



FACULTAD DE FARMACIA
ESCUELA DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA Y AMBIENTAL
INSTITUTO DE QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL RIESGO A LA SALUD POR
EXPOSICIÓN A MERCURIO (Hg) A TRAVÉS DEL CONSUMO DE
PESCADOS FRESCOS PROVENIENTES DEL NORTE Y CENTRO DE
CHILE

Tesis para optar al Título de Químico Farmacéutico

DANIELA FERNANDA NORAMBUENA PINTO

Director de Tesis: Dra. MARÍA GABRIELA LOBOS VALENZUELA
(FONDECYT 1150855, ECOS C15E04 y EQM 120169)

2018

Dedicado especialmente a:

*Mis padres, Manuel Norambuena M. y Pilar Pinto M.
por su apoyo incondicional.*

*A mi abuelita, Graciela Maturana J.
cuyo espíritu siempre está conmigo.*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi directora de tesis, la Dra. María Gabriela Lobos, quien confió en mí desde que comencé siendo su ayudante para finalmente convertirme en su tesista. Agradezco infinitamente su apoyo y enseñanzas.

De igual modo, agradezco a la profesora Patricia Díaz, quien me recibió en el laboratorio y me enseñó con paciencia. Gracias por el cariño, las risas y los momentos compartidos en la banquita.

Al Dr. Daniel Ramírez, Dr. Marcelo Verdugo, Javier, Fernanda y María Jesús, que hicieron más amenos los días en el laboratorio. Gracias por sus consejos y las risas compartidas.

A mi partner de tesis Natalia Acevedo, agradezco enormemente tu amistad, tu paciencia, la buena onda, los consejos, las risas y cuantas cosas más. Superamos juntas etapas importantes de nuestra vida académica y la tesis no podía ser la excepción. Sé que te espera un futuro hermoso.

A mis padres, Manuel y Pilar, por su apoyo en estos largos años de carrera, por su comprensión en mis momentos de estrés, por siempre escucharme con paciencia y por sus valiosas opiniones. Los amo eternamente.

A mi hermano, Felipe, que en más de alguna ocasión me ofreció una taza de té en las madrugadas de estudio o de escritura. Gracias.

A Sergio, mi mejor amigo y compañero de vida, por sus palabras de aliento cuando estaba cansada, por su amor, paciencia y ayuda. Te amo muchísimo.

A Cristian Roa, un querido amigo de nuestra familia, que ha sido como un padrino para mí. Gracias por tu ayuda en aquellos momentos difíciles.

A mis amigos de la Universidad y futuros colegas, los "MMA", Agustín, Begoña, Catalina, Constanza Guerra, Daniela Rosas, Francisca, María José, María Jesús, Natalia Peredo, Scarleth y Yasmín. Sin ustedes la Universidad no hubiese sido lo mismo, los adoro desde el fondo de mi corazón y agradezco eternamente su apoyo, cariño y confianza en mí.

A Constanza González, parte de las "MMA", que ha sido mi mejor amiga y confidente durante toda la carrera. Hemos sido inseparables desde el primer día de clases y espero así sea siempre. Gracias por todo.

A mis amigas del Colegio Adoratrices, Antonella, Alejandra, Katherine, Luz María y Tamara, por su apoyo constante, por las buenas vibras y por alegrarse conmigo por mis logros. Gracias infinitas por su amistad.

A mis amigas del colegio Nacional, Bárbara, Evelyn y Vanessa, que a pesar de que nos vemos muy poquito el cariño siempre está. Gracias por su amistad y apoyo.

Finalmente, quisiera agradecer a los proyectos FONDECYT 1150855, ECOS CONICYT C15E04, y FONDEQUIP EQM 120169.

RESUMEN

En la actualidad, el mercurio se encuentra clasificado por la Organización Mundial de la Salud como una de las diez sustancias químicas más peligrosas para la población, especialmente para niños y fetos en gestación, debido a los graves efectos nocivos que puede provocar en su desarrollo. La principal vía de exposición a mercurio es el consumo de pescados y mariscos, los que además son ricos en selenio, un oligoelemento que juega un rol fundamental en la detoxificación de este metal. Es por esta razón, que en este trabajo se planteó evaluar el nivel de riesgo para la salud humana por exposición a mercurio asociado al consumo de estos alimentos, a través de la determinación de la concentración de mercurio y selenio total en músculo de pescados, pertenecientes a las costas del norte y centro de Chile, mediante fluorescencia de absorción atómica previa generación de vapor frío e hidruros, respectivamente, y el uso de índices como la Proporción Molar (PM) Se:Hg, el Valor de Selenio Beneficioso para la salud (HBV_{Se}) y el Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP). La totalidad de las especies muestreadas cumplen con la norma nacional e internacional de concentración de mercurio máxima permitida, no así la norma nacional de selenio. Además, ninguna representaría un eventual riesgo a la salud humana, sin embargo, el nivel de riesgo es variable de acuerdo con el parámetro utilizado para su evaluación, la especie, la región a la que pertenece y el grupo etario de la población.

ABSTRACT

Currently, mercury is classified by the World Health Organization as one of the ten most dangerous chemicals for the population, especially for children and fetuses in pregnancy, due to the serious harmful effects it can cause in its development. The main route of exposure to mercury is the consumption of fish and shellfish, which are also rich in selenium, a trace element that plays a fundamental role in the detoxification of this metal. It is for this reason, that in this work it was proposed to evaluate the level of risk to human health from exposure to mercury associated with the consumption of these foods, through the determination of the concentration of mercury and total selenium in fish muscle, belonging to the north and central coasts of Chile, using atomic absorption fluorescence after generation of cold vapor and hydrides, respectively, and the use of indices such as the molar ratio (MR) Se: Hg, the Selenium Health Benefit Value (HBV_{Se}) and the percentage of Provisional Tolerable Weekly Intake (% ISTEP). All the species sampled comply with the national and international norm of maximum allowed mercury concentration, not the national selenium norm. In addition, none would represent an eventual risk to human health, however, the level of risk is variable according to the parameter used for its evaluation, the species, the region to which it belongs and the age group of the population.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Mercurio	1
I.1.1. Características generales	1
I.1.2. Formas químicas	2
I.1.3. Fuentes de origen	3
I.1.4. Ciclo biogeoquímico	3
I.1.5. Toxicocinética y toxicología	4
I.1.6. Normativa nacional e internacional para concentraciones de mercurio ...	5
I.1.6.1. Normativa internacional	5
I.1.6.2. Normativa nacional	7
I.2. Selenio	7
I.2.1. Características generales	7
I.2.2. Formas químicas	8
I.2.3. Ciclo biogeoquímico	8
I.2.4. Rol biológico	9
I.2.5. Toxicocinética y toxicología	10
I.2.6. Normativa nacional e internacional para concentraciones de selenio	10
I.2.6.1. Normativa internacional	10
I.2.6.2. Normativa nacional	11
I.3. Relación selenio-mercurio	12
I.4. Planteamiento del problema	14
II. HIPÓTESIS	15
III. OBJETIVOS	16
IV. METODOLOGÍA	17
IV.1. Materiales, reactivos y soluciones	17
IV.2. Equipos e instrumentos	18
IV.3. Procedimiento experimental	19
IV.3.1. Recolección de las muestras	19

IV.3.2. Pretratamiento de las muestras	22
IV.3.3. Digestión de las muestras.....	23
IV.3.3.1. Digestión de las muestras para la cuantificación de mercurio	23
IV.3.3.2. Digestión de las muestras para la cuantificación de selenio.....	23
IV.3.4. Determinación de la concentración de mercurio y selenio total	24
IV.3.4.1. Determinación de la concentración de mercurio por CV-AFS.....	24
IV.3.4.2. Determinación de la concentración de selenio por HG-AFS.....	24
IV.4. Validación de la metodología analítica	26
IV.4.1. Linealidad.....	26
IV.4.2. Límite de detección (L.D.) y cuantificación (L.C.).....	26
IV.4.3. Sensibilidad.....	26
IV.4.4. Precisión intermedia	26
IV.4.5. Exactitud	27
IV.5. Análisis de resultados.....	28
IV.5.1. Expresión de resultados.....	28
IV.5.2. Estimación de parámetros para la evaluación del nivel de riesgo para la salud humana por exposición a mercurio.....	28
IV.5.2.1. Cálculo de la Proporción Molar (PM) Se:Hg	28
IV.5.2.2. Cálculo del Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV _{Se})..	29
IV.5.2.3. Cálculo del Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional	29
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
V.1. Determinación de parámetros analíticos	31
V.1.1. Linealidad.....	31
V.1.2. Límite de detección (L.D.) y cuantificación (L.C.).....	32
V.1.3. Sensibilidad.....	32
V.1.4. Precisión intermedia	33
V.1.4. Exactitud	33
V.2. Concentración de mercurio y selenio total.....	34
V.2.1. Concentración de mercurio y selenio total según región	35
V.2.2. Concentración de mercurio y selenio total según especie	39

V.3. Proporción Molar (PM) Se:Hg y Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV _{Se})	45
V.3.1. Proporción Molar (PM) Se:Hg	45
V.3.2. Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV _{Se})	49
V.4. Estimación del Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP).....	52
VI. CONCLUSIONES.....	59
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	60
VIII. ANEXOS	71

I. Introducción

Los metales pesados constituyen un importante riesgo para el medio ambiente, ya que son sustancias que presentan gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación. Esto significa que los seres vivos son incapaces de metabolizarlos generándose una contaminación por bioacumulación y biomagnificación a través de la cadena trófica (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León, 2006). Dentro de este grupo de sustancias se encuentran el plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico, mercurio (Hg) entre otros.

El mercurio cobró notoriedad cuando en el año 1956 la bahía de Minamata, Japón, resultó contaminada con aguas residuales que contenían metilmercurio (MeHg), originando un brote por envenenamiento que más tarde sería llamado “Enfermedad de Minamata”. Dicha patología consistió en el daño del sistema nervioso central provocando trastornos sensoriales, auditivos, visuales e incluso la muerte de las personas que consumieron alimentos de origen marino provenientes de la bahía. Además, se observó que la enfermedad también se presentó de forma congénita en los hijos nacidos de madres expuestas al consumo indirecto de MeHg (PNUMA, 2002).

Hoy en día, es sabido que la principal fuente de exposición a mercurio en humanos es a través del consumo de pescados (Rice *et al.*, 2000). La mayoría del contenido de mercurio en estos animales corresponde a MeHg (Cabañero *et al.*, 2004) el que es la forma más tóxica (Gaiolia *et al.*, 2012)

I.1. Mercurio

I.1.1. Características generales

El mercurio, simbolizado como Hg en la tabla periódica, es un elemento perteneciente a la familia de los metales de transición ubicado en el bloque D, grupo 12 y periodo 6. Es un metal pesado inodoro, de color gris plateado, insoluble en

agua y soluble en ácido nítrico. A temperatura ambiente es el único metal que se encuentra en estado líquido. Comparado con otros metales, no es un buen conductor de calor, pero sí de la electricidad, por lo que es ampliamente utilizado en la fabricación de aparatos electrónicos (Hutchinson, 1960).

Posee tres estados de oxidación: metálico (Hg^0), ión mercurioso (Hg^{+1}) e ión mercúrico (Hg^{+2}). Hg^0 y Hg^{+1} pueden ser oxidados a Hg^{+2} , la que resulta ser la especie más abundante en el planeta (Satoh, 2000).

En la siguiente tabla se resumen las principales propiedades físico-químicas del mercurio.

Tabla 1. *Propiedades físico-químicas de mercurio.*

Número atómico	80
Masa atómica (Da)	200,59
Estructura cristalina	Romboédrica
Densidad relativa a 20°C (g/m^3)	13,554
Punto de ebullición (°C)	356,73
Punto de fusión (°C)	-38,83
Presión de vapor a 20°C (Pa)	0,20
Conductividad eléctrica (pS/m)	$1,04 \times 10^{18}$

Fuente: Ficha IPCS, 2018.

I.1.2. Formas químicas

Es difícil de encontrar en estado elemental, siendo más común que se encuentre formando compuestos mono o divalentes. Puede estar amalgamado con otros metales, como oro y plata, o dar origen a compuestos inorgánicos al combinarse con azufre u oxígeno. Al unirse con carbono es capaz de generar compuestos orgánicos como etilmercurio ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}^+$), dimetilmercurio ($(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$), fenilmercurio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$) y metilmercurio (CH_3Hg^+) (Raimann *et al.*, 2004). Éste último es el más conocido, ya que al depositarse en las aguas se acumula en los organismos (bioacumulación), concentrándose principalmente a través de la cadena alimenticia

acuática (peces y mamíferos marinos) (biomagnificación) siendo luego ingerido por los humanos a través del consumo de productos del mar (PNUMA, 2002).

I.1.3. Fuentes de origen

Es posible clasificar las fuentes de liberación de mercurio hacia la biosfera en dos categorías. La primera son las fuentes naturales, que corresponden a las liberaciones de mercurio originadas por la movilización de este elemento generado principalmente por la corteza terrestre y la erosión de las rocas. La segunda son las fuentes antropogénicas que generan mercurio debido a la movilización de impurezas de éste (uso de combustibles fósiles como el carbón o petróleo), su utilización intencional en productos y procesos (manufactura de termómetros o minería de oro y plata) y su removilización desde los suelos o sedimentos en donde se ha depositado (incineración de desechos, vertederos o cremaciones) (PNUMA, 2002).

I.1.4. Ciclo biogeoquímico

El ciclo global del mercurio se define como la circulación de él entre la atmósfera, la tierra, el medio acuático y la biota. Comienza con la liberación de Hg al medio a partir de la erosión de las rocas que lo contienen. Desde ahí puede alcanzar tanto las aguas superficiales como las subterráneas llegando finalmente al océano. Tanto en la corteza terrestre como en el océano se producen reacciones de desgasificación y volatilización de mercurio, permitiendo el paso de éste a la atmósfera. Una vez que Hg se encuentra en la atmósfera puede sufrir procesos de foto-oxidación, formando compuestos solubles que precipitan pudiendo depositarse en la biosfera (Lominchar *et al.*, 2010). Es en el medio acuático, en donde el Hg puede transformarse en MeHg a través de procesos químicos que pueden ser bióticos o abióticos (PNUMA, 2002). En la figura 1 se esquematizan estas transformaciones.

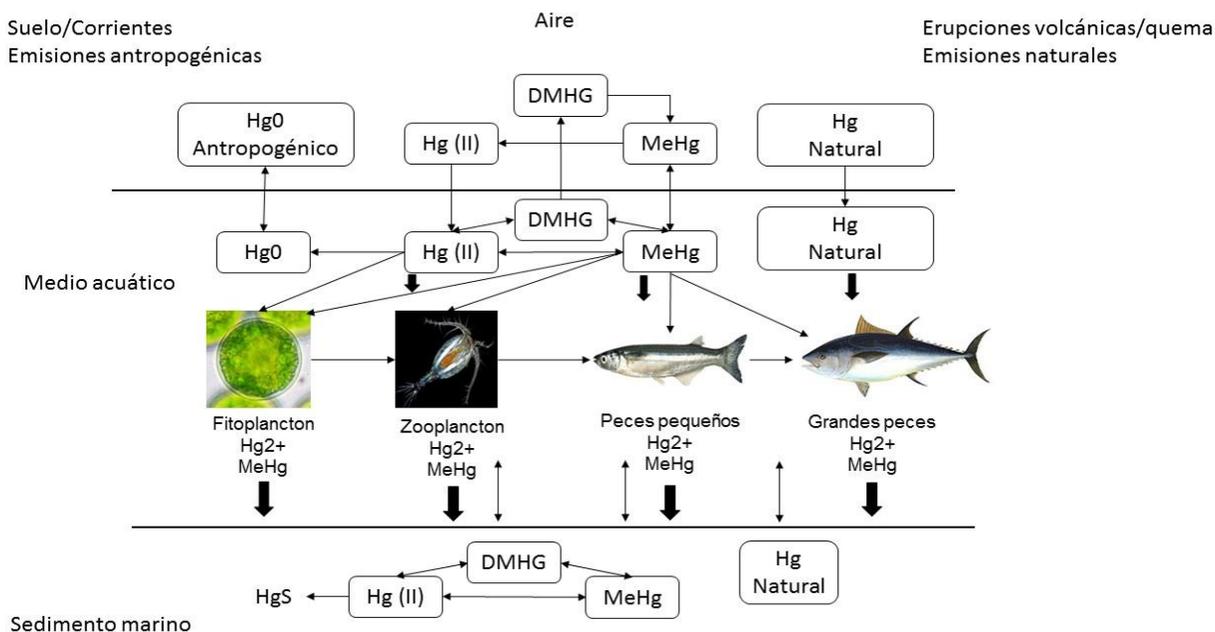


Figura 1. Transformaciones de Hg en medio acuático.

Fuente: Adaptado de León y Peñuela (2010).

I.1.5. Toxicocinética y toxicología

Gran parte de los compuestos organomercuriales son absorbidos por ingestión, inhalación o a través de la piel. En general, los compuestos orgánicos son liposolubles y más del 90% se absorben en el tubo digestivo. MeHg cruza rápidamente las barreras hematoencefálicas y placentarias alcanzando concentraciones en sangre fetal casi iguales a las de la madre. Su vida media en la sangre ronda los 40 a 50 días en adultos y en cuanto a su excreción, el 90% del MeHg es excretado a través de la bilis y heces, mientras que un porcentaje menor lo hace a través de la orina y cabello (Goldman & Shannon, 2001 y PNUMA, 2002).

En general, la toxicidad del Hg depende de ciertos factores como la forma química, vía de exposición y edad del individuo. En el caso de MeHg, éste suele ingresar al organismo principalmente a través de la ingesta de pescados y mariscos (PNUMA, 2002). Debido a que MeHg puede atravesar la placenta, esta sustancia es capaz de

dañar al feto en desarrollo (Eto *et al.*, 2010). El cuadro clínico puede cursar con microcefalia, hiperreflexia, discapacidad mental y trastornos de la función motora gruesa, a veces asociados con ceguera o sordera (Harada, 1995). En los casos más leves, los efectos pueden aparecer más tarde en el desarrollo en forma de discapacidad psicomotora, mental y reflejos patológicos persistentes (PNUMA, 2002).

En adultos, los efectos más precoces son síntomas no específicos, tales como parestesia, malestar y visión borrosa; con una mayor exposición, aparecen signos tales como una constricción concéntrica del campo visual, sordera, disartria, ataxia y, por último, coma y muerte (Harada, 1995). Los estudios realizados en una población expuesta al MeHg contenido en el pescado sugieren también una relación con el aumento de la incidencia de enfermedades cardiovasculares (Salonen *et al.*, 1995 y Rissanen *et al.*, 2000). Diversos trabajos de investigación hechos con animales prueban su genotoxicidad y efectos en el sistema inmunitario y el aparato reproductor.

I.1.6. Normativa nacional e internacional para concentraciones de mercurio

I.1.6.1. Normativa internacional

El Comité mixto de expertos en aditivos alimentarios y contaminantes de los alimentos (JECFA), ha fijado valores de concentración máxima en alimentos para mercurio, los cuales se informan en el Codex Alimentarius. En la tabla 2 se presentan los límites para mercurio, mientras que en la tabla 3 para metilmercurio.

Tabla 2. Límites de concentración de Hg total para alimentos indicadas en el Codex Alimentarius CXS 193-1995.

Producto	Límite de concentración Hg total
Aguas minerales naturales	0,001 mg L ⁻¹
Sal de calidad alimentaria	0,1 mg kg ⁻¹

Fuente: FAO/OMS 2017.

Tabla 3. Límites de concentración de MeHg para alimentos indicadas en el Codex Alimentarius CXS 193-1995.

Producto	Límite de concentración MeHg mg kg ⁻¹ p.h. ^a	Límite de concentración MeHg mg kg ⁻¹ p.s. ^{b,c}
Pescado	0,5	1,9
Peces depredadores	1	3,9

Fuente: FAO/OMS 2017.

^a: Peso húmedo; ^b: Peso seco; ^c: Conversión en base a una humedad promedio de peces grasos y magros de 74,2% (Durazo, 2006); mg kg⁻¹ = µg g⁻¹.

