

## Mercury concentrations in domestic and imported canned bivalves and cephalopods sold in northwestern Mexico

### Concentraciones de mercurio en bivalvos y cefalópodos enlatados nacionales e importados que se expenden en el noroeste de México

Jorge Ruelas-Inzunza<sup>1\*</sup>, Carolina Delgado-Alvarez<sup>2</sup>, Ofelia Escobar-Sánchez<sup>3,4</sup>,  
Martín Frías-Espericueta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sección Ambiental, Instituto Tecnológico de Mazatlán, 82070 Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Sinaloa, 82199 Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

<sup>3</sup> Dirección de Cátedras, CONACYT, 03940 Ciudad de Mexico, Mexico.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias del Mar, 82000 Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

\* Corresponding author. E-mail: [jorge.ri@mazatlan.tecnm.mx](mailto:jorge.ri@mazatlan.tecnm.mx)

**ABSTRACT.** Mercury (Hg) is mainly incorporated into humans through the consumption of contaminated foods. Mercury was measured and the methyl-Hg (MeHg) concentration was estimated in canned mollusks sold in northwestern Mexico to assess the health risk to consumers. Five mollusk types were considered: oysters, clams, octopuses, mussels, and squids. The Hg concentration of mussels was significantly ( $P < 0.05$ ) lower than those of the other bivalves (oysters and clams) and cephalopods (squids and octopuses). The average Hg concentration in bivalves ( $0.013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) was significantly ( $P < 0.05$ ) lower than that of cephalopods ( $0.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). The estimated MeHg concentrations were also lower in bivalves than in cephalopods. Based on our results, no health risk is associated with the consumption of canned mollusks that are sold in northwestern Mexico. The Hg and MeHg concentrations followed the order of octopuses > squids = clams > oysters > mussels. The Hg and MeHg concentrations in the mollusks evaluated in this study were below the maximum permissible limits for human consumption in Mexico.

**Key words:** methyl-Hg, canned mollusks, eastern Pacific Ocean, health risk, mercury.

**RESUMEN.** El mercurio (Hg) se incorpora principalmente en los seres humanos a través del consumo de alimentos contaminados. Se midió el Hg y se estimó el metilmercurio (MeHg) en moluscos enlatados que se venden en el noroeste de México para evaluar el riesgo para la salud de los consumidores. Se consideraron 5 tipos de moluscos: ostiones, almejas, pulpos, mejillones y calamares. La concentración de Hg en los mejillones fue significativamente ( $P < 0.05$ ) más baja que la de los otros bivalvos (ostras y almejas) y cefalópodos (calamares y pulpos). La concentración promedio de Hg en los bivalvos ( $0.013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) fue significativamente ( $P < 0.05$ ) menor que la de los cefalópodos ( $0.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Las concentraciones estimadas de MeHg también fueron menores en los bivalvos que en los cefalópodos. De acuerdo con nuestros resultados, no existe riesgo relacionado con el consumo de moluscos enlatados en el noroeste de México. La secuencia de las concentraciones de Hg fue pulpos > calamares = almejas > ostiones > mejillones. Las concentraciones de Hg y MeHg en los moluscos evaluados en este estudio estaban por debajo de los límites máximos permitidos para el consumo humano en México.

**Palabras clave:** metilmercurio, moluscos procesados, océano Pacífico oriental, riesgo a la salud, mercurio.



## INTRODUCTION

Mercury is naturally found in very low concentrations in aquatic ecosystems. Natural and anthropogenic sources contribute notable amounts of Hg to these ecosystems, which contaminate the water, sediments, and biota. The main industrial sources of atmospheric Hg, such as impurities in fuels and raw materials, are coal burning, mining, and industrial activities that process ores and other raw materials to produce metals and cement. Other notable sources of Hg stem from the intentional use of this element. The largest of these sources are artisanal and small-scale gold mining activities, followed by the wastes generated from consumer products, including those derived from metal recycling, the chlor-alkali industry, and the production of vinyl-chloride monomers (UNEP 2019).

At elevated concentrations, Hg is dangerous to human health and damages the central nervous system (Davidson et al. 2004). This damage can result in a loss of balance, weakness or difficulty coordinating the muscles used to speak, numbness in extremities, loss of hearing, blurred vision, loss of consciousness, and, in extreme cases, death. Among the organic forms of Hg, methyl-Hg (MeHg) is the most dangerous chemical species (Honda et al. 2006). In most organisms, the main pathway of Hg uptake is ingestion (Luoma and Rainbow 2005), thus the products that are consumed by humans that may contain Hg must be regularly monitored.

Mollusks are a diverse group of organisms that may be consumed either fresh or canned and are highly valued by consumers despite their potential Hg content. As such, it is imperative to monitor the Hg content of fresh and canned mollusks given the potential risk to human health. Indeed, the high market demand for mollusks necessitates special consideration and monitoring efforts for these food items. The most commonly purchased and consumed mollusks are clams, oysters, snails, slugs, octopuses, and squids, although this varies among regions. In Mexico, fresh mollusk consumption is low. For example, the per capita consumption of fresh oysters, squids, octopuses, and clams is less than 1 kg per year (CONAPESCA 2013). Currently, there is no consumption information available for canned shellfish.

To address this lack of much needed information, the content of Hg and MeHg were evaluated in domestic and imported canned mollusks sold in northwestern Mexico. This study assesses the health risk to consumers based on the Hg and MeHg concentrations in mollusks and the average consumption of fishery products in Mexico. In addition, this study compares the Hg concentrations in canned mollusks and fish in northwestern Mexico with those from other regions.

## MATERIALS AND METHODS

Canned mollusks were purchased in January 2014 in different supermarkets in Mazatlán, Sinaloa, Mexico. We evaluated 5 types of mollusks in this study: oysters, clams, octopuses, mussels, and squids. The oysters and clams were

## INTRODUCCIÓN

El mercurio (Hg) se encuentra de manera natural en concentraciones muy bajas en los ecosistemas acuáticos. Las fuentes naturales y antropogénicas contribuyen cantidades notables de Hg al medio acuático, lo cual provoca contaminación del agua, los sedimentos y la biota. Las principales fuentes industriales de Hg atmosférico, como impurezas en los combustibles y las materias primas, son la quema de carbón, la minería y las actividades industriales que procesan minerales y otras materias primas para producir metales y cemento. Otras fuentes importantes de Hg provienen del uso intencional de este elemento. La más grande de estas fuentes son las actividades mineras de oro artesanales y a pequeña escala, seguidas de los residuos generados por productos de consumo, incluidos los derivados del reciclaje de metales, la industria cloro-álcali y la producción de monómeros de cloruro de vinilo (UNEP 2019).

