contacto durante los meses de verano en actividad de juego en el borde del mar y el consumo diario de pescados, mariscos y crustáceos provenientes de la misma bahía.

La población de Mejillones presenta algunas particularidades en su salud. Al igual que otras comunas de la Región de Antofagasta, se caracteriza por presentar tasas elevadas, en comparación al resto del país, de tumores. Además, presenta elevadas tasas de problemas respiratorios, digestivos, cardiovasculares y patologías de la piel.

Se estimó el riesgo proveniente de la presencia de metales en la columna de agua de mar y en algunos alimentos hidrobiológicos extraídos en la bahía. Los resultados mostraron que existe riesgo por presencia de arsénico para el escenario de exposición de adultos.

Estos resultados pueden estar sobre estimados pues se utilizó el supuesto que toda la concentración medida es absorbida por el organismo humano, lo que puede sobre estimar las dosis de exposición. Sin embargo, se mantuvo este análisis, pues por lo que respecta al arsénico, se podría establecer que existen también otras fuentes de exposición, que no fueron integradas al análisis como son la ingesta a partir de agua de consumo humano, ingesta por medio del suelo y/o el polvo sedimentable e ingesta vía aérea. Dichas vías se encuentran fuera del alcance del estudio, y al no existir datos

locales fácilmente trazables, no se pudieron incorporar al análisis. Por lo anterior puede ser que la real exposición de la población a estos metales sea la calculada o mayor.

Estos resultados permiten plantear que la salud ambiental de la población que habita en la comuna de Mejillones se encuentra impactada por el entorno ambiental, y en particular por la bahía. Por lo mismo todo esfuerzo en disminuir el impacto y la presencia de metales en el entorno, produciría beneficios preventivos en la salud de la población.

Para prevenir y conocer con mayor detalle la situación de salud de la población se sugiere a lo menos realizar las siguientes acciones:

- Completar una evaluación de riesgo integral, de modo de identificar la otra vía no estudiada. Es decir, conocer el impacto de la calidad del agua potable, suelo, polvo sedimentable, otros alimentos de cultivo local y especiación del material particulado respirable, además de incorporar la medición en el aire de otros contaminantes que pudieran tener efectos sinérgicos como es el dióxido de azufre y en general todos los gases de la combustión; además de realizar una evaluación cuantitativa de la incertidumbre.
- Realizar estudios de especiación de los metales en las principales vías de exposición.
- Realizar un estudio de la biodisponibilidad de los metales presentes en la biota comestible de la bahía de Mejillones.
- Eventualmente, establecer un Sistema de Vigilancia de los efectos de la exposición a metales pesados en las personas, de modo de detectar precozmente la aparición de síntomas y signos precursores de enfermedad.