Así como la FAO/OMS han establecidos límites de concentración máxima de Hg y MeHg además han fijado un límite de consumo para ambas sustancias siendo este valor conocido como Ingesta Semanal Tolerable Provisional (ISTP) (Jalón et al. 1997). La ISTP representa la exposición semanal tolerable para aquellos contaminantes inevitablemente asociados al consumo de alimentos. Se denomina provisional, debido a que la escasez de datos no ha permitido fijar un valor definitivo (Jalon et al. 1997). Los valores de ISTP para Hg y MeHg se representan en la tabla 4.

Tabla 4. Ingesta Semanal Tolerable Provisional (ISTP) para Hg inorgánico y MeHg recomendada en el Codex Alimentarius CXS 195-1995.

Sustancia	ISTP µg/kg peso corporal/semana
Mercurio inorgánico	4
Metilmercurio	1,6

Fuente: FAO/OMS 2017.

Cabe destacar que en la 72^a reunión (2010), el JECFA estableció una ISTP para el mercurio inorgánico de 4 µg/kg p.c./semana, siendo retirada la anterior ISTP de 5 µg/kg p.c./semana para el total de mercurio, establecida en 1972. La nueva ISTP para el mercurio inorgánico se considera aplicable a toda fuente de exposición alimentaria al mercurio que no sea pescados y mariscos. Para la exposición alimentaria al mercurio de estos alimentos, deberá aplicarse la ISTP establecida para MeHg (FAO/OMS, 2017).

I.1.6.2. Normativa nacional

En Chile, el Ministerio de Salud (MINSAL) estableció la concentración máxima permitida de mercurio en pescados y mariscos, en el Reglamento Sanitario de los Alimentos (RSA), D. S. N° 977/96, artículo 160, en 0,5 a 1,5 mg kg⁻¹ de producto final (MINSAL, 2017). La tabla 5 resume estos datos.

Tabla 5. Límites máximos de concentración de mercurio en pescados y mariscos en Chile indicado en el Reglamento Sanitario de los Alimentos.

Alimento	Límite máximo mg kg ⁻¹ p.h. ^a	Límite máximo mg kg ⁻¹ p.s. ^{b, c}
Conservas de pescados y mariscos	1,0	3,9
Pescado fresco, enfriado y congelado talla pequeña	0,5	1,9
Pescado fresco, enfriado y congelado talla grande	1,5	5,8

Fuente: MINSAL, 2017.

a: Peso húmedo; b: Peso seco; c: Conversión en base a una humedad promedio de peces grasos y magros de 74,2% (Durazo, 2006); mg kg⁻¹ = µg g⁻¹.

I.2. Selenio

I.2.1. Características generales

El selenio es un oligoelemento, lo que significa que es esencial para la mayoría de los organismos vivos, incluyendo los humanos, ya que es un constituyente de varias selenoproteínas, las cuales desempeñan funciones importantes en la reproducción, metabolismo de hormonas tiroideas, síntesis de ADN, protección contra el daño oxidativo e infecciones (Ross *et al.*, 2012).

Puede ser encontrado en suplementos alimenticios o de forma natural contenido en diversos alimentos, principalmente en mariscos y vísceras (Ross *et al.*, 2012), pero

también en carnes, cereales, huevos y derivados lácteos, siendo las frutas y verduras las que lo contienen en menor cantidad. El contenido de selenio en los alimentos de origen vegetal depende de la riqueza del suelo en este mineral, así como del pH del suelo entre otros factores. De esta manera, el contenido de selenio en alimentos de origen animal depende de la cantidad de selenio presente en los alimentos que éstos consumen. (Bowman & Russel, 2006). En la tabla 6 se describen algunas propiedades físico-químicas de este elemento.

Tabla 6. *Propiedades físico-químicas del selenio.*

Número atómico	34
Masa atómica (Da)	79,96
Densidad relativa (g/cm ³)	4,8
Estructura cristalina	Hexagonal
Punto de ebullición (°C)	685
Punto de fusión (°C)	217
Presión de vapor a 20°C (Pa)	0,1
Conductividad eléctrica (S/m)	1,0 x 10 ⁻⁴

Fuente: Ficha IPCS, 2018.

I.2.2. Formas químicas

En la naturaleza el selenio existe en forma elemental (Se⁰), formas inorgánicas, tales como selenito (SeO⁻²) y selenato (SeO⁻³) u orgánicas como compuestos metilados (dimetilselenio, dimetildiselenio) selenoazúcares o selenoaminoácidos (selenometionina y selenocisteina) (Bowman & Russel, 2006), siendo ambas formas fuentes de selenio para la dieta (Erdman *et al.*, 2012).

I.2.3. Ciclo biogeoquímico

Este elemento se encuentra naturalmente en el ambiente y como tal no puede ser manufacturado o destruido, solo cambiar de forma. Las erupciones volcánicas y el desgaste de las rocas y suelos pueden provocar la liberación de selenio hacia el aire en forma de finas partículas o hacia la corteza terrestre. En ambos casos puede

depositarse en las aguas y posteriormente incorporarse a organismos como las plantas. Durante la quema de combustibles fósiles como el carbón o petróleo, el selenio presente en ellos puede combinarse con oxígeno y el producto formado puede reaccionar con agua para formar compuestos solubles de selenio. Las formas de selenio en los suelos dependen en gran parte de la acidez de éste y la interacción del oxígeno, ya que en ausencia de éste y en suelo ácido es muy baja la cantidad de selenio que logra ingresar a las plantas y otros organismos. El selenio elemental y otras formas insolubles se movilizan menos permaneciendo en los suelos, mientras que las formas solubles permanecen en el agua en donde puede bioacumularse y biomagnificarse (ATSDR, 2003).

I.2.4. Rol biológico del selenio

El selenio frecuentemente es considerado como un antioxidante, sin embargo, no lo es realmente por sí mismo, sino que es un componente esencial de las selenoproteínas. En el humano se han identificado veinticinco genes que codifican para las selenoproteínas (Mariotti *et al.*, 2012). Entre las selenoproteínas con función descrita se encuentran cinco isoenzimas Glutación Peroxidasas (GPx), las cuales reducen peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidroperóxidos orgánicos (Papp *et al.*, 2007), siendo GPx1 la principal selenoenzima antioxidante bajo condiciones de estrés oxidativo severo (Cheng *et al.*, 1998). Tres Tiorredoxinas (TrxR) encargadas de reducir una amplia variedad de sustratos incluyendo las tiorredoxinas oxidadas 1 y 2, H_2O_2 e hidroperóxidos orgánicos (Papp *et al.*, 2007). Por otro lado, la Metionina Sulfóxido Reductasa 2 (MsrB) tiene la función de reducir la metionina sulfóxido libre y la que se encuentra ligada a las proteínas metionina (Moskovitz *et al.*, 2002). La Selenoproteína P (SePP1) permite incorporar el selenio que circular en el plasma y además posee actividad antioxidante. (Arteel *et al.*, 1998). Tres Iodotironinas Deiodinasas (DIO), las cuales están involucradas en la regulación de las vías metabólicas controladas por las hormonas tiroideas a través de la activación de éstas mediante la yodación y desyodación (Köhrle *et al.*, 2005).

I.2.5. Toxicocinética y toxicología

El selenio ingresa al organismo por vía oral, inhalatoria y mínimamente por vía dérmica. En el sistema digestivo se absorben fácilmente tanto las formas orgánicas como inorgánicas. Generalmente permanece en el cuerpo aproximadamente 24 horas, siendo eliminado principalmente por la orina, mientras que las heces y el aliento son rutas minoritarias. Si la ingesta o exposición es muy alta, el selenio puede acumularse en el organismo, fundamentalmente en el hígado y los riñones, pero también en la sangre, los pulmones, el corazón y los testículos. Cuando la exposición es prolongada puede incluso acumularse en uñas y cabello (ATSDR, 2003).

A pesar de que el selenio es requerido por nuestro organismo para mantener la salud, ya que una ingesta insuficiente de él se asocia al desarrollo de ciertas patologías tales como la enfermedad de Keshan, la que produce miocardiopatías (Rayman, 2008), o la enfermedad de Keshin-Beck (KBD), que se caracteriza por una degeneración del cartílago articular (osteoartritis) (Stone, 2009), es importante destacar que en altas dosis puede producir toxicidad aguda o crónica (selenosis). La selenosis puede ocurrir por el consumo prologando de dosis superiores a la Ingesta Diaria Recomendada (RDA) de selenio en un tiempo prologando y en ambos casos de toxicidad los síntomas son similares, tales como como pérdida o fragilidad en uñas y cabello, molestias gastrointestinales, erupciones cutáneas, aliento con olor a ajo, fatiga, irritabilidad y trastornos neurológicos, sin embargo, en caso de toxicidad aguda también puede presentarse dificultad respiratoria, insuficiencia renal o cardíaca y en raros casos, la muerte. (Bowman & Russel, 2006 y IOM, 2000).

I.2.6. Normativa nacional e internacional para concentraciones de selenio

I.2.6.1. Normativa internacional

Debido a las patologías que pueden derivar de una baja ingesta de selenio y a las amplias funciones que cumplen las selenoenzimas en el organismo es que la Junta

de Alimentos y Nutrición (FNB) del Instituto de Medicina de las Academias Nacionales (IOM) estableció una Ingesta Diaria Recomendada (RDA), la que corresponde a la mínima ingesta diaria suficiente para satisfacer las necesidades de la mayoría de las personas sanas según su edad y sexo. (IOM, 2000). La RDA de selenio, tanto para hombres como mujeres desde los 14 años, corresponde a 55 μg . En el anexo 1 se detalla la RDA para otros grupos etarios.

Por el contrario, ya que el selenio a dosis altas puede provocar toxicidad, la FNB además estableció la Ingesta Máxima Tolerable (UL) proveniente desde alimentos o suplementos (IOM, 2000), la cual corresponde 400 μg de selenio tanto para hombres como mujeres desde los 14 años. En el anexo 2 se detalla la UL para otros grupos etarios.

I.2.6.2. Normativa nacional

En Chile, el ministerio de salud estable en el RSA, D. S. N° 977/96, artículo 160, las concentraciones máximas de selenio permitidas en distintos productos alimenticios expresada como mg kg^{-1} de producto final. Estos valores se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Límites máximos de concentración de selenio permitido en alimentos en Chile indicado en el Reglamento Sanitario de los Alimentos.

Alimento	Límite máximo mg kg^{-1} p.h. ^a	Límite máximo mg kg^{-1} p.s. ^{b, c}
Productos sólidos	0,30	1,2
Productos líquidos	0,05	-
Agua mineral de mesa	0,01	-

Fuente: MINSAL, 2017.

a: Peso húmedo; b: Peso seco; c: Conversión en base a una humedad promedio de peces grasos y magros de 74,2% (Durazo, 2006); $\text{mg kg}^{-1} = \mu\text{g g}^{-1}$.

Así mismo, el decreto exento n°26 que modifica la resolución exenta 394/2002 establece la Dosis Diaria de Referencia (DDR) de selenio en 70 µg diarios. La DDR se refiere a la cantidad diaria recomendada para cubrir las necesidades nutricionales de una persona.

I.3. Relación selenio-mercurio

A lo largo de los años se ha podido establecer una relación importante entre Hg y Se, ya que éste posee reconocidos efectos protectores contra la intoxicación por Hg en todas las formas de vida animal que se han investigado (Chapman y Chan, 2000). MeHg cruza fácilmente la barrera hematoencefálica y la placenta en forma de aducto de cisteína (MeHg-Cys), el cual se asemeja bioquímicamente a la Metionina (Taylor *et al.*, 1975). A bajas concentraciones, MeHg-Cys participa en el ciclo de la metionina sin consecuencias patológicas, pero a medida que las concentraciones aumentan MeHg puede inducir efectos tóxicos. Una vez en el organismo, el Hg forma uniones covalentes con especies químicas de igual o mayor afinidad, entre ellas, el selenio. El mercurio tiene una afinidad por el selenio un millón de veces más grande que por el azufre (Dyrssen y Wedborg, 1991), es así, que cuando MeHg-Cys se encuentra con el selenio ionizado de selenocisteína en el sitio activo de una selenoenzima se produce un intercambio con el aminoácido cys y se forma el aducto MeHg-Selenocisteína (MeHg-Sec.) también llamado “pseudometionina” (Ralston *et al.*, 2008).

Actualmente es sabido que una alta exposición a Hg durante el embarazo disminuye el transporte de Se a través de la placenta, disminuyendo la cantidad de Se que se suministra al feto en más de un 50% (Parizek *et al.*, 1971) y además disminuyen de forma dependiente las actividades selenoenzimáticas en el cerebro fetal (Stringari *et al.*, 2008). Esto ocurre ya que al haber mayor concentración de MeHg, éste “secuestra” el selenio disponible para la síntesis de selenoenzimas y además el

selenio presente en el complejo MeHg-Sec no se puede liberar, por lo que tampoco está disponible para la síntesis.

Es así, como se puede concluir que el daño oxidativo no es producido por MeHg propiamente tal, sino que es producto de la inhibición de la actividad de las selenoenzimas, quienes son las encargadas de la detoxificación por ROS formados durante el metabolismo celular normal (Ralston *et al.*, 2008).

La capacidad del selenio para contrarrestar los efectos tóxicos del Hg es conocida desde 1967 y posteriormente se confirmó que tanto en sus formas orgánicas como inorgánicas previenen o mejoran las consecuencias tóxicas a la exposición de mercurio (Ralston, 2008). Otros estudios han demostrado que el Se orgánico presente en especies como atún de aleta amarilla, el pez espada o el pez roca es biodisponible y eficaz para contrarrestar la toxicidad de MeHg (Ralston, 2008).

I.4. Planteamiento del problema

Debido a que el consumo de alimentos de origen marino, como pescados y mariscos, es importante ya que son considerados una fuente de proteínas y ácidos grasos omega-3 (ω -3), los cuales son necesarios para el correcto desarrollo de la visión y del sistema nervioso del feto en gestación, así como otros beneficios; y considerando que estos alimentos son una de las rutas de exposición a mercurio, principalmente de metilmercurio, es que se hace necesario determinar si los pescados que provienen de las costas del país cumplen con la normativa vigente establecida tanto por organismos nacionales (MINSAL) como internacionales (FAO/OMS) mediante la cuantificación de mercurio total presente en ellos para así asegurar que su consumo no representa un riesgo para la salud de la población.

De la misma manera, es que la determinación de la concentración de selenio presente en estos alimentos parece ser pertinente y necesaria, ya que como se mencionó en los antecedentes, este oligoelemento juega un rol fundamental en la detoxificación de mercurio, por lo tanto, conocer las concentraciones de ambos elementos permitirá calcular parámetros como la Proporción Molar Se:Hg (PM Se:Hg), el Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV_{se}) y el Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP) los cuales son útiles para discriminar entre especies más o menos perjudiciales para el consumo.

Con los antecedentes recopilados en este trabajo se espera contribuir a orientar a la población sobre el consumo de alimentos marinos y evitar aquellas especies que pudieran representar un potencial riesgo para la salud.

II. HIPÓTESIS

En base a la información antes expuesta, se plantea como hipótesis que mediante la determinación de la concentración de mercurio y selenio total, junto al cálculo de índices como la Proporción Molar (PM) Se:Hg, el Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV_{Se}) y el Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP), será posible evaluar el nivel de riesgo a la salud humana por exposición a mercurio asociado al consumo de pescados frescos.

III. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el nivel de riesgo a la salud humana por exposición a mercurio, a través del consumo de pescados frescos, obtenidos en caletas del norte y centro de Chile.

Objetivos Específicos

1. Validar metodología analítica para la determinación de mercurio y selenio total mediante detección de fluorescencia atómica previa generación de vapor frío (CV-AFS) e hidruros (HG-AFS) respectivamente.
2. Determinar la concentración de mercurio y selenio total en músculo de pescados obtenidos en caletas del norte y centro de Chile.
3. Evaluar el cumplimiento de normas nacionales e internacionales con respecto a los límites máximos permitidos para mercurio y selenio.
4. Evaluar el nivel de riesgo a la salud humana por exposición a mercurio, mediante cálculos y análisis de índices seleccionados: Proporción Molar (PM) Se:Hg, Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV_{Se}) y el Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP).

IV. METODOLOGÍA

IV.1. Materiales, reactivos y soluciones

Los reactivos utilizados para la digestión de las muestras como Ácido Clorhídrico Fumante (HCl) 37%, Ácido Nítrico (HNO₃) 65% y Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂) 30% fueron de calidad p.a marca Merck. Con respecto a los reactivos utilizados para la técnica de generación de hidruros y de vapor frío, para la determinación de selenio y mercurio respectivamente, se requirió Borohidruro de Sodio (NaBH₄), Hidróxido de Sodio (NaOH) y Cloruro de Estaño dihidratado (SnCl₂*2H₂O) también de calidad p.a marca Merck.

Para la elaboración de las curvas de calibrado de cada analito se utilizó una solución patrón de Hg Titrisol® 1000 ± 2 mg L⁻¹ y de Se Titrisol® 1000 ± 5 mg L⁻¹, ambos marca Merck.

Para la cuantificación de ambas especies mediante el uso de los equipos de CV-AFS y HG-AFS se utilizaron los Gases Argón (Ar), Hidrógeno (H₂) y Aire sintético AIR LIQUIDE de pureza espectroscópica (AGA 99,999%).

Para la validación de la metodología analítica empleada para la determinación de selenio y mercurio se utilizó el Material de Referencia Certificado por la Nacional Research Council Canada (NRC) de proteínas de pescado para trazas de metales y otros constituyentes (Dogfish Muscle Certified Referente Material for Trace Metals) DORM-2 (NRC-CNRC) (Se: 1,40 ± 0,09 mg kg⁻¹) y el Material de Referencia Certificado por la Nacional Research Council Canada (NRC) de proteínas de pescado para trazas de metales y otros constituyentes (Dogfish Muscle Certified Referente Material for Trace Metals) DORM-4 (NRC-CNRC) (Hg: 0,412 ± 0,036 mg kg⁻¹) respectivamente.

El agua utilizada para la preparación de soluciones fue de calidad ultra pura cuya conductividad correspondía 18,2 MΩ y se obtuvo mediante el sistema de destilación

marca Pobel modelo 710 710 y posterior desionización por el sistema Thermo Scientific™ Barnstead™ modelo Easypure™ II.

El material de vidrio utilizado durante el desarrollo experimental de este trabajo fue lavado después de su uso con abundante agua potable, luego se enjuagó con agua ultra pura y posteriormente se sumergió en una solución de HNO₃ al 10% v/v por lo menos durante 12 horas. Al día siguiente, el material utilizado para selenio se enjuagó nuevamente con abundante agua ultra pura y luego se llevó a estufa a 40°C hasta secarse, mientras que el material destinado para mercurio se sumergió consecutivamente en otra solución de HNO₃ al 10% v/v y 2 soluciones diferentes de HCl al 10% v/v cada una, para luego enjuagarlo con abundante agua desionizada y secarlo en estufa a 40°C. El material usado para la determinación de mercurio requiere un lavado más exhaustivo con el fin de reducir la posibilidad de contaminación de las muestras y evitar interferencias al momento de cuantificar del analito.

IV.2. Equipos e instrumentos

En el tratamiento previo de las muestras se utilizó una Picadora marca Thomas modelo TH-9010V y posteriormente un liofilizador marca VirTis modelo Benchtop K 6KBTES.

Para la digestión de las muestras se usó un horno microondas digestor marca Milestone Srl modelo Ethos Easy con control automático de temperatura y rotor con vasos de teflón.

Para el pesado de las muestras se utilizó una balanza analítica marca Shimadzu modelo AUX220 ($\pm 0,0001$ g), mientras que para el pesado de reactivos como NaOH y NaBH₄ se usó balanza granataria marca BEL Engineering modelo S1002 ($\pm 0,01$ g).

Las soluciones patrón Titrisol® de selenio y mercurio fueron conservadas en un congelador marca Mademsa modelo MFV540B (-18°C).

El material de vidrio utilizado en los experimentos fue secado en Estufa Drying Oven modelo DHG-9053A.