A concentraciones elevadas, el Hg es peligroso para la salud humana y daña el sistema nervioso central (Davidson et al. 2004). Este daño puede resultar en pérdida de equilibrio, debilidad o dificultad para coordinar los músculos utilizados para hablar, adormecimiento en las extremidades, pérdida de audición, visión borrosa, pérdida de conciencia y, en casos extremos, la muerte. Entre las formas orgánicas de Hg, el metilmercurio (MeHg) es la especie química más peligrosa (Honda et al. 2006). En la mayoría de los organismos, la principal vía de absorción de Hg es la ingestión (Luoma and Rainbow 2005), por lo tanto, los productos que son consumidos por los seres humanos y que pueden contener Hg deben ser monitoreados regularmente.

Los moluscos son un grupo diverso de organismos que pueden consumirse tanto frescos como enlatados y son muy valorados por los consumidores a pesar de su posible contenido de Hg. Por lo tanto, es imperativo monitorear el contenido de Hg en los moluscos frescos y enlatados debido al potencial riesgo para la salud humana. De hecho, la alta demanda en el mercado de los moluscos requiere una consideración especial y esfuerzos de monitoreo para estos alimentos. Los moluscos más comúnmente comprados y consumidos son las almejas, ostras, caracoles, babosas, pulpos y calamares, aunque esto varía según las regiones. En México, el consumo de moluscos frescos es bajo. Por ejemplo, el consumo per cápita de ostras frescas, calamares, pulpos y almejas es inferior a 1 kg por año (CONAPESCA 2013). Actualmente, no hay información de consumo disponible para mariscos enlatados.

Para abordar esta falta de información tan necesaria, se evaluó el contenido de Hg y MeHg en moluscos enlatados domésticos e importados vendidos en el noroeste de México. Este estudio evalúa el riesgo para la salud de los consumidores basado en las concentraciones de Hg y MeHg en los moluscos y el consumo promedio de productos pesqueros en México. Además, este estudio compara las concentraciones de Hg en moluscos enlatados y pescado en el noroeste de México con las de otras regiones.

produced in Mexico, whereas the octopuses, mussels, and squids were imported from the United States of America (USA), South Korea, and Spain, respectively. For each mollusk type, 10 cans were analyzed as individual samples. The cans were opened and drained, and one half of the product in each can was considered a sample.

The duplicate samples were placed in plastic containers, weighed, tagged, and frozen at  $-20^{\circ}\text{C}$ . The laboratory materials and plastic utensils used to store, manipulate, and process the samples were washed and rinsed with distilled water and then acid washed with 2 M HCl and 2 M  $\text{HNO}_3$ , followed by a final rinse with Milli-Q water (MilleporeSigma, Burlington, MA, USA; Moody and Lindstrom 1977). The samples were lyophilized ( $-49^{\circ}\text{C}$  and  $133 \times 10^{-3}$  mbar) for 3 days, and then manually ground in an agate mortar. The moisture percentage was determined by the difference in weight between the wet and dry samples. Aliquots ( $0.25 \pm 0.02$  g) of dried and homogenized tissues were digested according to the methods of Taylor et al. (2008), with modifications. The samples were placed in Teflon containers with 5 mL of concentrated nitric acid (trace metal grade; JT Baker, Phillipsburg, NJ, USA). The samples were allowed to pre-digest for 12 to 18 h at room temperature in an extraction hood, after which they were placed on a hot plate ( $120^{\circ}\text{C}$ ) for 3 h and allowed to cool. The digested samples were placed in plastic containers with screw-tops and diluted to 25 mL with Milli-Q water ( $18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$  resistivity).

The Hg content was analyzed by cold vapor atomic absorption spectrophotometry (CV-AAS) in a 410 Mercury Analyzer (Buck Scientific, East Norwalk, CN, USA). To evaluate the quality of the analyses, blanks were run with every batch of 20 samples, and a certified reference material (NIST 2976, mussel tissue) was used ( $98.7 \pm 3.1\%$  recovery). The limit of detection of Hg (2 standard deviations of a blank) was  $0.002 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

The MeHg:Hg ratio in mollusks ranges from 38–48% (Hight and Chen 2006). In bivalves, the MeHg:Hg ratio was estimated considering a mean MeHg:Hg ratio of 0.3915, according to the published information of these organisms (Claise et al. 2001, Pan and Wang 2011, Apeti et al. 2012). The mean MeHg:Hg ratio used for octopuses and squids was 0.81 (Annual et al. 2018) and 0.92 (Miklavčič et al. 2011), respectively. The health risk to consumers was assessed with the hazard quotient (HQ) obtained with the following equation (Newman 2009):

$$HQ = \frac{E}{RfD}, \quad (1)$$

where  $E$  is the level of exposure and  $RfD$  is the reference dose (Hg:  $0.500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  body weight per day; MeHg:  $0.100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  body weight per day) according to the Environmental Protection Agency (2001). The level of exposure was determined with the following equation:

$$E = C \frac{I}{W}, \quad (2)$$

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los moluscos enlatados fueron adquiridos en enero de 2014 en diferentes supermercados de Mazatlán, Sinaloa, México. Evaluamos 5 tipos de moluscos en este estudio: ostiones, almejas, pulpos, mejillones y calamares. Los ostiones y las almejas fueron enlatados en México, mientras que los pulpos, mejillones y calamares fueron importados de los Estados Unidos de América, Corea del Sur y España, respectivamente. Para cada tipo de molusco se analizaron 10 latas como muestras individuales. Las latas se abrieron y se drenaron y la mitad del producto de cada lata se consideró como una muestra.