Para la determinación de mercurio total se utilizó Espectrómetro de Fluorescencia Atómica por vapor frío (CV-AFS), PS-Analytical, modelo Millenium Merlin operado mediante programa Millenium, mientras que para la determinación de selenio se usó un Espectrómetro de Fluorescencia Atómica acoplado a la Generación de Hidruros (HG-AFS), PS-Analytical modelo Millenium Excalibur operado mediante programa Millenium.

En el procedimiento de reducción de Se (VI) a Se (IV) se requirió de una placa calefactora agitadora marca Dragon Laboratory modelo MS-H280-Pro.

IV.3. Procedimiento experimental

IV.3.1. Recolección de las muestras

La recolección de las muestras fue realizada por un buzo durante el primer semestre del año 2017 en el norte y centro de Chile. Las regiones muestreadas corresponden a Arica y Parinacota (XV), Tarapacá (I), Antofagasta (II), Atacama (III) y Valparaíso (V). En la figura 2 se señalan en el mapa las cinco regiones del país desde donde se extrajeron las especies marinas para este trabajo. El número de especies por localidad y región varió en función de la disponibilidad de estos recursos. El detalle de esta información se encuentra en la tabla 10, mientras que en la tabla 11 se resumen las muestras agrupadas por especie, el n muestral y su talla promedio.

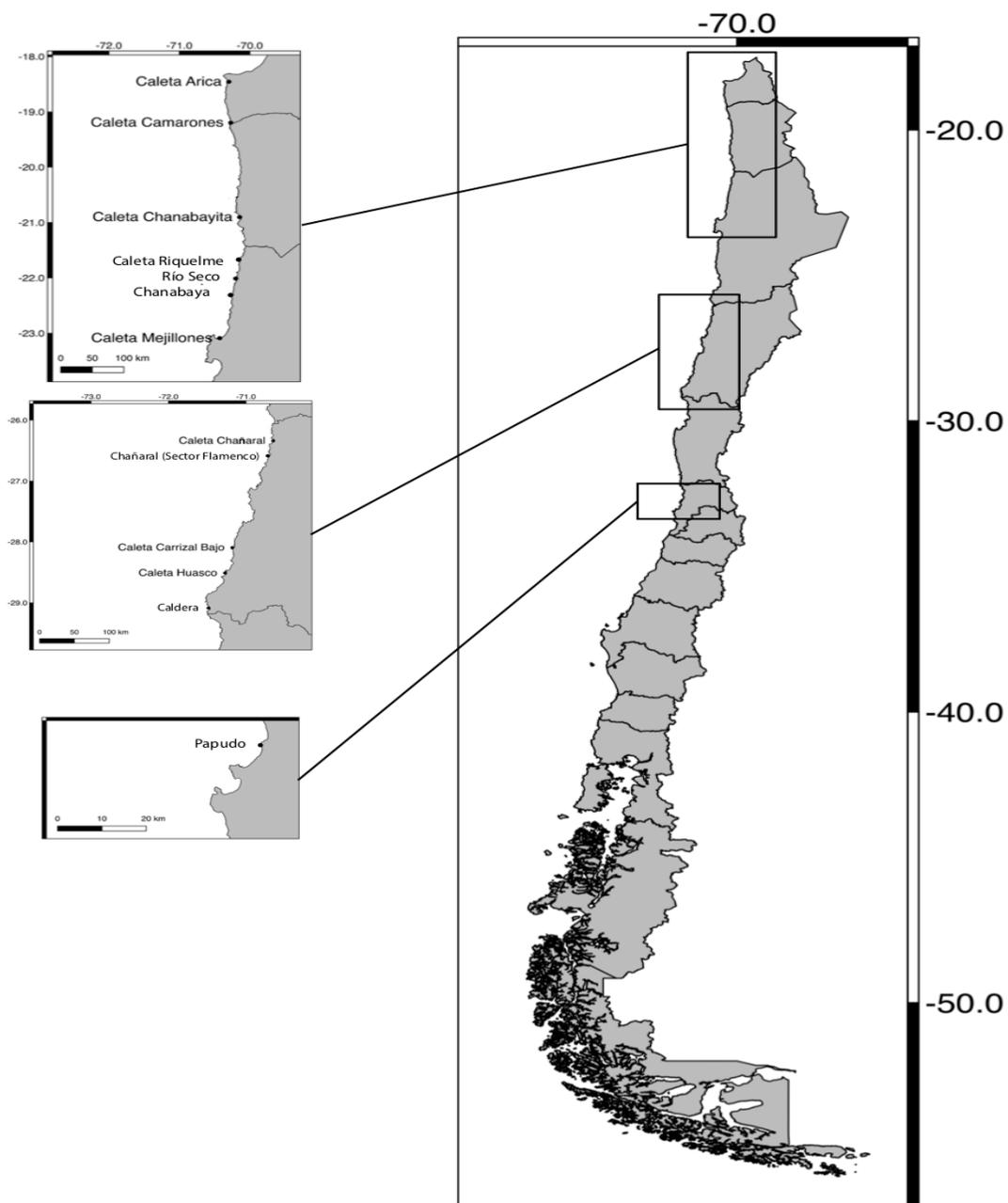


Figura 2. Mapa regional de Chile en donde se señalizan las regiones y caletas donde se realizó el muestreo.

Tabla 10. *Especies muestreadas según región, localidad y número de individuos.*

Región	Caleta	Especie	n	n regional^a
Arica y Parinacota (XV)	Caleta Camarones/ El rodado	Bilagay	4	12
		Rollizo	3	
	Caleta Arica	Monito	3	
		Dorado	1	
		Albacora	1	
Tarapacá (I)	Caleta Riquelme	Dorado	3	19
	Caleta Chanavayita/ Sector Yape	Bilagay	3	
		Vieja	1	
		Rollizo	1	
	Río seco	Vieja	2	
		Rollizo	4	
	Chanavaya	Congrio Colorado	5	
Antofagasta (II)	Mejillones (Punta Angamos)	Congrio Colorado	4	9
		Bilagay	3	
		Rollizo	2	
Atacama (III)	Chañaral	Congrio	3	47
		Corvina	1	
		Cojinova	3	
	Caldera	Vieja	1	
		Dorado	3	
		Bilagay	3	
		Congrio Colorado	3	
		Corvina	3	
		Rollizo	3	
		Cojinova	3	
	Carrizal Bajo	Bilagay	3	
		Congrio Colorado	3	
		Rollizo	3	
	Huasco	Congrio Colorado	3	
	Chañaral (Sector Flamenco)	Congrio Colorado	5	
Rollizo		2		
Bilagay		2		
Valparaíso (V)	Papudo	Rollizo	2	4
		Congrio Colorado	2	

^a: la suma del n regional corresponde a un total de 91 individuos muestreados.

Tabla 11. Individuos muestreados agrupados por especie con sus respectivas tallas.

Nombre común	Nombre científico	n	Medida Máxima bibliográfica ^d (cm)	Rango de tallas (cm)	Promedio de longitud (cm)
Albacora	<i>Xiphias gladius</i>	1	455 FL ^b	Sin datos	Sin datos
Bilagay, vielagallo	<i>Cheilodactylus variegatus</i>	18	44,0 TL ^a	33 - 43,5	37,1
Bonito	<i>Sarda chiliensis</i>	3	102 TL ^a	61 - 71	64,3
Dorado	<i>Coryphaena hippurus</i>	7	210 TL ^a	58 - 90	70,4
Cojinova del Norte	<i>Seriolella violacea</i>	6	60 TL ^a	50 - 59	54,7
Congrio colorado	<i>Genypterus chilensis</i>	28	150 SL ^c	48 - 90	75,7
Corvina	<i>Cilus gilberti</i>	4	80 TL ^a	51 - 95	74,2
Rollizo	<i>Pinguipes chilensis</i>	20	51,0 TL ^a	32,5 - 48	40,2
Vieja	<i>Graus nigra</i>	4	64,6 TL ^a	42 - 49	45,5

^a: Longitud total; ^b: Longitud furcal; ^c: Longitud estándar; ^d: Tallas recopiladas desde FishBase.

IV.3.2. Pretratamiento de las muestras

Una vez que las muestras fueron recolectadas, se transportaron en contenedores apropiados a -18°C para mantener la cadena de frío. Una vez en el laboratorio de Química Analítica y Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso se procedió a filetear los especímenes con un cuchillo de cerámica y luego se trituró la carne con la ayuda de una picadora de alimentos. Una vez hecho esto, se llevaron a congelador a -40°C durante 24 horas para posteriormente realizar el proceso de liofilización. El liofilizado fue triturado nuevamente, se homogenizó y se conservó en frascos plásticos dentro de bolsas con sílica gel para evitar la humedad. Estas bolsas se mantuvieron en un lugar fresco y seco.

IV.3.3. Digestión de las muestras

Tanto para la cuantificación de Hg total como de Se total, se llevó a cabo una digestión ácida de las muestras por triplicado, con el propósito de mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos y detectar contaminación, ya sea de las muestras o de los reactivos utilizados en el tratamiento de estas. Los blancos tuvieron el mismo tratamiento que las muestras.

IV.3.3.1. Digestión de las muestras para la cuantificación de mercurio

Se masaron aproximadamente 0,1250 g de cada muestra pulverizada en viales de teflón. Luego se realizó una pre-digestión ácida de las muestras, para lo que se utilizó H_2O_2 al 30% y HNO_3 al 65%. Posteriormente se llevó a cabo la digestión en microondas, el cual fue programado para realizar solo un ciclo de tres etapas consistentes en calentamiento, mantención y enfriamiento. En este proceso se alcanzó una temperatura de 180°C y una potencia de 900 W. Los digestos se enfriaron a temperatura ambiente, se aforaron en matraces de 25 mL con agua ultra pura y se trasvasijaron a envases plásticos que se cerraron herméticamente.

IV.3.3.2. Digestión de las muestras para la cuantificación de selenio

Se masaron aproximadamente 0,2500 g de cada muestra pulverizada en viales de teflón. Luego se realizó una pre-digestión ácida de cada una de las muestras, para lo que se utilizó H_2O_2 al 30% y HNO_3 al 65%. Posteriormente se llevó a cabo la digestión en microondas, el cual fue programado para realizar dos ciclos de tres etapas consistente en calentamiento, mantención y enfriamiento. En este proceso se alcanzó una temperatura de 180°C y una potencia de 1800 W. Los digestos se enfriaron a temperatura ambiente, se aforaron en matraces de 25 mL con agua ultra pura y se trasvasijaron a envases plásticos que se cerraron herméticamente.

IV.3.4. Determinación de la concentración de mercurio y selenio total

IV.3.4.1. Determinación de la concentración de mercurio por CV-AFS

La cuantificación del metal se realizó mediante el uso de un Espectrómetro de Fluorescencia Atómica acoplado a vapor frío (CV-AFS)

En primer lugar, se preparó una curva de calibrado cuyos rangos de concentración se detallan en la tabla 12.

Tabla 12. Rango de concentraciones para curva de calibrado para mercurio.

Elemento	Concentración μL^{-1}									
Mercurio	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	

Para la técnica de vapor frío, fue se utilizó una solución de HCl 8% v/v y una solución de cloruro estañoso 2% en HCl al 10%, la que fue desgasada con argón 30 minutos antes de utilizar. Fue necesario realizar diluciones de cada muestra en tubos de 10 mL agregando 1 mL de HCl al 37% y agua ultrapura. Las condiciones del programa utilizado para la cuantificación se detallan en la tabla 13.

Tabla 13. Condiciones del programa para determinación de HgT mediante CV-AFS.

Ganancia	100
Programa de medición (s)	Periodo de retardo: 15
	Periodo de análisis: 40
	Periodo de memoria: 35
Flujos (mL min^{-1})	SnCl ₂ : 4,5
	HCl: 9
	Muestra: 9
Presión gases (Psi)	Argón: 75
	Hidrógeno: 45
Longitud de Onda (nm)	253,7

IV.3.4.2. Determinación de la concentración de selenio por HG-AFS

La cuantificación del oligoelemento se realizó mediante el uso de un Espectrómetro de Fluorescencia Atómica acoplado a la generación de hidruros (HG-AFS).

En primer lugar, se preparó una curva de calibrado cuyos rangos de concentración se detallan en la tabla 14.

Tabla 14. *Rango de concentraciones para curva de calibrado para selenio.*

Elemento	Concentración $\mu\text{g L}^{-1}$					
Selenio	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,5

Para la técnica de generación de hidruros se utilizó una solución reductora de NaBH_4 0,75% p/v en NaOH 0,2% p/v y una solución ácida de HCl 1,5 M. El método HG-AFS cuantifica Se (IV) por lo que previo a la determinación se realizó una pre-reducción de las muestras. Para esto, se tomó un volumen de muestra determinado, se le agregó HCl 37% y agua ultra pura. Posteriormente los tubos fueron calentados en placa termorregulada a 92°C por un periodo de 40 minutos, luego se les agregó nuevamente HCl 37% y se aforaron a 10 mL con agua ultra pura. Las condiciones del programa utilizado para la cuantificación se detallan en la tabla 15.

Tabla 15. *Condiciones del programa para determinación de Se mediante HG-AFS.*

Lámpara	Se
Ganancia	100
Corriente primaria (mA)	20
Corriente secundaria (mA)	25
Programa de medición (s)	Periodo de retardo: 10
	Periodo de análisis: 30
	Periodo de memoria: 30
Flujos (mL min^{-1})	NaBH_4 : 4,5
	HCl : 9
	Muestra: 9
Presión gases (Psi)	Argón: 75
	Hidrógeno: 45
Flujómetro de H_2	55
Longitud de onda (nm)	196,0

IV.4. Validación de la metodología analítica

IV.4.1. Linealidad

Para definir la linealidad del rango de trabajo empleado para cada elemento se determinó el estimador t_{cal} obtenido de acuerdo con la ecuación (1).

$$t_{cal} = \frac{|r| \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

En donde “ n ” corresponde al número de puntos de la curva de calibrado, “ r ” es el coeficiente de correlación y “ r^2 ” es el coeficiente de determinación. El método será lineal si el valor de t_{cal} es mayor que t_{tab} , obtenido por tabla considerando $(n-2)$ al 95% de probabilidad.

IV.4.2. Límite de detección (L.D.) y Límite de cuantificación (L.C.)

Los parámetros fueron determinados mediante las ecuaciones (2) y (3).

$$L. D. = \frac{3 DS_{Sbco}}{m} \quad (2) \qquad L. C. = \frac{10 DS_{Sbco}}{m} \quad (3)$$

En donde “ DS_{Sbco} ” corresponde a la desviación estándar de la señal del blanco de calibrado tras varias mediciones y “ m ” corresponde a la pendiente de la curva de calibrado obtenida mediante el programa OriginPro 8.0.

IV.4.3. Sensibilidad

Este parámetro hace referencia a la pendiente obtenida a partir de la curva de calibrado respectiva.

IV.4.4. Precisión intermedia

Se obtuvo a través de la lectura de la señal analítica de una solución obtenida a partir de soluciones patrón de mercurio y selenio preparadas en distintos días. Para

esto, se trabajó con tres niveles de concentración para cada elemento, siendo 0,2, 0,8 y 1,6 $\mu\text{g L}^{-1}$ para Hg y 0,1, 0,75 y 1,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ para Se. La validación de este parámetro se realizó a través de la evaluación del Coeficiente de Variación “%C.V.”, también denominado desviación estándar relativa “RSD”, descrito en la ecuación (4). Como criterio de aceptación se utilizó el coeficiente de variación de Horwitz (%C.V.h) descrito en la ecuación (5).

$$\%C.V. = \frac{DS}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (4) \quad \%C.V.h = 2^{(4-0,5\log C)} \quad (5)$$

Siendo “DS” la desviación estándar de las lecturas, “ \bar{X} ” al promedio de éstas y “C” a la concentración del analito expresada en mg L^{-1} .

Como criterio de aceptación el %C.V. obtenido a partir de las lecturas debe ser menor a %C.V.h. Los rangos de aceptación de %C.V.h para cada nivel de concentración de mercurio y selenio se detallan en la tabla 16.

Tabla 16. *Criterio de aceptación de C.V. de Horwitz para mercurio.*

Analito	Concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentración (mg L^{-1})	Criterio de aceptación de C.V. Horwitz (%)
Hg	0,1	0,0001	64,00
	0,8	0,0008	46,80
	1,6	0,0016	42,16
Se	0,1	0,0001	64,00
	0,75	0,0075	47,26
	1,5	0,0015	42,58

IV.4.5. Exactitud del método

Se determinó la exactitud del método mediante el análisis del Material de Referencia Certificado por la NRC, DORM-2 y DORM-4. De esta forma, se determinó el porcentaje de error o sesgo, tanto para Hg como para Se, a través de las condiciones de trabajo propuestas. El parámetro estadístico utilizado como criterio de aceptación fue el estimador t_{cal} , definido según la ecuación (6).

$$t_{cal} = \frac{|\bar{x} - \mu| \cdot \sqrt{n}}{DS} \quad (6)$$

En donde “ \bar{X} ” corresponde al promedio de la concentración determinada, “ μ ” el valor certificado, “ n ” el número de réplicas y “**DS**” la desviación estándar de las réplicas. Si el valor de t_{cal} es menor que $t_{tab}(n-1)$ al 95% de probabilidad se puede concluir que el método es exacto.

IV.5. Análisis de resultados

IV.5.1. Expresión de resultados

La concentración de los analitos se informa como μg de analito por cada 1 g de pescado seco ($\mu\text{g g}^{-1}$). Las muestras fueron analizadas por triplicado, por lo que los resultados se expresan indicando el promedio de la concentración obtenida a partir de las tres determinaciones junto con su respectiva desviación estándar, como intervalo de confianza, según la expresión (7).

$$\bar{X} \pm D.S. \quad (7)$$

IV.5.2. Estimación de parámetros para la evaluación del nivel de riesgo para la salud humana por exposición a mercurio

IV.5.2.1. Cálculo de la Proporción Molar (PM) Se:Hg

La primera mesa redonda internacional de bioindicadores en el año 2007 identificó algunos bioindicadores para la evaluación toxicológica de mercurio. Se concluyó que los residuos de Hg en los tejidos no son completamente interpretables si no se conoce los residuos de Se, por lo tanto, todos los análisis de residuos deben informar una Proporción Molar Se:Hg. La Proporción Molar se calcula mediante la división de los moles de Se por los de Hg según la ecuación (8).

$$PM \text{ Se:Hg} = \frac{\text{mol Se}}{\text{mol Hg}} \quad (8)$$

IV.5.2.2 Cálculo del Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (Selenium Health Benefit Value) (HBV_{Se})

El HBV_{Se} es un criterio de evaluación de riesgo desarrollado recientemente que permite proporcionar un índice más preciso para predecir los efectos de la exposición materna a MeHg proveniente del consumo de alimentos de origen marino, ya que considera las cantidades molares absolutas y relativas de MeHg y Se presentes (Kaneko & Ralston, 2007). En primera instancia los autores propusieron la ecuación (9).

$$Se-HVB = (Se \times [Se/Hg]) - (Hg \times [Hg/Se]) \quad (9)$$

Ralston *et al.* (2016), propusieron una nueva ecuación, ya que en la anterior la evaluación del Se-HBV se vuelve problemática cuando las concentraciones de Hg en la muestras están por debajo del límite de detección, debido a que la relación Se:Hg tiende al infinito y la relación Hg:Se tiende a cero, sobreestimando el efecto beneficioso del selenio en la muestra (Ralston *et al.*, 2016). La ecuación propuesta se denomina HBV_{Se} para distinguirla de la original y se representa según la ecuación (10).

$$HBV_{Se} = ([Se - Hg]/Se) \times (Se + Hg) \quad (10)$$

La nueva ecuación tiene la virtud de indicar con precisión la cantidad de Se en exceso de MeHg en el alimento estudiado. Ya que el Hg no secuestra cuantitativamente el Se, el HBV_{Se} proporciona un índice más conservador para establecer consideraciones de seguridad alimentaria (Ralston *et al.*, 2016).

IV.5.2.3 Cálculo del Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP)

Para realizar una evaluación del riesgo asociado a la ingesta de mercurio proveniente desde el pescado es que se calcula la ingesta semanal tolerable

provisional, para luego comparar el valor obtenido con los límites permitidos por la FAO/OMS indicados anteriormente. El cálculo se realiza según la ecuación (11).

$$\%ISTP = \frac{([Hg] \times [CPP]) / [PCP]}{ISTP} \times 100 \quad (11)$$

En donde “[Hg]” corresponde a la concentración de Hg presente en las muestras estudiadas expresado en $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso húmedo, “CPP” a la cantidad promedio de pescado (masa) que consume la población expresada en g y “PCP” al peso corporal promedio del grupo etario expresado en kg.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1. Determinación de parámetros analíticos

V.1.1. Linealidad

Para la evaluación de la linealidad se analizó la señal analítica de las soluciones patrones respectivas, utilizando el método de los mínimos cuadrados mediante el programa OriginPro 8.0. En la tabla 17 se presenta el coeficiente de correlación “ r ”, el coeficiente de determinación “ r^2 ” y el parámetro estadístico t_{cal} para Hg y Se calculado según la ecuación (1).

Tabla 17. Coeficientes de correlación, coeficientes de determinación y t_{cal} para los elementos analizados.

Analito	Rango de trabajo	r	r^2	t_{cal}	t_{tab}
Hg	0,1 – 1,6	0,9998	0,9997	129	2,570
Se	0,1 – 1,5	0,9998	0,9997	115	2,776

Considerando que t_{cal} resultó ser mayor que t_{tab} tanto para Se como para Hg es que se asume que los resultados obtenidos son estadísticamente aceptables, por lo tanto, el sistema presenta linealidad dentro del rango de concentraciones utilizado. En el anexo 3 y 4 se presentan las curvas de calibrado obtenidas para mercurio y selenio respectivamente.

V.1.2. Límite de detección (L.D.) y Límite de cuantificación (L.C.)

Los límites de detección y cuantificación para cada elemento se obtuvieron de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3) y se resumen en la tabla 18.

De la tabla 18 se concluye que ambos elementos presentan límites de detección y cuantificación aceptables para los métodos utilizados.

Tabla 18. Límites de detección y cuantificación para mercurio y selenio.

Límites de detección (L.D.) y Límites de cuantificación (L.C.)	Hg	Se
L.D. ^a	0,001	0,009
L.C. ^a	0,004	0,03
L.D. ^b	0,008	0,005
L.C. ^b	0,02	0,02
L.D. ^c	0,005	0,03
L.C. ^c	0,02	0,09

^a: Cálculo realizado en base a la señal del blanco de calibrado; ^b: Cálculo realizado en base a la señal del blanco de digestión; ^c: Cálculo referido a la muestra (en base al L.D. y L.C. del método) partiendo desde los límites del blanco de digestión (Ejemplo: $(L.D * FD^d * \text{volumen de aforo}) / \text{masa de muestra}^e$); ^d: Factor de dilución (50 para selenio y 3,33 para Hg); ^e: Masa de muestra (0,2500 para selenio y 0,125 para Hg).

V.1.3. Sensibilidad

Para ambos elementos analizados se detallan en la tabla 19 los estimadores estadísticos del intercepto “b”, pendiente “m” y sus respectivas desviaciones estándar “S_b” y “S_m”.

Tabla 19. Estimadores estadísticos de las respectivas curvas de calibrado para cada elemento analizado.

Analito	m	S _m	b	S _b
Hg	902	7,061	-11,265	6,370
Se	809	6,315	-10,724	5,242

De acuerdo con los estimadores estadísticos se concluye que la sensibilidad es adecuada para las concentraciones de mercurio y selenio presentes en la matriz a analizar y no presenta diferencias estadísticas con respecto a lo informado por el proveedor de los equipos utilizados.

V.1.4. Precisión Intermedia

En la tabla 20, se presentan los resultados de la precisión intermedia determinados a través de la ecuación (4).

Tabla 20. *Coeficientes de variación de la señal analítica para cada analito a tres concentraciones distintas.*

Analito	Concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$)	\bar{X} señal (n=6)	D.S.	%C.V.
Hg	0,2	211,35	29,01	13,73
	0,8	818,92	96,54	11,79
	1,6	1639,77	179,44	10,94
Se	0,1	78,16	3,56	4,56
	0,75	572,05	54,73	9,57
	1,5	1188,47	101,73	8,56

De la tabla se observa que los coeficientes de variación obtenidos para cada elemento, a los niveles de concentración descritos anteriormente, son menores que el criterio de aceptación de Horwitz indicado en la tabla 16. Esto permite demostrar que la lectura de la señal analítica es precisa.

V.1.5. Exactitud

En la tabla 21 se detalla la concentración del material certificado de referencia y la concentración obtenida según la metodología propuesta para la determinación de selenio y mercurio. Estos valores permitieron determinar el sesgo (% E), coeficiente de variación (%C.V.) y el estimador t_{cal} recomendado para la aplicación del test de significancia.

Tabla 21. Valores de sesgo, coeficiente de variación y el parámetro experimental t_{cal} para el análisis del material de referencia certificado DORM-2 (selenio) y DORM-4 (mercurio) determinado por CV-AFS y HG-AFS respectivamente.

Analito	Valor certificado (mg kg ⁻¹)	Valor experimental (mg kg ⁻¹)	% E	%C.V.	t_{cal}	t_{tab}
Hg	0,412 ± 0,036	0,44 ± 0,09	+6,80	20,45	0,7618	2,5706
Se	1,40 ± 0,09	1,32 ± 0,07	-5,71	5,30	2,5555	2,7764

Conforme a los resultados obtenidos es posible asegurar estadísticamente que ambos métodos son exactos desde la pesada hasta la cuantificación debido a que el parámetro t_{cal} para cada analito resultó ser inferior a t_{tab} .

V.2. Concentración de mercurio y selenio total

Las concentraciones de mercurio y selenio total determinadas mediante las técnicas de CV-AFS y HG-AFS respectivamente, se obtuvieron a través de la determinación de la concentración de ambos analitos para cada individuo por triplicado. Luego se calculó un promedio por especie con su respectivo intervalo de confianza para cada una de las regiones. Estos resultados se presentan en la tabla 22. Las concentraciones promedio de mercurio y selenio de cada individuo se adjuntan en el anexo 5.

Tabla 22. Concentraciones promedio de mercurio y selenio según región y especie.

Región	Especie	n	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.	[Se] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.
Arica y Parinacota (XV)	Albacora	1	$0,83 \pm 0,07$	$2,47 \pm 0,03$
	Bilagay	4	$0,5 \pm 0,2$	$0,89 \pm 0,07$
	Bonito	3	$0,3 \pm 0,2$	$2,00 \pm 0,9$
	Dorado	1	$0,200 \pm 0,009$	$1,95 \pm 0,02$
	Rollizo	3	$0,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$
Tarapacá (I)	Bilagay	3	$0,4 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$
	Congrio Colorado	5	$0,2 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
	Dorado	3	$0,24 \pm 0,03$	$1,81 \pm 0,07$
	Rollizo	5	$0,5 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,4$
	Vieja	3	$0,9 \pm 0,1$	$2,00 \pm 0,09$
Antofagasta (II)	Bilagay	3	$0,69 \pm 0,07$	$1,4 \pm 0,2$
	Congrio Colorado	4	$0,21 \pm 0,06$	$2,1 \pm 0,7$
	Rollizo	2	$0,5 \pm 0,4$	$1,498 \pm 0,003$
Atacama (III)	Bilagay	8	$0,8 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$
	Cojinova	6	$0,3 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,2$
	Congrio Colorado	17	$0,7 \pm 0,3$	3 ± 1
	Corvina	4	$0,5 \pm 0,4$	$1,3 \pm 0,2$
	Dorado	3	$0,22 \pm 0,06$	$1,78 \pm 0,09$
	Rollizo	8	$0,5 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,6$
	Vieja	1	$0,259 \pm 0,008$	$1,45 \pm 0,02$
Valparaíso (V)	Congrio Colorado	2	$0,12 \pm 0,09$	$1,3 \pm 0,4$
	Rollizo	2	$0,182 \pm 0,006$	$1,0 \pm 0,2$

V.2.1. Concentración de mercurio y selenio total según región

De acuerdo con la figura 3, se puede apreciar que en la XV región, la albacora fue la especie que presentó la mayor concentración de mercurio ($0,83 \pm 0,07 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), mientras que en orden decreciente le siguieron, el bilagay, el rollizo, el bonito y el dorado ($0,200 \pm 0,009 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.). Cabe destacar que en el caso de la albacora y el dorado el 'n' muestral es igual a 1, mientras que para las otras especies el 'n' varió

entre 3 y 4. En relación con las concentraciones de selenio, la albacora resultó ser nuevamente la especie con mayor concentración ($2,47 \pm 0,03 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), seguida por el bonito, el dorado, el rollizo y el bilagay ($0,89 \pm 0,07 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.).

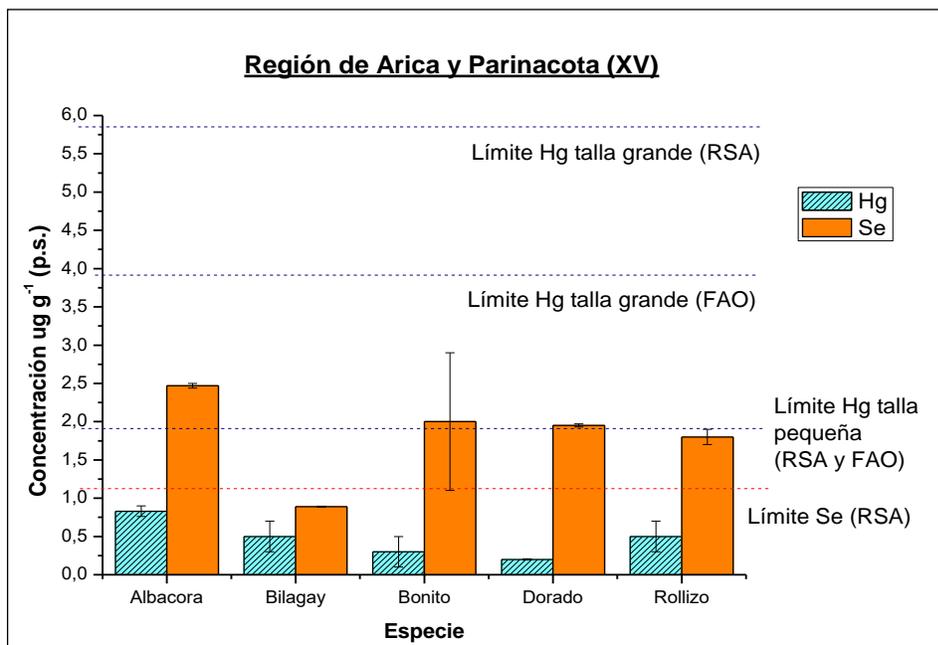


Figura 3. Concentraciones de mercurio y selenio de las especies muestreadas en la región de Arica y Parinacota.

En la figura 4, se observa que en la I región la especie con mayor concentración de mercurio correspondió a la vieja ($0,9 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) seguida por el rollizo, el bilagay, el dorado y congrio colorado ($0,2 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) en orden decreciente. Con respecto al selenio, la especie con mayor concentración correspondió al rollizo ($2,3 \pm 0,4 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), seguido por la vieja, el congrio colorado, el dorado y el bilagay ($1,3 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) en orden decreciente.

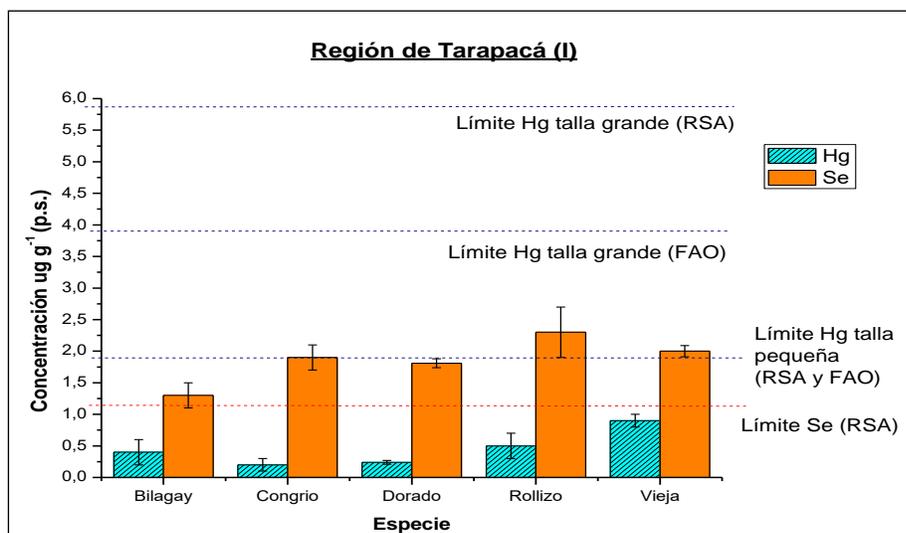


Figura 4. Concentraciones de mercurio y selenio de las especies muestreadas en la región de Tarapacá.

Con respecto a la II región, de la figura 5 se desprende que la especie con mayor concentración de mercurio fue el bilagay ($0,69 \pm 0,07 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), seguido por el rollizo y luego el congrio colorado ($0,2 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), mientras que, en cuanto al selenio, la especie con mayor concentración fue el congrio colorado ($2,1 \pm 0,7 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) seguido por el rollizo y por último el bilagay ($1,4 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.).

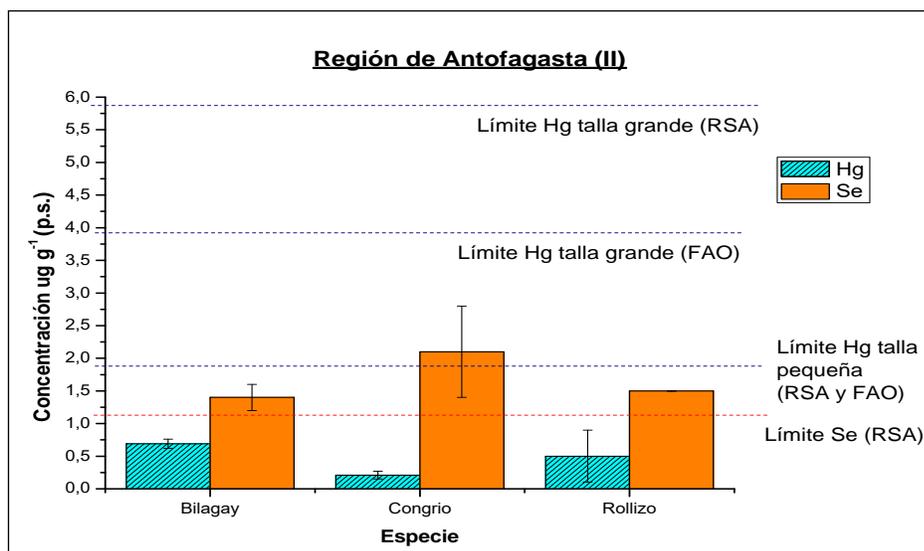


Figura 5. Concentraciones de mercurio y selenio de las distintas especies muestreadas en la región de Antofagasta.

En la III región, de acuerdo con la figura 6, la mayor concentración de mercurio se encontró en el bilagay ($0,8 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), seguido en orden decreciente por el congrio colorado, la corvina, el rollizo, la cojinova, la vieja y el dorado ($0,22 \pm 0,06 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.). Por otro lado, en cuanto al selenio, la concentración más elevada se encontró en el congrio colorado ($3 \pm 1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), seguido por la cojinova, el dorado, el rollizo, el bilagay, la vieja y finalmente la corvina ($1,3 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.).

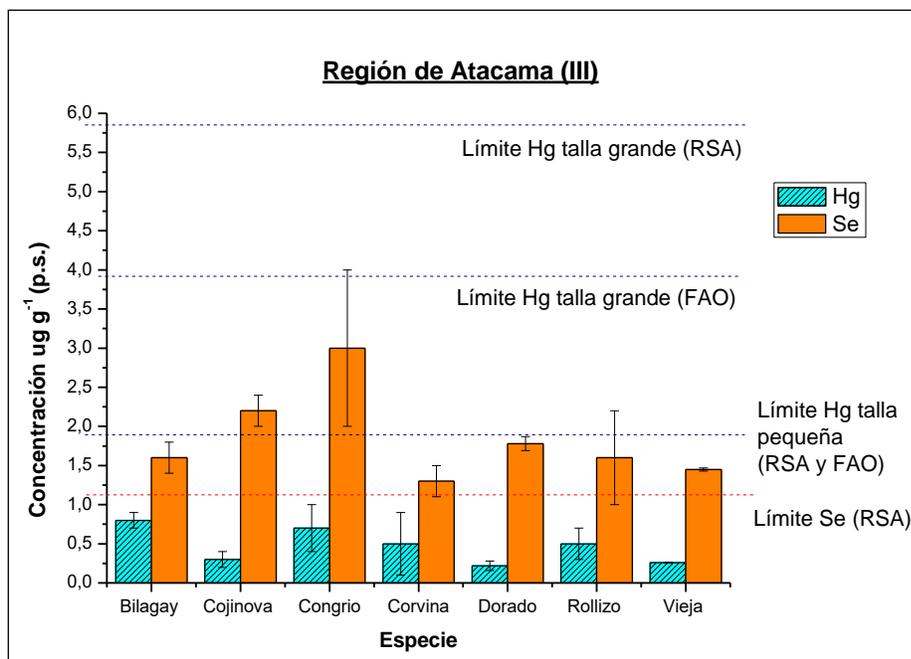


Figura 6. Concentraciones de mercurio y selenio de las distintas especies muestreadas en la región de Atacama.

Finalmente, como lo señala la figura 7, en la V región, el rollizo ($0,182 \pm 0,006 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) presentó la mayor concentración de mercurio y el congrio colorado la menor ($0,12 \pm 0,09 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.). En cuanto a las concentraciones de selenio, sucedió lo contrario, ya que fue el congrio el que presentó la mayor concentración ($1,3 \pm 0,4 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) y el rollizo la menor ($1,0 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.).

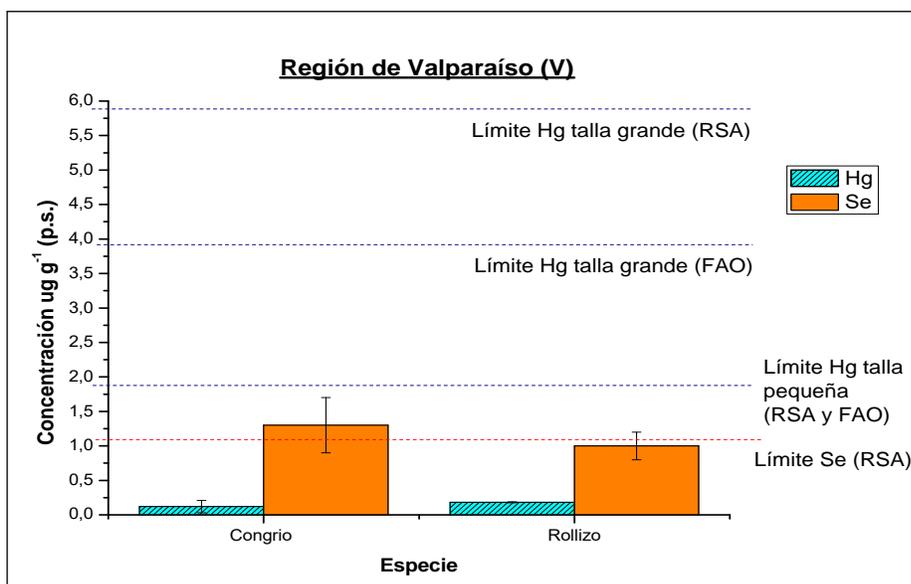


Figura 7. Concentraciones de mercurio y selenio de las distintas especies muestreadas en la región de Valparaíso.

V.2.2. Concentración de mercurio y selenio total según especie.