Las muestras por duplicado se colocaron en recipientes de plástico, se pesaron, se etiquetaron y se congelaron a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Los materiales de laboratorio y utensilios de plástico utilizados para almacenar, manipular y procesar las muestras fueron lavados, enjuagados con agua destilada y lavados con ácido clorhídrico (HCl) 2 M y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 2 M, seguido de un enjuague final con agua Milli-Q (MilleporeSigma, Burlington, MA, EE. UU.; Moody y Lindstrom 1977). Las muestras fueron liofilizadas ( $-49^{\circ}\text{C}$  y  $133 \times 10^{-3}$  mbar) durante 3 días y posteriormente molidas a mano en un mortero de ágata. El porcentaje de humedad se determinó por la diferencia del peso húmedo y el peso seco de las muestras. Las alícuotas ( $0.25 \pm 0.02$  g) de tejido seco y homogenizado se digirieron de acuerdo al procedimiento modificado de Taylor et al. (2008). Las muestras se colocaron en recipientes de teflón con 5 mL de ácido nítrico concentrado (grado metal traza, JT Baker, Phillipsburg, NJ, EE. UU.) Las muestras se dejaron en predigestión de 12 a 18 h a temperatura ambiente en una campana de extracción, después de lo cual se colocaron en una placa de calentamiento a  $120^{\circ}\text{C}$  durante 3 h y se dejaron enfriar. Las muestras digeridas se almacenaron en recipientes de plástico con tapa de rosca y se diluyeron a 25 mL con agua Milli-Q ( $18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$  de resistividad).

El contenido de Hg fue analizado mediante espectrofotometría de absorción atómica de vapor frío (EAA-VF) en un analizador de Hg modelo 410 (Buck Scientific, East Norwalk, CN, EE. UU.). Para evaluar la calidad de los análisis se utilizaron blancos con cada lote de 20 muestras y material de referencia certificado (tejido de mejillón, NIST 2976; porcentaje de recuperación de  $98.7 \pm 3.1$ ). El límite de detección de Hg (2 desviaciones estándar de la lectura de un blanco) fue de  $0.002 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

La proporción de MeHg:Hg en moluscos oscila entre el 38% y el 48% (Hight y Chen 2006). En bivalvos, proporción de MeHg:Hg se estimó considerando un promedio de la relación de 0.3915 de acuerdo a la información publicada en este grupo de organismos (Claise et al. 2001, Pan y Wang 2011, Apeti et al. 2012). El promedio de la relación de MeHg:Hg utilizada para pulpos y calamares fue de 0.81 (Annual et al. 2018) y 0.92 (Miklavčič et al. 2011), respectivamente. El riesgo para la salud de los consumidores se evaluó con el

where  $C$  is the concentration ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) of Hg or MeHg in the product of interest,  $I$  is the rate of ingestion of mollusks per day in Mexico (1.07 grams per person per day; CONAPESCA 2013), and  $W$  is the average weight of an adult in Mexico (70.00 kg; Delgado-Álvarez et al. 2015).

The differences in Hg concentrations among the mollusks sampled in this study were evaluated by Kruskal–Wallis and post hoc Dunn tests. The differences in Hg concentrations between bivalves (mussels, oysters, and clams) and cephalopods (squids and octopuses) were assessed by Mann–Whitney tests in GraphPad Prism v. 4.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA) at a confidence level of 95%.

## RESULTS

The mean Hg concentrations ranged from  $0.020 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  dry weight in octopuses to  $0.008 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  dry weight in mussels (Table 1). The average Hg concentrations in mollusks followed the order of octopuses > squids = clams > oysters > mussels. The Hg concentrations in mussels were significantly ( $P < 0.05$ ) lower than those in squids, oysters, clams, and octopuses. Given that bivalves and cephalopods belong to different trophic levels, the Hg concentrations in mussels, oysters, and clams were averaged and compared with the average values of squids and octopuses. The mean Hg concentration of bivalves ( $0.013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  dry weight) was significantly ( $P < 0.05$ ) lower than that of cephalopods ( $0.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  dry weight).

The mean concentrations of Hg and MeHg ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  wet weight) and their corresponding HQ values are presented in Table 2. Hg and MeHg concentrations in the mollusks in this study followed the order of cephalopods (octopuses and squids) > bivalves (mussels, oysters, and clams). The Hg concentrations varied among mollusks, although none of the products contained Hg concentrations that were above the maximum permissible limits for Hg ( $1.000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) or MeHg ( $0.500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) established by the Mexican legislation for cephalopods (NOM-129 1993; SSA 1997) and bivalves (NOM-032 1993; SSA 1994). HQ values were below 1.0 for Hg and MeHg, thus the consumption of the canned mollusks evaluated in this study does not carry a health risk. As was observed in the Hg and MeHg concentrations, both  $\text{HQ}_{\text{Hg}}$  and  $\text{HQ}_{\text{MeHg}}$  were higher in cephalopods than in bivalves. Although the potential exposure to Hg and MeHg by consuming canned mollusks is higher in cephalopods than in bivalves, it is unlikely to result in adverse health effects, even for vulnerable groups within the population.

From our results and the studies presented in Table 3, it can be seen that the Hg concentrations were generally low and variable. The highest Hg concentrations ( $0.140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) were reported in octopuses canned in Portugal, whereas the lowest concentration ( $0.003 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) corresponded to the canned mussels evaluated in our study. The canned mollusks sold in Mexico have Hg concentrations that are not currently of concern; however, information

cociente de peligro (HQ) obtenido con la siguiente ecuación (Newman 2009):

$$HQ = \frac{E}{RfD}, \quad (1)$$

donde  $E$  es el nivel de exposición y  $RfD$  es la dosis de referencia (Hg  $0.500 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  peso corporal $\cdot\text{d}^{-1}$ ; MeHg  $0.100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  peso corporal $\cdot\text{d}^{-1}$ ) de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (EPA 2001). El nivel de exposición se calculó a partir de la ecuación 2:

$$E = C \frac{I}{P}, \quad (2)$$

donde  $C$  es la concentración (en  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso húmedo) de Hg o MeHg en el producto de interés,  $I$  es la tasa de consumo aparente de moluscos por día (1.070 gramos por persona por día) en México (CONAPESCA 2013) y  $P$  es el peso promedio de un adulto (70.00 Kg) en México (Delgado-Álvarez et al. 2015).

Las diferencias de las concentraciones de Hg entre los moluscos estudiados se definieron por medio de una prueba de Kruskal-Wallis y una post-prueba de Dunn. Las diferencias de las concentraciones de Hg entre los bivalvos (mejillones, ostiones y almejas) y los cefalópodos (calamares y pulpos) se evaluaron por una prueba de Mann-Whitney en GraphPad Prism v. 4.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, EE. UU.) con un nivel de confianza del 95%.