A partir de los resultados obtenidos fue posible identificar diferencias en las concentraciones de mercurio y selenio entre especies, de acuerdo con la zona geográfica desde donde se extrajeron.

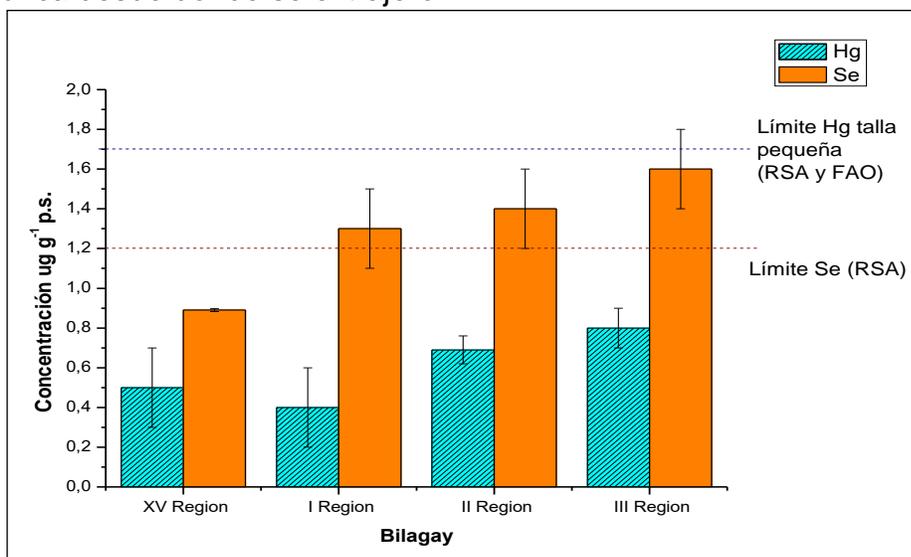


Figura 8. Concentraciones de mercurio y selenio del bilagay según región.

De acuerdo con la figura 8, en el bilagay las concentraciones de mercurio son relativamente variables, hallándose la más baja en la I región ($0,4 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) y la más elevada en la III región ($0,8 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.). Con respecto al selenio, se observaron concentraciones crecientes a medida que se avanzaba hacia el centro del país ($0,89 \pm 0,07$ a $1,6 \pm 0,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.). Se destaca que existió variabilidad intra individuos.

En la figura 9 se describe el caso del congrio colorado, el cual presentó una mayor concentración de mercurio en la III región ($0,7 \pm 0,3 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) en comparación con las regiones I, II y V. En cuanto al selenio, la concentración más alta también corresponde a los individuos de la III región ($3 \pm 1 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), destacándose, una importante variabilidad intra individuos en todas las regiones.

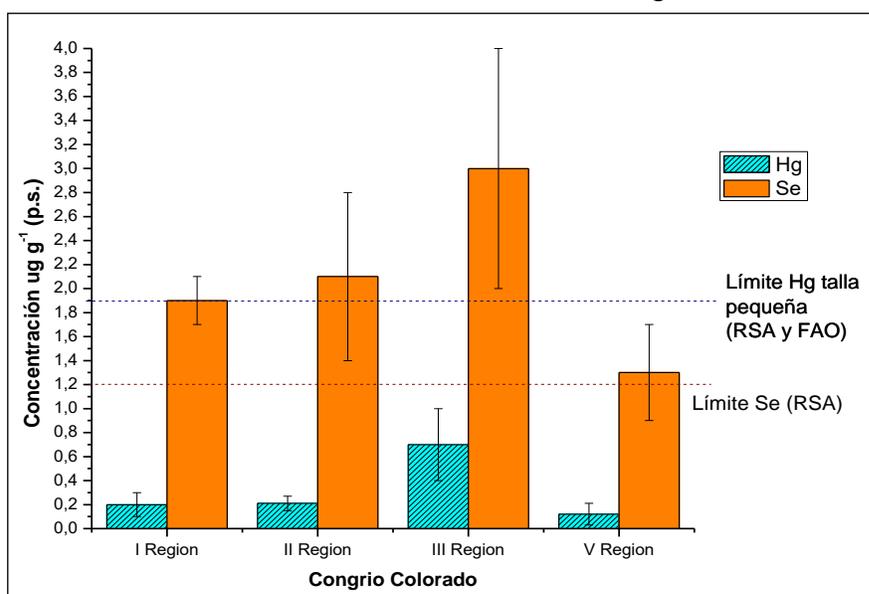


Figura 9. Concentraciones de mercurio y selenio del congrio colorado según región.

Con respecto al dorado, en la figura 10 se observa que tanto las concentraciones de mercurio ($0,200 \pm 0,009$ a $0,24 \pm 0,03 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) y selenio ($1,78 \pm 0,09$ a $1,78 \pm 0,09 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) fueron bastante similares en todas las regiones desde donde fue muestreado y además hubo menor variabilidad intra individuos.

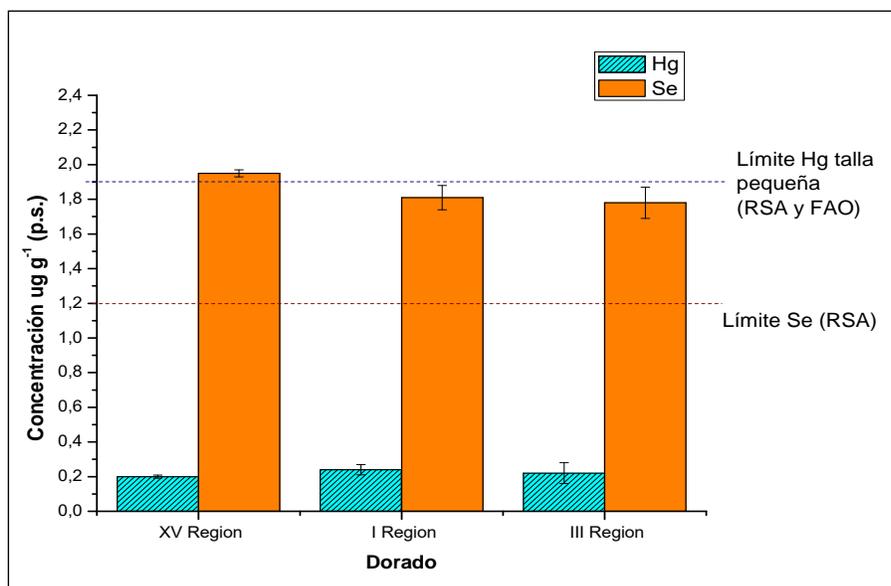


Figura 10. Concentraciones de mercurio y selenio del dorado según por región.

En la figura 11, se observa que las concentraciones de mercurio fueron bastante homogéneas entre las regiones XV, I, II y III ($0,5 \pm 0,2$ a $0,5 \pm 0,4 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), excepto por los individuos de las V región ($0,182 \pm 0,006 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.), lugar donde se encontraron las concentraciones más bajas. Las concentraciones de selenio, por otro lado, fueron variables de acuerdo con la región ($1,0 \pm 0,2$ a $2,3 \pm 0,4 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.).

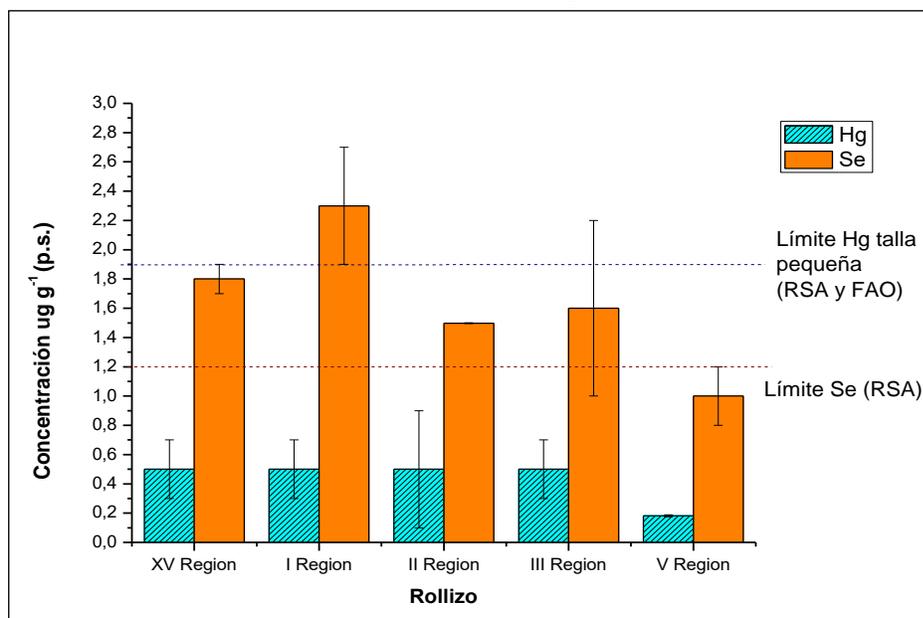


Figura 11. Concentraciones de mercurio y selenio del rollizo según región.

En la figura 12, se observa que en la vieja hubo diferencias de concentración, hallándose la más elevada, tanto de mercurio como de selenio ($0,9 \pm 0,1$ y $2,00 \pm 0,09 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s. respectivamente) en la I región y las más bajas en la III región ($0,259 \pm 0,008$ [Hg] y $1,45 \pm 0,02$ [Se] $0,09 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s.) Se debe considerar que el 'n' muestral en ésta última región correspondió a solo un individuo.

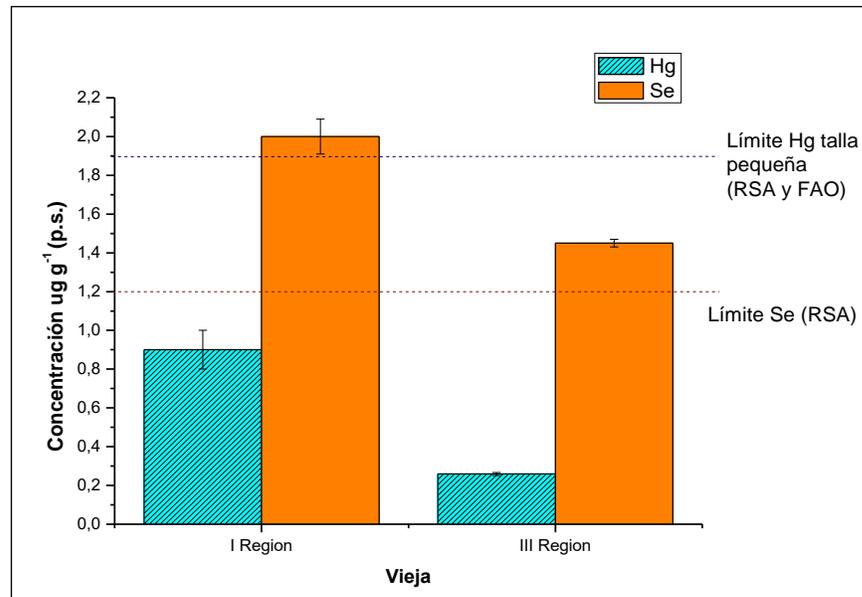


Figura 12. Concentraciones de mercurio y selenio de la vieja según región.

En especies como la albacora, el bonito, la cojinova y la corvina no se pudo realizar este tipo de análisis debido a que estas especies fueron muestreadas en una sola región.

A partir de los resultados expuesto se puede visualizar a grandes rasgos que entre las especies con mayor contenido de mercurio figuran la albacora en la XV región, la vieja en la III, el bilagay en la II y los congrios en la III. Además, se distingue que en cuanto a las concentraciones de cada analito, no se observó un patrón, ya que en general la especie con mayor contenido de mercurio no necesariamente poseía la mayor concentración de selenio y viceversa. Las causas por las cuales las concentraciones de mercurio pueden variar se pueden atribuir a la disponibilidad de alimento a la que tienen acceso los animales y a su contenido de mercurio, la forma química y la concentración de mercurio disuelta en las aguas, la especie de pez, su

nivel en la cadena trófica, talla, sexo y tasa de crecimiento (Gardner, 1978). En este sentido, la albacora es un pez de gran tamaño que se alimenta principalmente de cefalópodos, peces y crustáceos (Ibáñez *et al.*, 2014) y que se encuentra a un mayor nivel en la cadena trófica (López, 2016) por lo que debido a los procesos de biomagnificación es razonable que posea una concentración de mercurio mayor en comparación al universo de especies estudiadas en este trabajo. Por otro lado, el bilagay y el rollizo poseen una dieta a base de moluscos y crustáceos (Medina *et al.*, 2004), el congrio se alimenta a base de crustáceos (Chong *et al.*, 2006), el bonito fundamentalmente de sardinas y larvas de crustáceos y la vieja principalmente de equinodermos, moluscos, crustáceos y peces (Moreno, 1972; Fuentes, 1982; Vargas *et al.*, 1999). Esta información permite suponer que las diferencias en las concentraciones de mercurio estarían más relacionadas con la edad del pez o su locación geográfica, la cual puede ser una zona más o menos impactada por este metal.

En relación con el cumplimiento de las normas nacionales e internacionales de concentración de mercurio permitida en alimentos de origen marino, la totalidad de las muestras estudiadas cumplen tanto la norma de la FAO/OMS como la del RSA. En ambos casos la norma corresponde a $0,5 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.h.}$ para peces de tamaño pequeño (FAO/OMS, 2017; MINSAL 2017) mientras que, para los peces de gran tamaño, como la albacora, la FAO admite un máximo de $1,0 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.h.}$ (FAO/OMS, 2017) y el RSA un máximo de $1,5 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.h.}$ (MINSAL, 2017). Para la interpretación de los resultados fue necesario realizar una conversión de la norma desde peso húmedo a peso seco, debido a que los resultados en este trabajo se expresan como peso seco. Para la conversión se estimó un porcentaje de humedad promedio para pescados magros y grasos de 74,2% (Durazo, 2006), por lo tanto, de acuerdo con la conversión realizada la concentración máxima permitida en peces pequeños, tanto por la FAO como el RSA, se estableció en $1,9 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.s.}$ mientras que la máxima permitida en peces grandes es de $3,9 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.s.}$ por la FAO y de $5,9 \mu\text{g g}^{-1} \text{Hg p.s.}$ por el RSA. Siguiendo esta línea, en el año 2012 el

MINSAL ordenó al Instituto de Salud Pública de Chile (ISP) analizar las concentraciones de mercurio y cadmio de distintos pescados de consumo nacional en el marco del Plan de Vigilancia Nacional de Metales Pesados en Productos del Mar. En dicho análisis se incluyeron seis especies que fueron estudiadas en este trabajo, las que corresponden a albacora, bilagay, congrio colorado, corvina, cojinova y rollizo presentando todas ellas concentraciones menores que el límite establecido por el RSA (ISP, 2012; Raimann, 2014), por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con dichos datos. En el anexo 6 se adjuntan los resultados del ISP publicados por Raimann en 2014.

Con respecto a las variaciones de concentración de selenio entre especies, se conoce que los peces pueden absorber selenio desde el agua (a través de las branquias, epidermis o intestino), plantas u otras especies marinas, siendo la vía alimenticia, mediante el consumo de fitoplancton y zooplancton más importante que la absorción a través del agua (Sandholm *et al.*, 1973), por lo tanto, las concentraciones de selenio en los individuos pueden variar de acuerdo con su alimentación y la zona donde habiten, ya que puede ser un lugar más o menos enriquecido en este oligoelemento.

Referente al cumplimiento de normas de concentración máxima de selenio, el RSA establece un límite de $0,3 \mu\text{g g}^{-1}$ p.h (MINSAL, 2017). Este valor también debió ser convertido a peso seco de la misma forma que se hizo con la norma de mercurio, de esta manera el límite se estipuló en $1,2 \mu\text{g g}^{-1}$ p.s. De acuerdo con esto, solo el bilagay en la XV región y rollizo en la V región cumplen con dicho límite. En este sentido es destacable mencionar que, en el RSA, los límites de concentración permitidos resultan ser más restrictivos para el selenio que para mercurio. Si bien el selenio fue considerado como un elemento altamente tóxico y contaminante desde su descubrimiento en 1817 (Sager, 2006), a partir de la segunda mitad del siglo XX se le comenzaron a atribuir funciones esenciales para la salud humana y animal (Rayman, 2000) siendo considerado hoy en día como un elemento esencial para los seres vivos (Ross *et al.*, 2012). También se debe mencionar que el margen entre su

toxicidad y su deficiencia es muy estrecho (Navarro Alarcón & Cabrera Vique, 2008), lo cual podría estar relacionado con lo estricto de la norma. Otro punto a considerar es que en el RSA, la norma no distingue entre tipos de alimentos, limitándose a diferenciar solo entre sólidos y líquidos, lo cual no considera que una de las mayores fuentes de selenio corresponde a los pescados (Raymann, 2008).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, sería interesante que las entidades pertinentes del país realizaran una revisión sobre el límite máximo permitido de selenio con el fin de actualizar esta norma considerando su papel como oligoelemento, su estrecho margen y la fuente desde donde proviene.

V.3. Proporción Molar (PM) Se:Hg y Valor de Selenio Beneficio para la Salud (HBV_{Se})

V.3.1. Proporción Molar (PM) Se:Hg

La PM Se:Hg, se obtuvo a partir de la división de las concentraciones promedio de mercurio y selenio de cada individuo, obtenidas por triplicado (anexo 5), por su masa atómica respectiva, la que corresponde a 200,59 g mol⁻¹ para Hg y 78,96 g mol⁻¹ para Se (ICPS, 2018). Una vez hecho esto, se aplicó la ecuación (8) para cada individuo y posteriormente se calculó un promedio de PM Se:Hg, con su respectivo intervalo de confianza, por especie para cada región. En la tabla 23 se presentan los resultados del cálculo de PM Se:Hg.

Tabla 23. Proporción Molar Se:Hg y Valor de Selenio Beneficioso para la Salud.

Región	Especie	n	nmol g ⁻¹ Hg	nmol g ⁻¹ Se	PM Se:Hg	HBV _{Se}
XV	Albacora	1	4,2 ± 0,3	31 ± 0,4	7,6 ± 0,7	31 ± 0,5
	Bilagay	4	2,3 ± 0,8	11,2 ± 0,9	5 ± 2	11 ± 1
	Bonito	3	1 ± 1	25 ± 12	22 ± 7	25 ± 12
	Dorado	1	0,10 ± 0,04	25 ± 0,3	25 ± 1	25 ± 0,4
	Rollizo	3	2,6 ± 0,9	23 ± 2	9 ± 2	22 ± 1
I	Bilagay	3	2 ± 1	16 ± 3	9 ± 6	16 ± 3
	Congrio Colorado	5	0,9 ± 0,5	24 ± 2	32 ± 13	24 ± 2
	Dorado	3	1,2 ± 0,1	22,9 ± 0,8	20 ± 2	22,9 ± 0,8
	Rollizo	5	2,6 ± 0,9	29 ± 5	13 ± 6	29 ± 5
	Vieja	3	4,5 ± 0,6	25 ± 1	6 ± 0,6	25 ± 1
II	Bilagay	3	3,4 ± 0,4	18 ± 2	5 ± 1	18 ± 2
	Congrio Colorado	4	1,0 ± 0,3	26 ± 9	25 ± 4	26 ± 9
	Rollizo	2	2 ± 2	18,98 ± 0,04	10 ± 7	18,98 ± 0,04
III	Bilagay	8	4 ± 0,6	20 ± 2	5 ± 1	20 ± 2
	Cojinova	6	1,6 ± 0,7	28 ± 2	21 ± 9	28 ± 2
	Congrio Colorado	17	3 ± 1	39 ± 15	12 ± 4	39 ± 15
	Corvina	4	2 ± 2	17 ± 2	11 ± 9	17 ± 2
	Dorado	3	1,1 ± 0,3	22 ± 1	22 ± 6	22 ± 1
	Rollizo	8	2 ± 1	20 ± 7	10 ± 6	20 ± 7
	Vieja	1	1,29 ± 0,04	18 ± 0,3	14 ± 0,8	18 ± 0,5
V	Congrio Colorado	2	0,6 ± 0,4	17 ± 6	34 ± 16	17 ± 7
	Rollizo	2	0,91 ± 0,03	13 ± 3	14 ± 3	13 ± 3

La PM Se:Hg es una medida de la exposición a mercurio (Henshel *et al.*, 2007). Algunos autores han sugerido que un exceso molar de Se, es decir una Proporción Molar Se:Hg > 1, confiere protección contra la toxicidad de Hg derivada del consumo de productos marinos (Burger & Gochfel, 2013), por lo tanto, debería ser considerado para la evaluación de riesgo a mercurio (Ralston & Raymond, 2010).