## RESULTADOS

Las concentraciones promedias de Hg fluctuaron desde  $0.020 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso seco en los pulpos hasta  $0.008 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso seco en los mejillones (Tabla 1). Las concentraciones promedio de Hg en moluscos siguieron el siguiente orden: pulpos > calamares = almejas > ostiones > mejillones. Las concentraciones de Hg en los mejillones fueron significativamente ( $P < 0.05$ ) menores que en los calamares, ostiones, almejas y pulpos. Considerando que los bivalvos y los cefalópodos pertenecen a diferentes niveles tróficos, se promediaron las concentraciones de Hg en mejillones, ostiones y almejas y se compararon con las concentraciones promedio de Hg en calamares y pulpos. Las concentraciones promedias de Hg en los bivalvos ( $0.013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso seco) fueron significativamente ( $P < 0.05$ ) menores que en los cefalópodos ( $0.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso seco).

Las concentraciones medias de Hg y MeHg ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  en peso húmedo) y sus correspondientes valores de HQ se presentan en la Tabla 2. El orden descendiente de las concentraciones de Hg y MeHg siguieron el orden de cefalópodos (pulpos y calamares) > bivalvos (mejillones, ostiones y almejas). Las concentraciones de Hg fueron variables, pero en ninguno de los productos se excedieron los límites máximos permisibles de Hg ( $1.000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso húmedo) y MeHg ( $0.500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso húmedo) considerados en la legislación mexicana para cefalópodos (NOM-129, 1993; SSA 1997) y bivalvos

**Table 1.** Product information and average mercury concentration (Hg; mg·kg<sup>-1</sup> dry weight) in mollusk samples.**Tabla 1.** Información de los productos y concentración promedio de mercurio (Hg, mg·kg<sup>-1</sup> en peso seco) en las muestras de moluscos.

| Product   | Brand | Origin                   | Presentation  | <i>n</i> | Hg                         |
|-----------|-------|--------------------------|---|----------|----------------------------|
| Mussels   | A     | South Korea              | Smoked mussels in vegetable oil   | 10       | 0.008 <sup>a</sup> ± 0.012 |
| Squids    | B     | Spain                    | Cooked <i>Dosidicus gigas</i> with tomato, sunflower oil, ink substitute, sugar, and starch | 10       | 0.016 <sup>b</sup> ± 0.002 |
| Oysters   | C     | Mexico                   | Smoked oysters in edible oil  | 10       | 0.014 <sup>b</sup> ± 0.005 |
| Clams     | D     | Mexico                   | Cooked clams in brine   | 10       | 0.016 <sup>b</sup> ± 0.028 |
| Octopuses | E     | United States of America | Cooked octopuses in cottonseed oil  | 10       | 0.020 <sup>b</sup> ± 0.027 |

Different superscript letters indicate significant ( $P < 0.05$ ) differences.

**Table 2.** Mean mercury (Hg) and methylmercury (MeHg) concentrations (mg·kg<sup>-1</sup> wet weight) and corresponding hazard quotient (HQ) values in the canned mollusks evaluated in this study.**Tabla 2.** Concentraciones (mg·kg<sup>-1</sup> en peso húmedo) promedio de mercurio (Hg) y metilmercurio (MeHg) y sus cocientes de riesgo (HQ<sub>Hg</sub> y HQ<sub>MeHg</sub>, respectivamente) correspondientes en los moluscos enlatados estudiados.

| Product   | Hg     | HQ <sub>Hg</sub> | MeHg   | HQ <sub>MeHg</sub> |
|-----------|--------|------------------|--------|--------------------|
| Mussels   | 0.0013 | 0.00004          | 0.0005 | 0.000076           |
| Squids    | 0.0032 | 0.00010          | 0.0026 | 0.000390           |
| Oysters   | 0.0022 | 0.00007          | 0.0009 | 0.000140           |
| Clams     | 0.0026 | 0.00008          | 0.0010 | 0.000150           |
| Octopuses | 0.0040 | 0.00012          | 0.0037 | 0.000560           |

related to other toxic elements, consumption rates, and the co-occurrence of selenium is necessary for precise assessments of consumer health risks.

Among fishery products, finfish constitute the main source of Hg exposure to humans in tropical and subtropical regions (Costa et al. 2012). To provide additional context for the Hg concentrations in canned bivalves sold in northwestern Mexico, we compared these concentrations to those of canned fish. The Hg concentrations in our study (0.003–0.007 mg·kg<sup>-1</sup> wet weight) were 2 orders of magnitude lower than those of canned tuna (*Thunnus germo*; canned in water: 0.431 mg·kg<sup>-1</sup> wet weight, canned in oil: 0.419 mg·kg<sup>-1</sup> wet weight) from the USA (Burger and Gochfeld 2004) and *Thunnus albacares* canned in water (0.362 mg·kg<sup>-1</sup> wet weight) from Mexico (Ruelas-Inzunza et al. 2011).

## DISCUSSION

Bivalve mollusks have been extensively used as biomonitors of marine pollution because of their sedentary nature

(NOM-032, 1993; SSA 1994). Los valores de HQ fueron inferiores a 1.0 para Hg y MeHg, por lo tanto, el consumo de los moluscos enlatados evaluados en este estudio no representa un riesgo para la salud. Como se observó en las concentraciones de Hg y MeHg, los valores de HQ<sub>Hg</sub> y HQ<sub>MeHg</sub> fueron mayores en los cefalópodos que en los bivalvos. Aunque la exposición potencial al Hg y MeHg al consumir moluscos enlatados es mayor en los cefalópodos que en los bivalvos, es poco probable que cause efectos adversos en la salud, incluso para los grupos vulnerables dentro de la población.

A partir de nuestros resultados y los de otros estudios presentados en la Tabla 3, puede observarse que, de manera general, las concentraciones de Hg fueron bajas y variables. Las mayores concentraciones de Hg (0.140 mg·kg<sup>-1</sup> en peso húmedo) se reportaron en pulpos enlatados en Portugal, mientras que las menores concentraciones (0.003 mg·kg<sup>-1</sup> en peso húmedo) correspondieron a los mejillones enlatados utilizados en nuestro estudio. Los moluscos enlatados que se venden en México tienen niveles de Hg que no son de preocupación, no obstante, se requiere información relacionada con



and ability to concentrate metals such as Hg. Indeed, more information is available for bivalve mollusks than cephalopods, which may reflect the heightened popularity and accessibility of bivalve products among diverse sectors of the population. In Mexico, detailed information related to the consumption of fishery products is nonexistent (Ruelas-Inzunza et al. 2011). Thus, it is difficult to accurately estimate the health risks associated with the consumption of mollusk products.

The Hg concentrations in this study were similar to those reported by Gutiérrez et al. (2006). Those authors found that mussels exhibited lower Hg concentrations than those of

otros elementos tóxicos, la tasa de consumo y la presencia de selenio para hacer una evaluación precisa de riesgo a la salud del consumidor.

Entre los productos pesqueros, los peces son considerados como la principal fuente de Hg a los humanos en regiones tropicales y subtropicales (Costa et al. 2012). Para poner en contexto las concentraciones de Hg en los bivalvos enlatados que se venden en el noroeste de México, se hizo una comparación con peces enlatados. Las concentraciones de Hg en nuestro estudio (rango de 0.003-0.007 mg·kg<sup>-1</sup> en peso húmedo) estuvieron 2 órdenes de magnitud por debajo de la del atún enlatado *Thunnus germo* (0.431 mg·kg<sup>-1</sup> peso húmedo, enlatado

**Table 3.** Comparisons of the mercury concentrations (mg·kg<sup>-1</sup> wet weight) in the mollusks sold in north-western Mexico and those of canned mollusks from other areas.

**Tabla 3.** Comparación de las concentraciones de mercurio (Hg, mg·kg<sup>-1</sup> en peso húmedo) en los moluscos estudiados que se expenden en el noroeste de México con los bivalvos y cefalópodos enlatados de otras áreas.

| Species            | Area of consumption | Hg     | Reference                |
|--------------------|---------------------|--------|--------------------------|
| Bivalves           |                     |        |                          |
| Mussel             | Portugal            | 0.030  | Lourenço et al. (2004)   |
| Mussel             | Venezuela           | 0.099* | Tahán et al. (1995)      |
| Mussel             | Spain               | 0.027  | Gutiérrez et al. (2006)  |
| Mussel             | Chile               | 0.017* | De Gregori et al. (1994) |
| Mussel             | Chile               | 0.010* | De Gregori et al. (1994) |
| Mussel             | India               | 0.045  | Lekshmanan (1988)        |
| Mussel             | Mexico              | 0.003  | This study               |
| Cockle             | Venezuela           | 0.023* | Tahán et al. (1995)      |
| Cockle             | Spain               | 0.066  | Gutiérrez et al. (2006)  |
| Variegated scallop | Spain               | 0.033  | Gutiérrez et al. (2006)  |
| Razor shell        | Spain               | 0.021  | Gutiérrez et al. (2006)  |
| Oyster             | India               | 0.070  | Lekshmanan (1988)        |
| Oyster             | Mexico              | 0.004  | This study               |
| Clam               | Mexico              | 0.005  | This study               |
| Cephalopods        |                     |        |                          |
| Squid              | Portugal            | 0.070  | Lourenço et al. (2004)   |
| Squid              | Mexico              | 0.005  | This study               |
| Octopus            | Portugal            | 0.140  | Lourenço et al. (2004)   |
| Octopus            | Mexico              | 0.007  | This study               |

\*Originally reported on the basis of dry weight; conversion to wet weight was conducted considering 67% humidity

other canned bivalves from Spain, which may have been due to their short life cycles and low trophic positions. In a study that evaluated diverse components of a marine food web in Bohai Bay, China, the trophic positions (determined by stable C and N isotopes) of bivalves ranged from 2.15 in the bay scallop (*Argopecten irradians*) to 2.17 in the short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*), with bivalves occupying lower trophic positions than those of either fish or seabirds (Yi et al. 2005). Notably, fish that occupy elevated trophic positions (e.g., tuna) exhibit elevated Hg concentrations compared to those that occupy lower trophic positions. Similar patterns were found by Blanco et al. (2008) and Olmedo et al. (2013) when comparing Hg concentrations in canned fish and mollusks consumed in Spain. These authors found elevated Hg concentrations in tuna when compared to those of cephalopods or bivalves.

Other authors have reported variable Hg concentrations in various mollusk and fish species. Karimi et al. (2013) found elevated intraspecific variability in Hg concentrations among diverse bivalve species from Long Island, New York. In a study with various canned mollusks from Portugal (Lourenço et al. 2004), the Hg concentrations were higher ( $0.110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight) in cephalopods (squids and octopuses) than in blue mussels ( $0.030 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  wet weight). Interestingly, in Oman, Al-Mughairi et al. (2013) found that Hg concentrations were not significantly different between cephalopods and bivalves. These authors argued that the high variability in metal concentrations may have been responsible for the lack of differences. In a study with canned tuna in oil matrices, salads, sauces, and pastes, no statistically significant differences were found among presentations, and it was concluded that Hg content was not affected by the packaging medium (Pawlaczyk et al. 2020). High variability in metal content among canned fisheries products makes it difficult to establish patterns of Hg accumulation. This variability may be due to mixing differently sized specimens during canning and the environmental conditions of the sites in which the mollusks and fish were collected.

From the information provided on the labels of fisheries products, we determined that the oysters and clams evaluated in this study were caught and processed in Mexico, whereas the mussels, squids, and octopuses were imported from South Korea, Spain, and the United States, respectively. The origin of fishery products is important in terms of the potential degree of metal accumulation in the collection site. Unfortunately, accurate information on this topic is nonexistent in Mexico. In addition to the origin, other factors that may account for the Hg concentrations in canned mollusks are the pH of the canned products, oxygen concentration in the headspace, storage time, and humidity of the storage location (Oduoza 1992).

The variation in metal concentrations among canned products can also be the result of thermal processing prior to canning. Indeed, cooking has been found to affect the

en agua;  $0.419 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  peso húmedo, enlatado en aceite) de los Estados Unidos de América (Burger y Gochfeld 2004) y *Thunnus albacares* enlatado en agua ( $0.362 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  peso húmedo) de México (Ruelas-Inzunza et al. 2011).

## DISCUSIÓN

Los moluscos bivalvos se han utilizado ampliamente como biomonitores de la contaminación marina debido a su naturaleza sedentaria y su capacidad para concentrar metales como el Hg. De hecho, hay más información disponible sobre los moluscos bivalvos que sobre los cefalópodos, lo cual puede reflejar la mayor popularidad y accesibilidad de los productos derivados de los moluscos bivalvos entre diversos sectores de la población. En México no existe información detallada acerca de los patrones de consumo de productos pesqueros (Ruelas-Inzunza et al. 2011). Por lo tanto, es difícil estimar con precisión los riesgos para la salud asociados con el consumo de productos de moluscos.