En relación con los resultados expuestos en la tabla 23 todas las especies muestreadas presentaron una PM Se:Hg > 1, observándose un rango entre 5 ± 1 y 34 ± 16 . En la XV región, la PM Se:Hg más alta correspondió al dorado (25 ± 1), seguido por el bonito, la albacora y el bilagay. En la I región, el congrio presentó la mayor PM Se:Hg (32 ± 13) seguido por el dorado, el rollizo, el bilagay y la vieja. En la II región, el congrio fue nuevamente la especie con mayor PM Se:Hg (25 ± 4) seguido por el rollizo y después el bilagay. En la III región, el dorado fue la especie con mayor PM Se:Hg (22 ± 6) seguido por la cojinova, la vieja, el congrio, la corvina, el rollizo y el bilagay en orden decreciente. Finalmente, en la V región la mayor PM Se:Hg correspondió al congrio (34 ± 16) seguido por el rollizo.

En la figura 13 se señala la PM Se:Hg promedio para cada especie sin su intervalo de confianza para un análisis más simple. De acuerdo con esto, el bilagay fue una de las especies con menor PM Se:Hg entre regiones, oscilando en un rango entre 5 ± 1 y 9 ± 6 . En este caso se observó que sus concentraciones de mercurio son distintas entre regiones, sin embargo, las concentraciones de selenio no fueron las

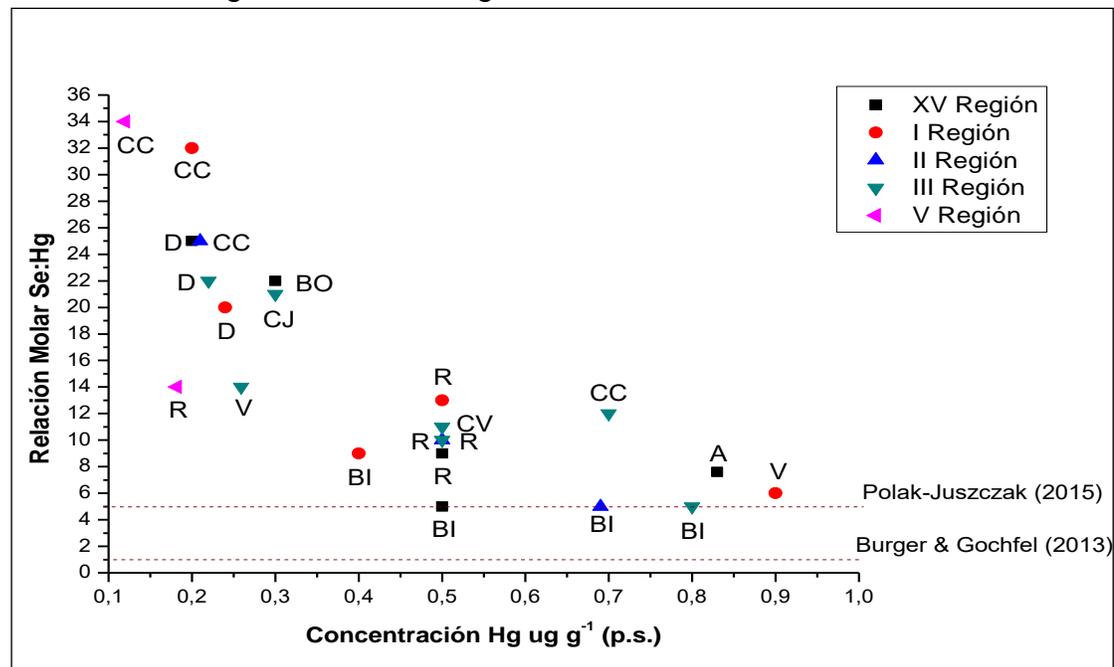


Figura 13. Proporción Molar Se:Hg según especie y región, sin intervalo de confianza. A albacora, BI bilagay, BO bonito, CC congrio colorado, CJ cojinova, CV corvina, D dorado, R rollizo, V vieja.

suficientes para elevar la PM. A pesar de que la albacora fue la especie con mayor concentración de mercurio, el bilagay presentó una menor Proporción Molar comparado con ésta debido a su menor contenido de selenio. Para la vieja, el rango varió entre $6 \pm 0,6$ y $14 \pm 0,8$ siendo los individuos pertenecientes a la primera región los que presentaron una PM Se:Hg promedio menor a la del individuo muestreado en la III región, lo cual coincide con sus concentraciones promedio de mercurio.

Por otro lado, los rollizos presentaron una PM Se:Hg que varió entre 9 ± 2 y 14 ± 3 , encontrándose la mayoría de ellos agrupados debido a su similar concentración de mercurio y selenio. Solo los individuos de la V región no se ubicaron en el mismo lugar en la figura, ya que su concentración promedio del metal pesado fue menor. A pesar de esto su PM Se:Hg igualmente fue similar a los rollizos de las otras regiones. El dorado, fue una de las especies con una PM Se:Hg más alta ($20 \pm 2 - 25 \pm 1$), ya que sus concentraciones de mercurio fueron bajas y las de selenio elevadas. En el congrio colorado, se observó más variabilidad, siendo el rango de PM Se:Hg entre 12 ± 4 y 34 ± 16 . En la figura los congrios se ubicaron más dispersos, ya que los pertenecientes a la III región contenían una mayor concentración de mercurio que los otros congrios muestreados. El bonito y la cojinova también presentaron una elevada PM Se:Hg (22 ± 7 y 21 ± 9 respectivamente), mientras que la corvina obtuvo una PM Se:Hg de 11 ± 9 , similar a los rollizos. Cabe destacar que tal como hubo variabilidad en las concentraciones de mercurio y selenio entre los individuos pertenecientes a una misma región, en este caso es posible observar lo mismo, tal como indican con los intervalos de confianza respectivos.

Ya que la Proporción Molar Se:Hg considera los moles de cada uno de los elementos, ocurre que a pesar de que una especie pueda presentar elevadas concentraciones de mercurio su PM Se:Hg no necesariamente será menor comparado con el de las especies que presentan menores concentraciones del metal pesado, ya que si las concentraciones de selenio son más elevadas aumenta la PM Se:Hg. Por lo tanto, el orden decreciente en el que se exponen las especies

de acuerdo con su PM no corresponde al orden en que se presentaron en el punto V.2.1 y V.2.2.

Según la revisión bibliográfica realizada, no se encontraron publicaciones con respecto a determinación de Proporción Molar Se:Hg para especies de las costas chilenas, por lo tanto no es posible realizar un análisis comparativo a nivel nacional. Por otro lado, aunque a nivel internacional las especies que han sido objeto de estos estudios no son las mismas, Ralston & Raymond (2010) demostraron que el selenio disminuye los efectos tóxicos del MeHg cuando la Proporción Molar Se:Hg es mayor que 1:1. Polak-Juszczak (2015) adoptó un rango más riguroso para evaluar los efectos protectores del selenio, estableciendo una Proporción Molar Se:Hg > 5. De acuerdo con estos antecedentes, todas las especies analizadas en este trabajo cumplen con una PM Se:Hg > 5, por lo que no representarían un riesgo a mercurio para la población a través del consumo de pescados, sin embargo, a través de la evaluación de este parámetro, es posible diferenciar especies que podrían ser más seguras que otras al presentar una Proporción Molar Se:Hg más elevada. De acuerdo con esto, especies como el dorado, la cojinova, el bonito y algunos congrios ofrecerían más efectos protectores que la albacora, los bilagay y rollizos.

V.3.2. Valor de Selenio Beneficioso para la Salud (HBV_{Se})

El cálculo del HBV_{Se} se obtuvo por la división de las concentraciones promedio de selenio y mercurio de cada individuo, obtenida por triplicado (anexo 5), por la masa atómica respectiva. Luego se aplicó la ecuación (9) para cada individuo y posteriormente se calculó un promedio de HBV_{Se} por especie para cada región. Estos valores se detallan en la tabla 13. En relación con los resultados obtenidos, el HBV_{Se} varió entre 11 ± 1 y 39 ± 15 .

En la figura 14 se observa el valor de HBV_{Se} de las especies pertenecientes a la XV y I región. En el caso de la XV región, la albacora fue la especie con mayor HBV_{Se} seguido por el dorado, el bonito, el rollizo y el bilagay. En la I región, fue el rollizo el

que presentó el HBV_{Se} más elevado seguido por la vieja, el congrio, el dorado y luego el bilagay.

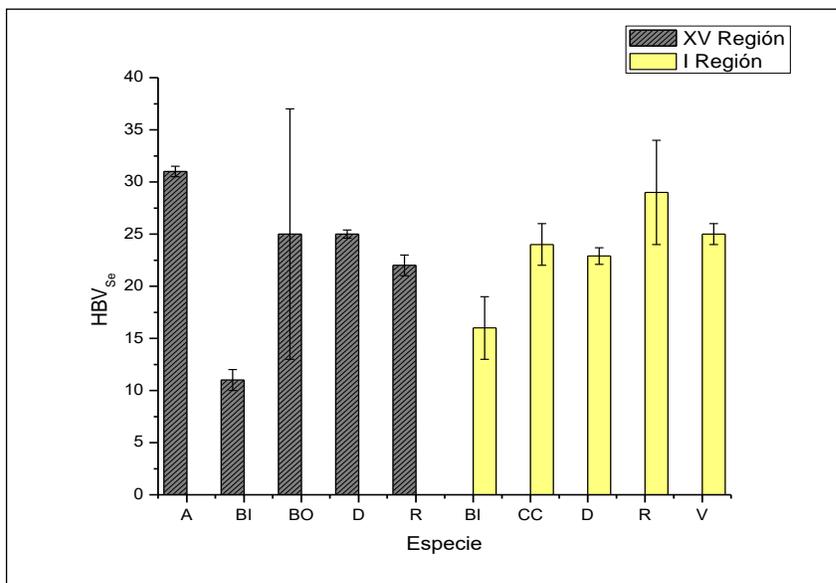


Figura 14. Valor de Selenio Beneficioso para la Salud de las especies pertenecientes a la XV y I región. *A* albacora, *BI* bilagay, *BO* bonito, *D* dorado, *R* rollizo, *CC* congrio colorado, *V* vieja.

Mientras que en la figura 15 se observa el HBV_{Se} de las especies pertenecientes a la II, III y V región. Con respecto a la II región en orden decreciente fue el congrio, seguido por el rollizo y el bilagay, mientras que en la III región nuevamente fue el congrio la especie con mayor HBV_{Se} , al cual le siguió la cojinova, el dorado, el bilagay, el rollizo, la vieja y la corvina. Finalmente, en la V región la especie HBV_{Se} más elevado fue el congrio seguido por el rollizo.

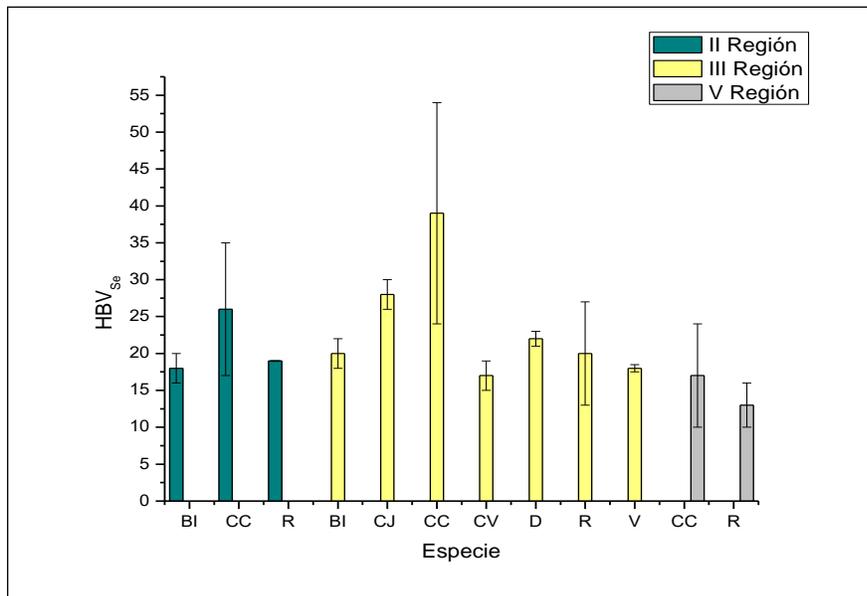


Figura 15. Valor de Selenio Beneficioso para la Salud de las especies pertenecientes a la I, II y III región. *BI* bilagay, *CC* congrio colorado, *R* rollizo, *CJ* cojinova, *CO* Corvina, *D* dorado, *V* vieja.

El Valor de Selenio Beneficioso para la Salud es un criterio de evaluación de riesgo desarrollado recientemente que permite relacionar la exposición a MeHg con la ingesta dietética de selenio. Considerando que el selenio y mercurio dietéticos tienen efectos opuestos sobre el estado de selenio y las actividades de la selenoenzima cerebral el HBV_{Se} proporciona un índice útil para predecir los efectos de la exposición MeHg principalmente en gestantes (Ralston *et al.*, 2016).

Un valor de HBV_{Se} positivo cuando la cantidad de Se presente en el pez es mayor a la de Hg indicando que los riesgos a la salud provocados por la ingesta de este compuesto son compensados por el Se, mientras que se obtienen valores negativos cuando la cantidad de Hg es superior a la de Se, por lo tanto, el consumo de ese alimento particular no ofrece protección contra los efectos del MeHg (Ralston *et al.*, 2016). Ya que todas las especies analizadas durante este trabajo presentaron un HBV_{Se} positivo se presume que ninguna de ellas representa un riesgo para la población, aunque se pueden notar diferencias entre especies que parecen ser más

beneficiosas que otras, como por ejemplo, el bonito, el dorado y algunos congrios, ya que aportarían mayores concentraciones de selenio.

Un caso paradójico ocurre en la albacora, ya que es una de las especies con mayor concentración de mercurio en este trabajo, sin embargo, posee un alto HBV_{Se} , lo que se explica porque también posee una alta concentración de selenio, y ya que este parámetro es dependiente de la concentración de este elemento es que el valor de HBV_{Se} aumenta.

Por otro lado, el rollizo, fue una de las especies que presentó menor HBV_{Se} , lo que se asemeja a lo observado al momento de evaluar esta especie pero en el contexto de Proporción Molar Se:Hg.

V.4. Estimación del Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional (% ISTP)

Para el cálculo del Porcentaje de ISTP se necesitó realizar una conversión de la concentración de mercurio desde peso seco a peso húmedo considerando una humedad promedio para pescados grasos y magros del 74,2% (Durazo, 2006). Debido a que en este estudio no se realizó especiación, es que se calculó el porcentaje de MeHg contenido en las muestras considerando que el 90% del mercurio presente en especies marinas corresponde a la forma orgánica (González *et al.*, 2014). De esta manera, el cálculo del Porcentaje de ISTP se realizó en base a la norma para MeHg (1,6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ p.c./semana). El Porcentaje de ISTP fue calculado para hombres, mujeres y niños, utilizando pesos corporales promedio de 70 kg para el hombre, 60 kg en la mujer y 15,5 kg en niños de 4 años (Ordiano-Flores, 2009) y considerando una ingesta de productos marinos de una o dos porciones semanales. Una porción en adultos corresponde a 4 onzas (112 g) mientras que en los niños corresponde a 2 onzas (56 g) (FDA, 2017). El Porcentaje de ISTP para cada grupo etario se indica en la tabla 24.

Tabla 24. *Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional para hombres, mujeres y niños.*

Hombre							
Región	n Regional	Especie	n	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	[MeHg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	% ISTP 1 porción semana	% ISTP 2 porción semana
XV	12	Albacora	1	0,21 \pm 0,02	0,19 \pm 0,02	19,15	38,31
		Bilagay	4	0,12 \pm 0,04	0,11 \pm 0,04	10,68	21,36
		Monito	3	0,07 \pm 0,06	0,06 \pm 0,05	6,25	12,51
		Dorado	1	0,051 \pm 0,002	0,046 \pm 0,002	4,64	9,28
		Rollizo	3	0,14 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	12,23	24,46
I	19	Bilagay	3	0,11 \pm 0,06	0,10 \pm 0,05	10,11	20,22
		Congrio Colorado	5	0,05 \pm 0,03	0,04 \pm 0,02	4,41	8,82
		Dorado	3	0,06 \pm 0,009	0,055 \pm 0,008	5,46	10,92
		Rollizo	5	0,13 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	12,00	24,01
		Vieja	3	0,23 \pm 0,03	0,21 \pm 0,03	20,95	41,91
II	9	Bilagay	3	0,18 \pm 0,02	0,2 \pm 0,02	16,00	32,00
		Congrio Colorado	4	0,05 \pm 0,01	0,05 \pm 0,01	4,81	9,62
		Rollizo	2	0,13 \pm 0,09	0,12 \pm 0,09	12,28	12,28
III	47	Bilagay	8	0,21 \pm 0,03	0,19 \pm 0,03	18,61	37,22
		Cojinova	6	0,08 \pm 0,04	0,08 \pm 0,03	7,53	15,05
		Congrio Colorado	17	0,2 \pm 0,07	0,16 \pm 0,06	15,65	31,30
		Corvina	4	0,1 \pm 0,1	0,12 \pm 0,09	11,65	23,30
		Dorado	3	0,06 \pm 0,02	0,05 \pm 0,01	5,07	10,14
		Rollizo	8	1,3 \pm 0,05	0,12 \pm 0,05	11,56	23,12
		Vieja	1	0,066 \pm 0,002	0,060 \pm 0,002	5,98	11,95
V	4	Congrio Colorado	2	0,03 \pm 0,02	0,03 \pm 0,02	2,71	5,43
		Rollizo	2	0,047 \pm 0,002	0,047 \pm 0,002	4,27	8,54

Continuación tabla 24. Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional para hombres, mujeres y niños.

Mujer							
Región	n Regional	Especie	n	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	[MeHg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	% ISTP 1 porción semana	% ISTP 2 porción semana
XV	12	Albacora	1	0,21 \pm 0,02	0,19 \pm 0,02	22,35	44,69
		Bilagay	4	0,12 \pm 0,04	0,11 \pm 0,04	12,46	24,92
		Monito	3	0,07 \pm 0,06	0,06 \pm 0,05	7,30	14,59
		Dorado	1	0,051 \pm 0,002	0,046 \pm 0,002	5,41	10,82
		Rollizo	3	0,14 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	14,27	28,54
I	19	Bilagay	3	0,11 \pm 0,06	0,10 \pm 0,05	11,79	23,58
		Congrio Colorado	5	0,05 \pm 0,03	0,04 \pm 0,02	5,15	10,30
		Dorado	3	0,06 \pm 0,009	0,055 \pm 0,008	6,37	12,74
		Rollizo	5	0,13 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	14,01	28,01
		Vieja	3	0,23 \pm 0,03	0,21 \pm 0,03	24,45	48,89
II	9	Bilagay	3	0,18 \pm 0,02	0,2 \pm 0,02	18,67	37,33
		Congrio Colorado	4	0,05 \pm 0,01	0,05 \pm 0,01	5,61	11,23
		Rollizo	2	0,13 \pm 0,09	0,12 \pm 0,09	14,32	28,65
III	47	Bilagay	8	0,21 \pm 0,03	0,19 \pm 0,03	21,71	43,42
		Cojinova	6	0,08 \pm 0,04	0,08 \pm 0,03	8,78	17,56
		Congrio Colorado	17	0,2 \pm 0,07	0,16 \pm 0,06	18,26	36,51
		Corvina	4	0,1 \pm 0,1	0,12 \pm 0,09	13,59	27,18
		Dorado	3	0,06 \pm 0,02	0,05 \pm 0,01	5,91	11,83
		Rollizo	8	1,3 \pm 0,05	0,12 \pm 0,05	13,49	26,97
		Vieja	1	0,066 \pm 0,002	0,060 \pm 0,002	6,97	13,95
V	4	Congrio Colorado	2	0,03 \pm 0,02	0,03 \pm 0,02	3,17	6,33
		Rollizo	2	0,047 \pm 0,002	0,047 \pm 0,002	4,98	9,96

Continuación tabla 24. Porcentaje de Ingesta Semanal Tolerable Provisional para hombres, mujeres y niños.