Las concentraciones de Hg en este estudio fueron similares a las reportadas por Gutiérrez et al. (2006). Esos autores encontraron que los mejillones mostraron concentraciones menores de Hg que otros bivalvos enlatados de España, lo cual puede ser debido a su ciclo de vida corto y baja posición trófica. En un estudio que evaluó diversos componentes de una cadena alimentaria marina en la bahía de Bohai, China, las posiciones tróficas (determinadas por isótopos estables de C y N) de los bivalvos variaron desde 2.15 en la vieira de la bahía (*Argopecten irradians*) hasta 2.17 en la almeja de cuello corto (*Ruditapes philippinarum*), con los bivalvos ocupando posiciones tróficas inferiores a las de los peces o las aves marinas (Yi et al., 2005). Cabe destacar que los peces que ocupan posiciones tróficas elevadas (por ejemplo, el atún) presentan concentraciones elevadas de Hg en comparación con aquellos que ocupan posiciones tróficas más bajas. Se encontraron patrones similares en los estudios de Blanco et al. (2008) y Olmedo et al. (2013) al comparar las concentraciones de Hg en pescado enlatado y moluscos consumidos en España. Estos autores encontraron concentraciones elevadas de Hg en el atún en comparación con los cefalópodos o los bivalvos.

Otros autores han informado de concentraciones variables de Hg en varias especies de moluscos y peces. Karimi et al. (2013) encontraron una elevada variabilidad intraespecífica de las concentraciones de Hg en diversas especies de bivalvos de Long Island, Nueva York. En un estudio con moluscos enlatados de Portugal (Lourenço et al. 2004), las concentraciones de Hg fueron mayores ( $0.110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso húmedo) en los cefalópodos (calamares y pulpos) que en el mejillón azul ( $0.030 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en peso húmedo). Interesantemente, en Omán, Al-Mughairi et al. (2013) encontraron que el Hg no fue significativamente diferente entre los cefalópodos y los bivalvos. Estos autores argumentaron que la alta variabilidad en las concentraciones de metales pudo haber sido la razón por la falta de diferencias. En un estudio con atún enlatado en aceites ensaladas, salsa y pasta, no hubo

concentrations of metals in seafood. Although Morgan et al. (1997) found that Hg concentrations in raw seafood remained the same after cooking, Torres-Escribano et al. (2010) found that the Hg concentrations increased in cooked seafood due to water loss. Similarly, cooked bivalve mollusk (*Lucina pectinata* and *Anomalocardia brasiliiana*) samples were found to exhibit significantly higher Hg concentrations than those of raw samples (Costa et al. 2016), which may have been due to the influence of heat on the formation of complexes between Hg chemical species and sulfhydryl groups, such as methylmercury-cysteine, in muscle tissues (Clarkson and Magos 2006).

To compare our results with those of studies that reported their results on the basis of dry and wet weights, we estimated a moisture percentage for our study (67%). This value is similar to those reported by Gutiérrez et al. (2007) for canned variegated scallops (*Chlamys varia*) of 7 commercial brands sold in Spain (67.34–71.89%). Variations in humidity may be due to the thermal processes used during canning, as Gutiérrez et al. (2007) reported for mussels. Furthermore, McCarron et al. (2008) reported that the moisture content ranged from 79.1–79.2% in fresh mussels (*Mytilus edulis*) from Ireland, whereas moisture content ranged from 67.4–67.8% in autoclaved specimens. Thus, heat processes may decrease the moisture content, which results in higher elemental concentrations than those of fresh products.

The Hg concentrations in this study varied by an order of magnitude. Nevertheless, the cephalopods commonly used to produce canned goods showed higher Hg concentrations than those of canned bivalves. Thus, Hg concentrations in this study followed the order of octopuses > squids = clams > oysters > mussels. The high variability in Hg concentrations in this study might be related to the conditions of the sites in which the mollusks were collected, the thermal processes used to prepare products, and the practice of mixing differently sized specimens during canning. When comparing our results to those of canned mollusks from different regions, the Hg concentrations were low and variable. Indeed, none of the Hg concentrations in the mollusks were above the maximum permissible limit of 1.0 mg·kg<sup>-1</sup> wet weight established by Mexican legislation. When compared to those of canned fish, the Hg concentrations in the mollusks in this study were lower, especially when compared to those of fish occupying high trophic levels.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Public Education of Mexico (grant number 7596.20-P). We thank the C. Suárez-Gutiérrez for their valuable support and computing assistance and V. Soto-Zúñiga for their assistance in the laboratory.

Copyediting by MacTavish Scientific Editing.

diferencias significativas entre las diferentes presentaciones y se concluyó que el contenido de Hg no se ve afectado por el medio en el cual se enlata (Pawlaczyk et al. 2020). La elevada variabilidad en el contenido de metales en los moluscos enlatados dificulta el establecimiento de patrones de acumulación de Hg. Esta variabilidad puede deberse a la mezcla de especímenes de diferentes tamaños durante el enlatado y a las condiciones ambientales de los lugares donde se recolectaron los moluscos y peces.

A partir de la información proporcionada en las etiquetas de los productos pesqueros, determinamos que los ostiones y almejas evaluadas en este estudio fueron capturadas y procesadas en México, mientras que los mejillones, calamares y pulpos fueron importados de Corea del Sur, España y Estados Unidos, respectivamente. El origen de los productos pesqueros es importante en términos de la potencial de acumulación de metales en el lugar de recolección. Desafortunadamente, información precisa sobre este tema no existe en México. Además del origen, otros factores que pueden influir en las concentraciones de Hg en moluscos enlatados son el pH del contenido de la lata, la concentración de oxígeno en la lata, el tiempo de almacenamiento y la humedad en el lugar de almacenamiento (Oduoza 1992).

La variación en las concentraciones de metales entre los productos enlatados también puede ser el resultado del procesamiento térmico previo al enlatado. De hecho, se ha descubierto que la cocción afecta las concentraciones de metales en los mariscos. Aunque Morgan et al. (1997) encontraron que las concentraciones de Hg en los mariscos frescos permanecieron constantes después de la cocción, Torres-Escribano et al. (2010) demostraron que la concentración de Hg en los mariscos cocinados se incrementa debido a la pérdida de agua. Similarmente, los moluscos bivalvos (*Lucina pectinata* y *Anomalocardia brasiliiana*) cocinados mostraron niveles de Hg significativamente mayores que los de las muestras crudas (Costa et al. 2016), lo cual pudo haber sido debido a la influencia del calor en la formación de complejos entre las especies químicas de Hg y los grupos sulfhidrilo, como el metilmercurio-cisteína, en los tejidos musculares (Clarkson y Magos 2006).