Niño (4 años)							
Región	n Regional	Especie	n	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	[MeHg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.h.	% ISTP 1 porción semana	% ISTP 2 porción semana
XV	12	Albacora	1	0,21 \pm 0,02	0,19 \pm 0,02	43,25	86,50
		Bilagay	4	0,12 \pm 0,04	0,11 \pm 0,04	24,11	48,23
		Monito	3	0,07 \pm 0,06	0,06 \pm 0,05	14,12	28,24
		Dorado	1	0,051 \pm 0,002	0,046 \pm 0,002	10,47	20,95
		Rollizo	3	0,14 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	27,62	55,24
I	19	Bilagay	3	0,11 \pm 0,06	0,10 \pm 0,05	22,82	45,65
		Congrio Colorado	5	0,05 \pm 0,03	0,04 \pm 0,02	9,96	19,93
		Dorado	3	0,06 \pm 0,009	0,055 \pm 0,008	12,33	24,67
		Rollizo	5	0,13 \pm 0,05	0,12 \pm 0,04	27,11	54,21
		Vieja	3	0,23 \pm 0,03	0,21 \pm 0,03	47,32	94,63
II	9	Bilagay	3	0,18 \pm 0,02	0,2 \pm 0,02	36,13	72,26
		Congrio Colorado	4	0,05 \pm 0,01	0,05 \pm 0,01	10,86	21,73
		Rollizo	2	0,13 \pm 0,09	0,12 \pm 0,09	27,72	55,44
III	47	Bilagay	8	0,21 \pm 0,03	0,19 \pm 0,03	42,02	84,04
		Cojinova	6	0,08 \pm 0,04	0,08 \pm 0,03	17,00	33,99
		Congrio Colorado	17	0,2 \pm 0,07	0,16 \pm 0,06	35,34	70,67
		Corvina	4	0,1 \pm 0,1	0,12 \pm 0,09	26,30	52,60
		Dorado	3	0,06 \pm 0,02	0,05 \pm 0,01	11,45	22,89
		Rollizo	8	1,3 \pm 0,05	0,12 \pm 0,05	26,10	52,20
		Vieja	1	0,066 \pm 0,002	0,060 \pm 0,002	13,50	26,99
V	4	Congrio Colorado	2	0,03 \pm 0,02	0,03 \pm 0,02	6,13	12,26
		Rollizo	2	0,047 \pm 0,002	0,047 \pm 0,002	9,64	19,28

De acuerdo con los resultados de la tabla 24, en la XV región, el % ISTP para hombres que consumen una porción de pescado varió entre 4,64 y 19,5% y para dos porciones entre 9,28 y 38,1%. En el caso de las mujeres, para una porción varió entre 5,41 y 22,35% y para dos porciones entre 10,82 y 44,69%. Para los niños, el rango varió entre 10,47 y 43,25% para una porción y entre 20,95 y 86,50% para dos porciones semanales. El % ISTP más elevado corresponde a la albacora, seguido por el rollizo, el bilagay, el bonito y el dorado, en el cual se reportó el % ISTP más bajo.

En la I región, en el caso de los hombres que consumen una porción semanal el rango de % ISTP osciló entre 4,41 y 20,95% y para dos porciones entre 8,82 y 41,91%. Para las mujeres, el % ISTP para una porción fluctuó entre 5,15 a 24,45% y entre 10,30 a 48,89% para dos porciones. En los niños, 9,96 a 47,32% y 19,93 a 94,63% para una y dos porciones respectivamente. El valor de % ISTP más alto correspondió a la vieja, seguido por el rollizo, el bilagay, el dorado y el congrio colorado.

En la II región, % ISTP en los hombres varió entre 4,81 a 16% y 9,62 a 32,00%, en las mujeres la variación fue de 5,61 a 18,67% y 11,23 a 37,33% y en los niños fue de 10,86 a 36,13% y 21,73 a 72,26% para una y dos porciones respectivamente. La especie con mayor % de ISTP correspondió al bilagay, seguido por el rollizo y luego el congrio colorado.

En la III región, % ISTP varió entre 5,07 a 18,61% y 10,14 a 37,22% en hombres, entre 5,91 a 21,71% y 11,83 a 43,42% en mujeres y en niños entre 13,50 a 47,02 y 22,89 a 84,04% para una y dos porciones respectivamente. El bilagay fue la especie que presentó el mayor % ISTP seguido por el congrio colorado, la corvina, el rollizo, la cojinova, la vieja y el dorado.

En cuanto a la V región, el % ISTP en hombres varió entre 2,71 a 4,27 % y 5,43 a 8,54% en hombres, en mujeres osciló entre 3,17 a 4,98% y 6,33 a 9,96%, finalmente en los niños varió entre 6,13 a 9,64% y 12,26 a 19,28% para una y dos porciones

respectivamente. El congrio colorado correspondió a la especie con mayor % ISTP mientras que el rollizo presentó la menor.

En relación con los resultados obtenidos, ya que % ISTP varió en función de la concentración de mercurio contenida en las muestras, la clasificación de las especies que presentan un mayor o menor % de ISTP ocurre en el mismo orden que se estableció en el punto V.2.1.

Con respecto a la evaluación del potencial riesgo a la salud provocado por la ingesta de mercurio a partir del consumo de alimentos de origen marino, se observa que la totalidad de las especies analizadas entrega una ingesta de MeHg menor a 100% para todos los grupos etarios, ya sea si se el consumo semanal corresponde a una o dos porciones. Sin embargo, existen especies que, en el caso de los niños de cuatro años, pueden llegar a aportar más del 50% de la ingesta de mercurio aceptable si se consumen dos porciones semanales de pescado. Como ocurre en el caso de la albacora y el rollizo en la XV región, la vieja y el rollizo en la I región, el bilagay y el rollizo en la II región; y el bilagay, el congrio, la corvina y el rollizo en la III región, por lo tanto la recomendación de consumo de estas especies para este grupo etario no debería exceder las dos porciones semanales, especialmente en el caso la albacora perteneciente a la XV región (% ISTP: 86,50%), la vieja de la I región (% ISTP: 94,63%) y el bilagay de la III región (% ISTP: 84,04%), ya que una tercera porción, podría significar exceder la recomendación de ISTP establecida por la FAO/OMS (2017) de $1,6 \mu\text{g g}^{-1}$ MeHg/kg p.c./semana.

Estos resultados, coinciden con lo recomendado por FDA (2017), en donde la corvina es considerada una de las “mejores opciones” y por lo tanto se recomienda consumir de 2 a 3 porciones semanales. A pesar de que la corvina fue nombrada como una de las especies que aporta más del 50% del % ISTP recomendado, una tercera porción no permitiría que el % ISTP alcance el 100%. Por otro lado, la FDA recomienda evitar el consumo de especies como el pez espada, conocida como albacora en Chile, debido a su alto contenido en mercurio.

Según lo dispuesto por el MINSAL (2013), las guías alimentarias para la población chilena recomiendan el consumo de dos porciones semanales de pescado (sin especificar cuál), sin embargo, el Estudio Chile 3D-GfK Adimark, 2016 publicado en Chile Saludable Volumen V (2016) arrojó que aproximadamente el 46% de los chilenos consumen pescado una vez por semana y que además el 84% prefiere consumir pescado enlatado, el 80% prefiere pescado fresco y solo el 37% se inclinan por el producto congelado. Si se consideran estos antecedentes, el consumir una porción de cualquiera de las especies consideradas en este trabajo, no representaría un potencial riesgo para la salud de hombres, mujeres o niños, pero ya que el consumo de estos alimentos es esencial debido a que son una importante fuente de proteínas, ácidos grasos ω -3 (EPA y DHA) y nutrientes como yodo, vitamina D, selenio y calcio (FAO, 2015) es importante que se impulsen políticas públicas chilenas que incentiven el consumo de este alimento, pero para esto, sería recomendable que se realicen las investigaciones pertinentes para determinar las mejores opciones de consumo, sobre todo en lo que concierne a madres gestantes y niños, quienes son la población más sensible a los efectos nocivos del MeHg.

Con respecto a los parámetros de evaluación del potencial riesgo asociado a la ingesta de mercurio a través del consumo de productos marinos expuestos, es posible identificar que la evaluación del riesgo difiere de acuerdo con el parámetro elegido, ya que pescados que tienen alta PM Se:Hg no necesariamente tienen el mejor HBV_{Se} o % de ISTP. Esto ocurre, porque cada parámetro está ligado a una variable. En el caso de la PM se relaciona con la concentración de mercurio y selenio, en el caso del HBV_{Se} a la concentración de selenio y en el caso del % ISTP a la concentración de mercurio y características del grupo etario de estudio. Por otro lado, todos los parámetros permiten visualizar, de alguna manera, que especies podrían presentar un potencial riesgo.

VI. CONCLUSIONES

1. Las técnicas de fluorescencia atómica previa generación de vapor frío (CV-AFS) e hidruros (HG-AFS) son válidas para la determinación de mercurio y selenio total en músculo de pescados frescos de las costas de Chile.
2. Las concentraciones de mercurio y selenio total en músculo de pescados frescos de las costas de Chile presentan variaciones de acuerdo con la región, la especie y el individuo.
3. La totalidad de las especies de pescados frescos provenientes de las costas de Chile analizados cumplen con la normativa nacional e internacional para niveles máximos permitidos de mercurio, sin embargo, solo dos especies cumplen con la normativa nacional de contenido máximo permitido de selenio.
4. La ingesta de mercurio por consumo de pescados frescos de la costa de Chile evaluado mediante la Proporción Molar Se:Hg, HBV_{Se} y % ISTP, no representaría un potencial riesgo para la salud de la población, sin embargo, el nivel de riesgo es variable de acuerdo con el grupo etario, la especie a consumir y región a la que pertenece. Por ejemplo, en cuanto a la Proporción Molar la albacora, el bilagay y los rollizos parecen menos recomendables, mientras que en cuanto al % de ISTP el, bilagay, la vieja y los congrios son las especies que entregan mayor cantidad de mercurio a la semana.
5. Se recomienda llevar a cabo futuras investigaciones respecto a este tema, en donde se puedan mejorar aspectos como el número de individuos y especies a analizar, realización de especiación y aumento en el número de regiones estudiadas con el fin de determinar especies o zonas que pudiesen encontrarse más impactadas por contaminación de mercurio y así, tomar las medidas pertinentes en resguardo de la salud de la población.

VII. REFERENCIAS

- Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR). (2003). "Resumen de Salud Pública: Selenio". Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs92.html (página visitada el 1 de julio del 2018).
- Arteel, G.E., Mostert, V., Oubrahim, H., Briviba, K., Abel, J., Sies, H. (1998). Protection by selenoprotein P in human plasma against peroxynitrite-mediated oxidation and nitration. *Biol. Chem.* 379:1201-1205.
- Bowman, B., Russell, R. (Ed.). (2006). *Present Knowledge in Nutrition*. 9th ed. Washington, DC: International Life Sciences Institute.
- Burger, J. & Gochfel, M. (2013). Selenium/mercury molar ratios in freshwater, marine, and commercial fish from the USA: variation, risk, and health management. *Rev Environ Health.* 28(2-3): 129–143.
- Cabañero, A.I, Madrid, Y., Cámara, C., (2004). Selenium and mercury bioaccessibility in fish samples: an in vitro digestion method. *Analytica Chimica Acta.* 526: 51–61.
- Chapman, L., Chan, H.M. (2000). The influence of nutrition on methylmercury intoxication. *Environ Health Perspect.* 108:29–56.

- Cheng, W.H., Ho, Y.S., Valentine, B.A., Ross, D.A., Combs, G.F. Jr., Lei, X.G. (1998). Cellular glutathione peroxidase is the mediator of body selenium to protect against paraquat lethality in transgenic mice. *J. Nutr.* 128: 1070-1076.
- Chong, J., Sepúlveda, K., Ibáñez, C.M. (2006). Variación temporal en la dieta del congrio colorado, *Genypterus chilensis* (Guichenot, 1881) frente al litoral de Talcahuano, Chile (36°32'S - 36°45'S). *Rev. biol. mar. oceanogr.* 41(2): 195-202.
- Durazo Beltrán, E. (2006). *Aprovechamiento de los productos pesqueros*. Mexicali, Baja California. Universidad Autónoma de Baja California. 34 pp.
- Dyrssen, D., Wedborg, M. (1991). The sulfur–mercury(II) system in natural waters. *Water Air Soil Pollut.* 56:507–519.
- Erdman, J.W., Macdonald, I.A., Zeisel, S.H., (Ed.). (2012). *Present Knowledge in Nutrition*. 10th ed. Washington, DC: Wiley-Blackwell.
- Eto, K., Marumoto, M., Takeya, M. (2010). The pathology of methylmercury poisoning (Minamata disease). *Neuropathology.* 30(5):471–479.
- Food and Drugs Administration (FDA). (2017). Consejos sobre el consumo de pescado: Lo que las embarazadas y los padres deben saber. (Recuperado de: <https://www.fda.gov/Food/ResourcesForYou/Consumers/ucm536869.htm>).

- Fuentes, H. (1982). Feeding habits of *Graus nigra* (Labridae) in coastal waters of Iquique, northern Chile. *Japan. J. Ichthyol.* 29(1): 95-98.
- Fundación Chile & GFK Adimark. (2016). Chile Saludable. Volumen V. "Oportunidades y desafíos de innovación para el aumento del consumo de productos del mar". Santiago, Chile. (Recuperado de: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2016/12/CHILE-SALUDABLE-2016-b.pdf>)
- Gaiolia, M., Amoedoa, D., González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Arch Argent Pediatr.* 110(3):259-264.
- Goldman, L., Shannon, M., (2001). Committee on Environmental Health. Technical Report: Mercury in the Environment: Implications for Pediatricians. *Pediatrics.* 108 (1): 197-205.
- González, M., Bodas, P., Gillén, J., Rubio, M., Ordoñez, M., Trasobares, E., Calle, A. (2014). Exposición al metilmercurio en la población general; toxicocinética; diferencias según el sexo, factores nutricionales y genéticos. *Nutr Hosp,* 30(5), 969-988.
- Harada, M. (1995). Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Crit Rev Toxicol.* 25(1):1-24.
- Henshel, D., Aschner, M., Basu, N., Bowerman, W., Echeverria, D., Gilbertson, M., et al. (2007) New bioindicators for mercury toxicological assessment:

recommendations from the first international bioindicators roundtable. *Environ Bioindicators*. 2:183–207.

Hutchinson E. 1960. *Química: los elementos y sus reacciones*, 1° Edición, Editorial Reverté, S.A.

Ibáñez, C.M., González, C., Cubillos, L. (2004). Dieta del pez espada *Xiphias gladius* Linnaeus, 1758, en aguas oceánicas de Chile central en invierno de 2003. *Invest. Mar.* 32(2): 113-120.

Institute of Medicine (IOM). (2000). *Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids*. Washington, DC: The National Academies Press.

Instituto de Salud Pública de Chile (ISP). (2012). Informe de Resultados de Vigilancia de Laboratorio: Mercurio en productos de origen marino. En el marco del Plan de Vigilancia Nacional de Metales Pesados en Productos del Mar. Recuperado de: (http://www.ispch.cl/sites/default/files/documento_tecnico/2013/12/INFORME%20Mercurio%202012.pdf).

International Chemical Safety Card (IPCS). (2028). Mercury. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (ICSC 0056). Recuperado de: http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0056&p_edit=&p_version=2&p_lang=es (visitada el 3 de Noviembre de 2017).

International Chemical Safety Card (IPCS). (2018). Selenium. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (ICSC 0072). Recuperado de: http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0072&p_edit=&p_version=2&p_lang=es (visitada el 10 de Mayo de 2018).

Jalón, M.; Urieta I.; Macho I. y Azpiri M. (Ed.). (1997). *Vigilancia de la contaminación química de los alimentos en la Comunidad Autónoma del País Vasco 1990-1995*. Vitoria-Gasteiz, España: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

Kaneko, J.J., Ralston, N.V.C. (2007). Selenium and mercury in pelagic fish in the central north Pacific near Hawaii. *Biol Trace Elem Res.* 119:242–254.

Köhrle, J., Jakob, F., Contempéré, B., Dumont, J.E. (2005). Selenium, the Thyroid, and the Endocrine System. *Endocr. Rev.* 26: 944–984.

Lominchar, M.A., Sierra, M.J., Rodríguez, J., Millán, R. (2010). *Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues* (Trabajo de Magíster). Universidad Autónoma de Madrid, España.

López Fernández F.J. (Ed.). (2016). *Organización y Estructura Sanitaria*. Madrid. España: ACCI Ediciones.

- Mancera-Rodríguez, N. J. & R. Álvarez-León. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biol. Colom.* 11 (1): 3-23.
- Mariotti, M., Ridge, P.G., Zhang, Y., Lobanov, A.V., Pringle, T.H., et al. (2012). Composition and Evolution of the Vertebrate and Mammalian Selenoproteomes. *PLoS ONE* 7(3): e33066.
- Medina, M., Araya, M., Vega, C. (2004). Alimentación y relaciones tróficas de peces costeros de la zona norte de Chile. *Invest. Mar.* 32(1): 33-47.
- Ministerio de Salud (MINSAL). (2002). Resolución Exenta N° 394/2002. "*Fija directrices nutricionales sobre suplementos alimentarios y sus contenidos en vitaminas y minerales*". Recuperado de: <https://docplayer.es/32660427-Fija-directrices-nutricionales-sobre-suplementos-alimentarios-y-sus-contenidos-en-vitaminas-y-minerales.html>.
- Ministerio de Salud MINSAL. (2013). Norma general técnica n° 148 sobre guías alimentarias para la población. (recuperado de: http://codemachile.cl/wp-content/uploads/2015/08/Norma-t%C3%A9cnica-N%C2%BA-148-sobre-Gu%C3%ADas-Alimentarias-para-la-poblaci%C3%B3n-chilena_-MINSAL-2013.pdf)
- Ministerio de Salud (MINSAL). (2017). *Reglamento Sanitario de los Alimentos* DTO. N° 977/96. Recuperado de: http://www.dinta.cl/wp-dintacl/wp-content/uploads/RSA-DECRETO_977_96_actualizado-Dic

2017http://www.dinta.cl/wp-dintacl/wp-content/uploads/RSA-DECRETO_977_96_actualizado-Dic-2017.pdf.pdf.

Moreno, C.A. (1972). Nicho alimentario de la "vieja negra" (*Graus nigra* Philippi) (Osteichthyes Labridae). *Not. Mens. Mus. Nac. Hist. Nat.* 186: 5-6.

Moskovitz, J., Singh, V.K., Requena, J., Wilkinson, B.J., Jayaswal, R.K., Stadtman, E.R. (2002). Purification and Characterization of Methionine Sulfoxide Reductases from Mouse and *Staphylococcus aureus* and Their Substrate Stereospecificity. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 290:62-65.

Navarro-Alarcón M., Cabrera-Vique C. (2008). Selenium in food and human body: A review. *Sci Total Environ.* 400: 115-41.

Ordiano-Flores, A. (2009). *Bioacumulación y biomagnificación de mercurio en atún aleta amarilla, Thunnus albacares, del Océano Pacífico Oriental* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. 88 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2015). Nature's superfood: 10 interesting facts on fish and nutrition. (Recuperado de: http://www.fao.org/zhc/detail-events/en/c/334890/?utm_source=facebook&utm_medium=social+media&utm_campaign=fao+facebook)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación/Organización mundial de la salud (FAO/OMS). (2017), *Norma*

general del Codex para los contaminantes presentes en los alimentos y piensos, Codex Stan 193-1995. FAO, Roma.

Papp L.V., Lu J., Holmgren A., Khanna K.K. 2007. From Selenium to Selenoproteins: Synthesis, Identity, and Their Role in Human *Health Antioxid. Redox Signal* (9): 775-806.

Parizek, J., Ostadalova, I., Kalouskove, J., Babicky, A., Pavlik, L., Bibr, B. (1971). Effect of mercuric compounds on the maternal transmission of selenium in the pregnant and lactating rat. *J Reprod Fertil.* 25:157–170.

Polak-Juszczak, L. (2015). Selenium and mercury molar ratios in commercial fish from the Baltic Sea: Additional risk assessment criterion for mercury exposure. *Food Control.* 50: 881-888.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2002). Evaluación mundial sobre el mercurio. Ginebra, Suiza.

Raimann, X., Rodríguez, L., Chávez, P., Torrejón, C., (2014). Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Rev. Med. Chile.* 142(9): 1174-1180.

Rice, G., Swartout, J., Mahaffey, K., Schoeny, R. (2000). Derivation of US EPA's oral Reference Dose (RfD) for methylmercury. *Drug Chem. Toxicol.* 23:41-54.

Rissanen, T., Voutilainen, S., Nyyssönen, K., Lakka, T.A., Salonen, J.T. (2000). Fish oil-derived fatty acids, docosahexaenoic acid and docosapentaenoic acid,

and the risk of acute coronary events: the Kuopio ischaemic heart disease risk factor study. *Circulation*. 102(22): 2677-2679.

Ralston, N.V.C. (2008). *Selenium Health Benefit Values as Seafood Safety Criteria* Ecohealth. (4):442-55.

Ralston, N.V.C., & Raymond, L.J. (2010). Dietary selenium's protective effects against methylmercury toxicity. *Toxicology*. 278: 112-123.

Ralston, N.V.C, Ralston, C.R., Blackwell, J.L. III, Raymond, L.J. (2008). Dietary and tissues selenium in relation to methylmercury toxicity. *Neurotoxicology* 29:802–81.

Ralston, N.V.C., Ralston, C.R., Raymond, L.J. (2016). Selenium Health Benefit Values: Updated Criteria for Mercury Risk Assessments. *Biol Trace Elem Res*. 171(2):262-269.

Rayman, M.P. (2008). Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. *Br. J. Nutr*. 100:254-68.

Rayman, M.P. (2000). The importance of selenium to human health. *Lancet*. 356: 233-41.

Ross, A.C., Caballero, B., Cousins, R.J., Tucker, K.L., & Ziegler, T.R. (Ed.). (2012). *Modern nutrition in health and disease*: 11th ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer Health Adis (ESP).

- Sager, M. (2006). Selenium in agriculture, food and nutrition. *Pure Appl Chem*. 78: 111-33.
- Salonen, J.T., Seppänen, K., Nyssönen, K., Korpela, H., Kauhanen, J., Kantola, M., Tuomilehto, J., Esterbauer, H., Tatzber, F., Salonen, R. (1995). Intake of mercury from fish, lipid peroxidation, and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in eastern Finnish men. *Circulation*. 91(3):645-55.
- Sandholm, M., Oksanen, H.E., Pesonen, L. (1973). Uptake of selenium by aquatic organisms. *Limnol Oceanogr*, 18: 496-499.
- Satoh, H. (2000). Occupational and environmental toxicology of mercury and its compounds. *Ind. Health*. 38:(2) 153-164.
- Stone R. (2009). *Diseases. A medical mystery in middle China*. *Science*. 324(5933):1378-1381.
- Stringari, J. Nunes, A.K.C., Franco, J.L., Bohrer, D., Garcia, S.C., Dafre, A.L., et al. (2008) Prenatal methylmercury exposure hampers glutathione antioxidant system ontogenesis and causes longlasting oxidative stress in the mouse brain. *Toxicol Appl Pharmacol*. 227:147–154.
- Taylor, N.J., Wong, Y.S., Chieh, P.C., Carty, A.J. (1975). Syntheses, X-ray crystal structure, and vibrational spectra of L-cysteinato(methyl) mercury(II) monohydrate. *J Chem Soc Dalton Transactions* 5:438–442.

Vargas, M., Soto, R., Guzmán, G. (1999). Cambios interanuales en la alimentación de peces submareales del norte de Chile entre los 20°11' y 20°20'S. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 34(2): 197-210.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. *Ingesta diaria recomendada (RDA) de selenio según grupo etario.*

Edad	Hombre (µg)	Mujer (µg)	Embarazo (µg)	Lactancia (µg)
Bebés hasta 6 meses de edad	15	15	-	-
Bebés desde 7 a 12 meses de edad	20	20	-	-
Niños desde 1 a 3 años	20	20	-	-
Niños de 4 a 8 años	30	30	-	-
Niños de 9 a 13 años	40	40	-	-
Adolescentes desde 14+	55	55	60	70

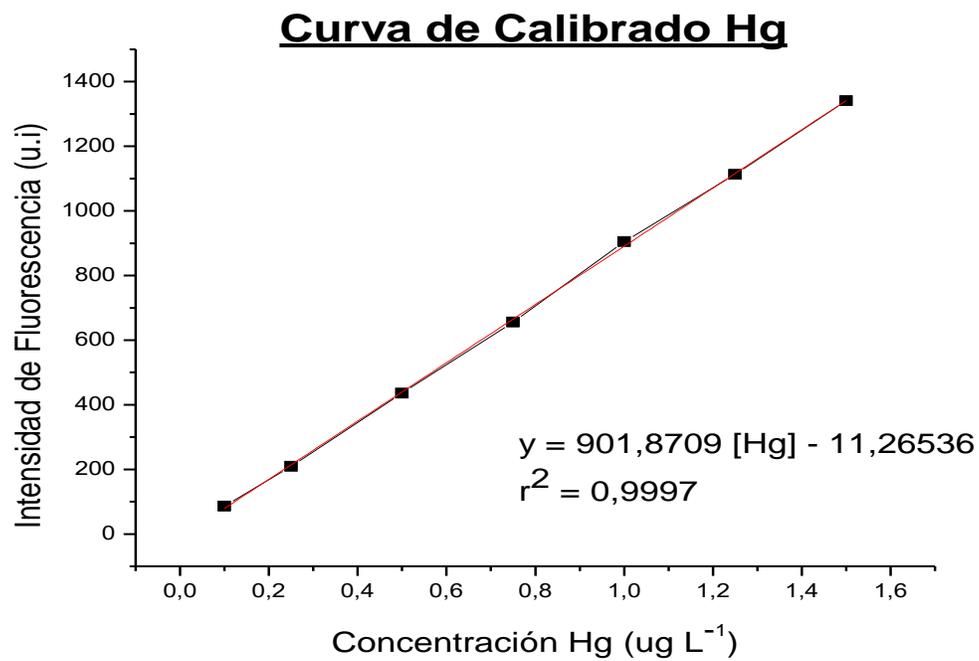
Fuente: IOM, 2000.

Anexo 2. Nivel de ingesta máxima tolerable (UL) para selenio.

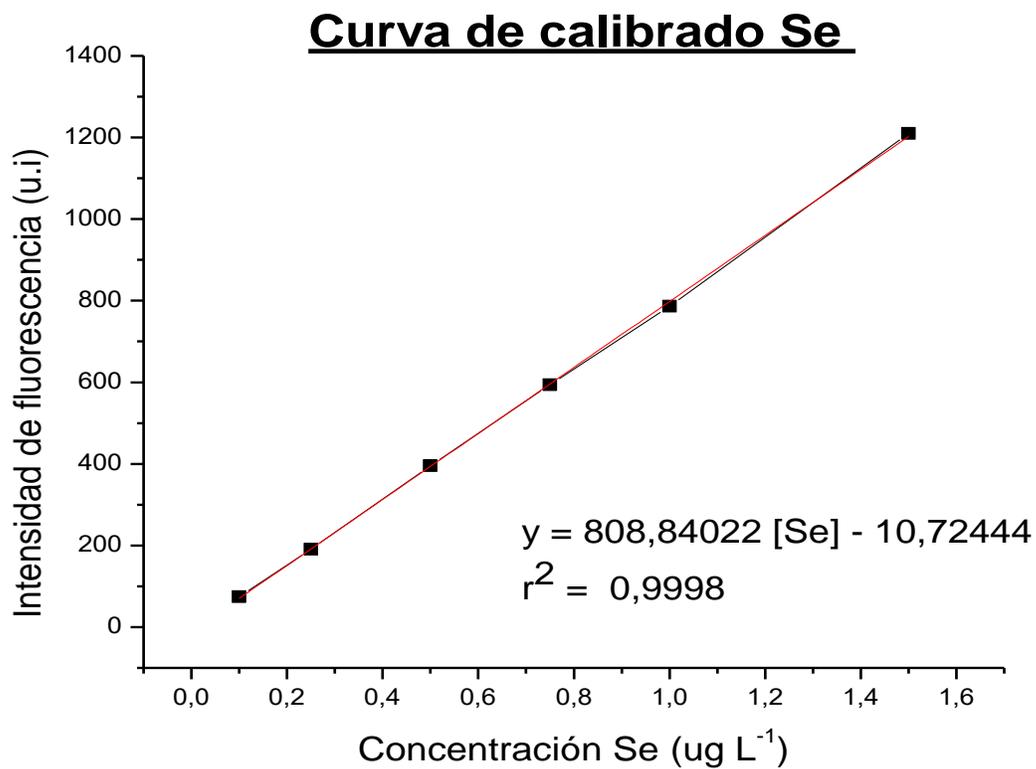
Edad	Hombre (µg)	Mujer (µg)	Embarazo (µg)	Lactancia (µg)
Bebés hasta 6 meses de edad	45	45	-	-
Bebés desde 7 a 12 meses de edad	60	60	-	-
Niños desde 1 a 3 años	90	90	-	-
Niños de 4 a 8 años	150	150	-	-
Niños de 9 a 13 años	280	280	-	-
Adolescentes desde 14+	400	400	400	400

Fuente: IOM, 2000.

Anexo 3. Curva de calibrado para mercurio, obtenida mediante el programa OriginPro 8.0



Anexo 4. Curva de calibrado para selenio, obtenida mediante el programa OriginPro 8.0.



Anexo 5. Concentración de mercurio y selenio total de los individuos muestreados.

Región	Caleta/ Extracción	Especie	Código	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.	[Se] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.
Arica y Parinacota (XV)	Caleta Camarones/Sector El Rodado	Bilagay	250	0,281 \pm 0,009	0,86 \pm 0,05
			251	0,43 \pm 0,01	1,00 \pm 0,02
			252	0,49 \pm 0,01	0,84 \pm 0,02
		253	0,65 \pm 0,02	0,84 \pm 0,02	
		Rollizo	254	0,74 \pm 0,02	1,9 \pm 0,1
			255	0,44 \pm 0,01	1,81 \pm 0,07
	256		0,41 \pm 0,02	1,68 \pm 0,01	
	Muelle Arica	Bonito	257	0,113 \pm 0,002	1,30 \pm 0,03
			258	0,180 \pm 0,004	1,64 \pm 0,03
			259	0,520 \pm 0,006	3,04 \pm 0,07
		Dorado	260	0,201 \pm 0,009	1,95 \pm 0,02
		Albacora	261	0,83 \pm 0,07	2,47 \pm 0,03
	Tarapacá (I)	Caleta Riquelme/Sector Punta Gruesa	Dorado	150	0,199 \pm 0,003
151				0,27 \pm 0,04	1,8545 \pm 0,0008
152				0,241 \pm 0,005	1,86 \pm 0,03
Caleta Chanavayita/ Sector Yape		Bilagay	153	0,62 \pm 0,04	1,55 \pm 0,04
			154	0,184 \pm 0,005	1,15 \pm 0,01
			155	0,51 \pm 0,02	1,15 \pm 0,08
		Vieja	156	0,792 \pm 0,006	1,92 \pm 0,06
		Rollizo	157	0,803 \pm 0,009	2,20 \pm 0,04
Río Seco		Vieja	158	0,912 \pm 0,006	2,10 \pm 0,02
			168	1,02 \pm 0,02	1,99 \pm 0,09
		Rollizo	159	0,603 \pm 0,006	2,18 \pm 0,08
			160	0,43 \pm 0,02	2,81 \pm 0,03
			161	0,304 \pm 0,002	2,53 \pm 0,09
			162	0,461 \pm 0,008	1,8 \pm 0,2
Chanavaya		Congrio Colorado	163	0,132 \pm 0,003	2,2 \pm 0,1
			164	0,104 \pm 0,003	1,98 \pm 0,09
			165	0,158 \pm 0,003	1,75 \pm 0,03
	166		0,18 \pm 0,02	2,0 \pm 0,1	
	167		0,382 \pm 0,003	1,65 \pm 0,08	

Continuación anexo 5. Concentración de mercurio y selenio total de los individuos muestreados.

Región	Caleta/ Extracción	Especie	Código	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.	[Se] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.
Antofagasta (II)	Mejillones (Punta Angamos)	Congrio Colorado	400	0,125 \pm 0,008	1,24 \pm 0,07
			401	0,23 \pm 0,01	1,80 \pm 0,03
			402	0,233 \pm 0,005	2,52 \pm 0,06
			403	0,246 \pm 0,006	2,83 \pm 0,08
		Bilagay	404	0,68 \pm 0,02	1,28 \pm 0,06
			405	0,77 \pm 0,01	1,30 \pm 0,03
			406	0,63 \pm 0,02	1,6 \pm 0,1
		Rollizo	407	0,80 \pm 0,02	1,50 \pm 0,02
408	0,264 \pm 0,009		1,50 \pm 0,06		
Atacama (III)	Chañaral	Congrio Colorado	300	0,48 \pm 0,01	2,01 \pm 0,07
			301	0,952 \pm 0,007	3,6 \pm 0,1
			302	1,06 \pm 0,06	2,4 \pm 0,1
		Corvina	303	0,75 \pm 0,02	1,59 \pm 0,03
			304	No existe	No existe
			305	No existe	No existe
		Cojinova	306	0,55 \pm 0,02	2,06 \pm 0,03
			307	0,302 \pm 0,001	2,32 \pm 0,05
	308		0,25 \pm 0,02	2,40 \pm 0,06	
	Caldera	Vieja	309	0,259 \pm 0,008	1,45 \pm 0,03
			310	No existe	No existe
			311	No existe	No existe
		Dorado	312	0,24 \pm 0,01	1,8 \pm 0,1
			313	0,270 \pm 0,008	1,88 \pm 0,08
			314	0,149 \pm 0,002	1,69 \pm 0,08
		Bilagay	315	0,816 \pm 0,002	1,48 \pm 0,08
			316	0,69 \pm 0,01	1,5 \pm 0,1
			317	1,02 \pm 0,06	1,21 \pm 0,05
Congrio Colorado		318	0,327 \pm 0,003	2,6 \pm 0,1	
	319	0,36 \pm 0,02	1,58 \pm 0,07		
	320	0,490 \pm 0,009	1,99 \pm 0,02		
Corvina	321	0,161 \pm 0,010	1,38 \pm 0,03		
	322	0,198 \pm 0,007	1,20 \pm 0,07		
	323	0,91 \pm 0,04	1,15 \pm 0,04		

Continuación anexo 5. Concentración de mercurio y selenio total de los individuos muestreados.

Región	Caleta/ Extracción	Especie	Código	[Hg] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.	[Se] $\mu\text{g g}^{-1}$ p.s.
Atacama (III)	Caldera	Rollizo	324	0,38 \pm 0,01	3,00 \pm 0,06
			325	0,23 \pm 0,01	1,41 \pm 0,04
			326	0,369 \pm 0,009	1,27 \pm 0,03
		Cojinova	327	0,242 \pm 0,002	2,1 \pm 0,1
			328	0,150 \pm 0,007	2,15 \pm 0,07
			329	0,463 \pm 0,002	2,37 \pm 0,03
	Carrizal Bajo	Bilagay	330	0,751 \pm 0,010	1,62 \pm 0,09
			331	0,858 \pm 0,003	1,69 \pm 0,06
			332	0,764 \pm 0,008	1,60 \pm 0,04
		Congrio Colorado	333	0,873 \pm 0,010	4,28 \pm 0,08
			334	0,671 \pm 0,009	1,791 \pm 0,007
			335	0,622 \pm 0,004	2,08 \pm 0,06
		Rollizo	336	0,688 \pm 0,002	1,55 \pm 0,02
			337	0,64 \pm 0,02	1,28 \pm 0,03
	338		0,79 \pm 0,02	1,61 \pm 0,04	
	Huasco	Congrio Colorado	339	1,02 \pm 0,06	4,9 \pm 0,2
			340	0,62 \pm 0,03	3,7 \pm 0,2
			341	0,97 \pm 0,08	4,5 \pm 0,1
	Chañaral (Sector Flamenco)	Congrio Colorado	30	0,46 \pm 0,02	3,53 \pm 0,06
			31	0,79 \pm 0,03	4,26 \pm 0,04
			32	1,0 \pm 0,01	4,09 \pm 0,03
			33	0,202 \pm 0,003	1,44 \pm 0,04
			34	0,6310 \pm 0,0008	4,04 \pm 0,05
Rollizo		35	0,62 \pm 0,02	1,62 \pm 0,04	
		36	0,29 \pm 0,01	1,18 \pm 0,01	
Bilagay		37	0,67 \pm 0,01	1,86 \pm 0,02	
		38	0,882 \pm 0,006	1,53 \pm 0,01	
Valparaíso (V)	Papudo	Rollizo	50	0,18 \pm 0,01	0,84 \pm 0,02
			51	0,19 \pm 0,01	1,17 \pm 0,02
		Congrio Colorado	52	0,056 \pm 0,004	1,00 \pm 0,02
			53	No existe	No existe
			54	0,1792 \pm 0,0005	1,63 \pm 0,04

Anexo 6. Resultados del Plan de Vigilancia Nacional de Metales Pesados en Productos del Mar realizado por el ISP (2012). Publicado en Raimann, 2014.

Producto	Situación por especie				Norma RSA (mg/kg)
	n muestras	Regiones involucradas	Rango Resultados (mg/kg)	Promedio Resultados (mg/kg)	
Albacora	19	II-III-IV-V	0,280 - 1,570	0,739	1,5
Anchoveta	11	I-II	0,010 - 0,080	0,021	0,5
Atún conserva (aceite y agua)	50	I-RM	0,020 - 0,830	0,212	1,0
Besugo	3	VIII	0,070 - 0,095	0,080	0,5
Bilagay	3	III	0,070 - 0,130	0,110	0,5
Caballa	3	IV	0,025 - 0,180	0,085	0,5
Cabrilla	2	XV	0,180 - 0,370	0,275	0,5
Cojinova	2	XV	0,040 - 0,050	0,045	0,5
Congrio (Colorado, Dorado y Negro)	27	V- VIII-XIV-X-XI-XII	0,020 - 0,290	0,117	0,5
Corvina	6	I-IX	0,030 - 0,140	0,056	0,5
Jurel	18	I-II-VIII	0,020 - 0,050	0,038	0,5
Merluza (Común, de Cola)	56	V- VII-VIII-X-XI	0,015 - 0,260	0,065	0,5
Pejerrey	4	I	0,020 - 0,320	0,103	0,5
Reineta	22	VII-VIII	0,043 - 0,185	0,090	0,5
Róbalo	8	XIV-X	0,028 - 0,140	0,076	0,5
Rollizo	3	III	0,090 - 0,120	0,107	0,5
Salmón (Atlántico y Plateado)	40	XIV-X-XI-XII	0,020 - 0,130	0,034	0,5
Sardina	4	XIV-X	0,025 - 0,118	0,067	0,5
Sierra	18	V-VIII-XIV-X	0,030 - 0,220	0,066	0,5
Almeja	22	XV-V-VIII-X-XI	0,010 - 0,110	0,041	0,5
Chorito	39	II-V-XIV-X	0,010 - 0,710	0,054	0,5
Choros	6	XV-X	0,010 - 0,060	0,025	0,5
Total	366		0,010 - 1,570	0,118	