Para comparar nuestros resultados con aquellos de estudios que reportan sus resultados en base a pesos secos y húmedos, estimamos un porcentaje de humedad para nuestro estudio (67%). Este porcentaje es comparable a los valores reportados por Gutiérrez et al. (2007) para vieiras (*Chlamys varia*) enlatadas de 7 marcas vendidas en España (67.34–71.89%). Las variaciones en la humedad pueden deberse al proceso de calentamiento utilizado para el enlatado según lo reportado por Gutiérrez et al. (2007) en los mejillones. Además, McCarron et al. (2008) reportaron que el contenido de humedad varió de 79.10–79.20% en los mejillones frescos (*Mytilus edulis*) de Irlanda, mientras que la humedad fluctuó de 67.40–67.80% en los individuos sometidos a la autoclave. Por lo tanto, los procesos de calor pueden disminuir el contenido de humedad,



## REFERENCIAS

- Al-Mughairi S, Yesudhasan P, Al-Busaidi M, Al-Waili A, Al-Rahbi WAK, Al-Mazrooei N, Al-Habsi SH. 2013. Concentration and exposure assessment of mercury in commercial fish and other seafood marketed in Oman. *J Food Sci.* 78(7):82-90. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12150>
- Annual ZF, Maher W, Krikowa F, Hakim L, Ahmad NI, Foster S. 2018. Mercury and risk assessment from consumption of crustaceans, cephalopods and fish from West Peninsular Malaysia. *Microchem J.* 140:214-221. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.04.024>
- Apeti DA, Lauenstein GG, Evans DW. 2012. Recent status of total mercury and methyl mercury in the coastal waters of the northern Gulf of Mexico using oysters and sediments from NOAA's mussel watch program. *Mar Pollut Bull.* 64:2399-2408. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.006>
- Blanco SL, González JC, Vieites JM. 2008. Mercury, cadmium and lead levels in samples of the main traded fish and shellfish species in Galicia, Spain. *Food Addit Contam Part B.* 1(1):15-21. <https://doi.org/10.1080/19393210802236893>
- Burger J, Gochfeld M. 2004. Mercury in canned tuna: white versus light and temporal variation. *Environ Res.* 96(3):239-249. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2003.12.001>
- Claissé D, Cossa D, Bretaudeau-Sanjuan J, Touchard G, Bombléd B. 2001. Methylmercury in molluscs along the French coast. *Mar Pollut Bull.* 42(4):329-332. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(01\)00036-4](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(01)00036-4)
- Clarkson TW, Magos L. 2006. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Crit Rev Toxicol.* 36(8):609-662. <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- [CONAPESCA] Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura. 2013. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2013. Mexico: CONAPESCA. 298 p.
- Costa FN, Korn MGA, Brito GB, Ferlin S, Fostier AH. 2016. Preliminary results of mercury levels in raw and cooked seafood and their public health impact. *Food Chem.* 192:837-841. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.081>
- Costa MF, Landing WM, Kehrig HA, Barletta M, Holmes CD, Barrocas PRG, Evers DC, Buck DG, Vasconcellos AC, Hacon SS, et al. 2012. Mercury in tropical and subtropical coastal environments. *Environ Res.* 119:88-100. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.008>
- Davidson PW, Myers GJ, Weiss B. 2004. Mercury exposure and child development outcomes. *Pediatrics.* 113(3):1023-1029. <https://doi.org/10.1542/peds.113.S3.1023>
- De Gregori I, Delgado D, Pinochet H, Gras N, Muñoz L, Bruhn C, Navarrete G. 1994. Cadmium, lead, copper and mercury levels in fresh and canned bivalve mussels *Tagelus dombeii* (Navajuela) and *Semelle solida* (Almeja) from the Chilean coast. *Sci Tot Environ.* 148(1):1-10. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90367-0](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90367-0)
- Delgado-Álvarez CG, Ruelas-Inzunza J, Osuna-López JI, Voltolina D, Frías-Espericueta MG. 2015. Total mercury content in cultured oysters from NW Mexico: health risk assessment. *Bull Environ Contam Toxicol.* 94:209-213. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1430-3>
- [EPA] Environmental Protection Agency. 2001. Water quality criterion for the protection of human health: methylmercury. Washington (DC): EPA. 308 p.
- Gutiérrez AJ, González-Weller D, González T, Burgos A, Lozano G, Reguera JI, Hardisson A. 2007. Content of toxic heavy metals (mercury, lead, and cadmium) in canned variegated scallops (*Chlamys varia*). *J Food Prot.* 70(12):2911-2915. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.12.2911>
- lo que resulta en concentraciones más altas de elementos que las de los productos frescos.
- Las concentraciones de Hg en este estudio variaron en un orden de magnitud. Sin embargo, los cefalópodos comúnmente utilizados para producir alimentos enlatados mostraron concentraciones de Hg más altas que las de los bivalvos enlatados. Por lo tanto, las concentraciones de Hg en este estudio siguieron el orden de pulpos > calamares = almejas > ostiones > mejillones. La elevada variabilidad de las concentraciones de Hg en este estudio podría estar relacionada con las condiciones del sitio de recolección de las muestras, el proceso térmico utilizado durante el enlatado y la mezcla de individuos de diferentes tallas durante el enlatado. Al comparar nuestros resultados con los de los moluscos enlatados de diferentes regiones, se puede concluir que las concentraciones de Hg fueron bajas y variables. De hecho, ninguna de las concentraciones de Hg en los moluscos superaba el límite máximo permisible de 1.0 mg·kg<sup>-1</sup> de peso húmedo establecido por la legislación mexicana. En comparación con los peces enlatados, las concentraciones de Hg en los moluscos en este estudio eran más bajas, especialmente en comparación con las de los peces que ocupan niveles tróficos altos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Secretaría de Educación Pública (proyecto número 7596.20-P). Agradecemos a C. Suárez-Gutiérrez por su apoyo en labores de cómputo y V. Soto-Zúñiga por su ayuda en el laboratorio.

Traducido al español por los autores.

- Gutiérrez AJ, Lozano G, González T, Reguera JI, Hardisson A. 2006. Mercury content in tinned molluscs (mussel, cockle, variegated scallop, and razor shell) normally consumed in Spain. *J Food Prot.* 69(9):2237-2240. <http://doi.org/10.4315/0362-028X-69.9.2237>
- Hight SC, Cheng J. 2006. Determination of methylmercury and estimation of total mercury in seafood using high performance liquid chromatography (HPLC) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS): method development and validation. *Anal Chim Acta.* 567(2):160-172. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.03.048>
- Honda S, Hylander L, Sakamoto M. 2006. Recent advances in evaluation of health effects on mercury with special reference to methylmercury— a minireview. *Environ Health Prev Med.* 11:171-176. <https://doi.org/10.1007/bf02905275>
- Karimi R, Frisk M, Fisher NS. 2013. Contrasting food web factor and body size relationships with Hg and Se concentrations in marine biota. *PLOS ONE.* 8(9):1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074695>
- Lekshmanan PT. 1988. Heavy metals in commercially processed molluscan products in relation to quality. *CMFRI Bull.* 42(2):417-422.
- Lourenço HM, Afonso C, Martins MF, Lino AR, Nunes ML. 2004. Levels of toxic metals in canned seafood. *J Aquat Food Prod*

- Tech. 13(3):117-125.  
[https://doi.org/10.1300/J030v13n03\\_11](https://doi.org/10.1300/J030v13n03_11)
- Luoma SN, Rainbow PS. 2005. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept. *Environ Sci Tech.* 39(7):1921-1931.  
<https://doi.org/10.1021/es048947e>
- McCarron P, Kilcoyne J, Hess P. 2008. Effects of cooking and heat treatment on concentration and tissue distribution of okadaic acid and dinophysistoxin-2 in mussels (*Mytilus edulis*). *Toxicon.* 51(6):1081-1089.  
<https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2008.01.009>
- Miklavčič A, Stibilj V, Heath E, Polak T, Tratnik JS, Klavž J, Mazej D, Horvat M. 2011. Mercury, selenium, PCBs and fatty acids in fresh and canned fish available on the Slovenian market. *Food Chem.* 124:711-720.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.040>
- Moody JR, Lindstrom RM. 1977. Selection and cleaning of plastic containers for storage of trace element samples. *Anal Chem.* 49(14):2264-2267.  
<https://doi.org/10.1021/ac50022a039>
- Morgan JN, Berry MR, Graves RL. 1997. Effects of commonly used cooking practices on total mercury concentration in fish and their impact on exposure assessments. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 7(1):119-133.
- Newman MC. 2009. *Fundamentals of Ecotoxicology*. Boca Raton (FL): CRC Press. 571 p.
- [SSA] Secretaría de Salubridad y Asistencia. 1997 DIC 10. NORMA Oficial Mexicana NOM-129-SSA1-1995, Bienes y servicios. Productos de la pesca: secos-salados, ahumados, moluscos cefalópodos y gasterópodos frescos-refrigerados y congelados. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Mexico City (Mexico): Diario Oficial de la Federación. 32 p.
- [SSA] Secretaría de Salubridad y Asistencia. 1994 MAR 23. Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-032-SSA1-1993, Bienes y servicios. Productos de la pesca. Moluscos bivalvos en conserva. Especificaciones sanitarias. Mexico City (Mexico): Diario Oficial de la Federación. 5 p.
- Olmedo P, Pla A, Hernández AF, Barbier F, Ayouni L, Gil F. 2013. Determination of toxic elements (mercury, cadmium, lead, tin and arsenic) in fish and shellfish samples. Risk assessment for the consumers. *Environ Int.* 59:63-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.05.005>
- Oduza CF. 1992. Studies of food value and contaminants in canned foods. *Food Chem.* 44(1):9-12.  
[https://doi.org/10.1016/0308-8146\(92\)90250-6](https://doi.org/10.1016/0308-8146(92)90250-6)
- Pan K, Wang W-X. 2011. Mercury accumulation in marine bivalves: Influences of biodynamics and feeding niche. *Environ Pollut.* 159(10):2500-2506.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.029>
- Pawlaczyk A, Przerzywacz A, Gajek M, Szykowska-Jozwik MI. 2020. Risk of mercury ingestion from canned fish in Poland. *Molecules.* 25(24):5884.  
<https://doi.org/10.3390/molecules25245884>
- Ruelas-Inzunza J, Páez-Osuna F, Ruiz-Fernández AC, Zamora-Arellano N. 2011a. Health risk associated to dietary intake of mercury in selected coastal areas of Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol.* 86:180-188.  
<https://doi.org/10.1007/s00128-011-0189-z>
- Ruelas-Inzunza J, Patiño-Mejía C, Soto-Jiménez M, Barba-Quintero G, Spanopoulos-Hernández M. 2011b. Total mercury in canned yellowfin tuna *Thunnus albacares* marketed in northwest Mexico. *Food Chem Toxicol.* 49(12):3070-3073.  
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.07.030>
- Tahán JE, Sánchez JM, Granadillo VA, Cubillán HS, Romero RA. 1995. Concentration of total Al, Cr, Cu, Fe, Hg, Na, Pb, and Zn in commercial canned seafood determined by atomic spectrometric means after mineralization by microwave heating. *J Agric Food Chem.* 43(4): 910-915.  
<https://doi.org/10.1021/jf00052a012>
- Taylor VF, Jackson BP, Chen CY. 2008. Mercury speciation and total trace element determination of low-biomass biological samples. *Anal Bioanal Chem.* 392:1283-1290.  
<https://doi.org/10.1007/s00216-008-2403-3>
- Torres-Escribano S, Vélez D, Montoro R. 2010. Mercury and methylmercury bioaccessibility in swordfish. *Food Addit Contam Part A.* 27(3):327-337.  
<https://doi.org/10.1080/19440040903365272>
- [UNEP] United Nations Environment Programme. 2019. *Global Mercury Assessment 2018*. Geneva (Switzerland): UNEP. 62 p.
- Yi W, Jianying H, Lihui A, Wei A, Min Y, Mitsuaki I, Tatsuya H, Shu T. 2005. Determination of trophic relationships within a Bohai Bay food web using stable  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  analysis. *Chin Sci Bull.* 50(10):1021-1025.  
<https://doi.org/10.1360/04wd0283>