

## Riesgo ecotoxicológico por exposición a Cd en Tampamachoco, Veracruz. Ecotoxicological risk assessment for cadmium exposure in Tampamachoco, Veracruz.

S.F. Hidalgo-Torres <sup>a</sup>, M.A. Sánchez-Olivares <sup>a\*</sup>, B.E. Raya-Cruz <sup>a</sup>, J.C. Gaytán-Oyarzun <sup>b</sup>

Laboratorio de Química, Facultad de Ciencias biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana. Carretera Tuxpan-Tampico Km 7.5, S/N, Universitaria. C.P. 92870. Tuxpan de Rodríguez Cano, Veracruz, México <sup>a</sup>.

Área Académica de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo, Km 4.5 Pachuca. C.P. 42076. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México <sup>b</sup>.

### Resumen

El presente estudio estimó el riesgo a la salud en sectores expuestos por la presencia de Cd en la laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. Se determinó la concentración de Cd y se calculó el Cociente de Peligro Ambiental (CP), Ingesta Crónica Diaria (CDI), Riesgo No Cancerígeno (HQ), Riesgo de Desarrollo de Cáncer Individual (LCRi) e Incidencia de Cáncer (IC) para: niños, adolescentes, adultos y adultos mayores. El Cd analizado no excedió el límite máximo permisible (LMP) de acuerdo con la normatividad mexicana. Sin embargo, los valores de HQ fueron superiores a 1, esto indica que 154,570 individuos son susceptibles a desarrollar afectaciones a la salud no relacionadas con el cáncer. Las estimaciones sobre LCRi e IC, revelaron incidencia de cáncer asociada a la exposición ambiental en poblaciones expuestas aledañas a la laguna, determinándose así los valores de IC: 152 casos en adultos, 29 casos en adultos mayores, 36 casos en niños y finalmente, 14 casos en adolescentes respectivamente.

**Palabras Clave:** cadmio, exposición, estimación de riesgo, peligro a la salud.

### Abstract

This study estimated the health risk assessment in sectors exposed to Cd in the Tampamachoco lagoon, Veracruz, Mexico. The concentration of Cd was determined, and the Risk Quotient (RQ), Chronic Daily Intake (CDI), Non-carcinogenic Risk (HQ), Lifetime Cancer Risk (LCRi), and Cancer Incidence (CI) were determined for children, adolescents, adults, and older adults. The Cd analysed did not exceed the maximum permissible limit according to Mexican regulations. However, the HQ values were greater than 1, indicating that 154,570 individuals are susceptible to developing non-cancer-related health effects. Estimates of LCRi and IC revealed cancer incidence associated with environmental exposure in populations exposed near the lagoon, determining the following IC values: 152 cases in adults, 29 cases in older adults, 36 cases in children, and finally, 14 cases in adolescents, respectively.

**Keywords:** cadmium, exposure, health risk, human health hazard.

### 1. Introducción

Las prácticas agrícolas y descargas de aguas residuales, han incrementado la contaminación de los cuerpos de agua, lo que representa un riesgo medioambiental elevado y por ende un deterioro para la salud humana, (Ghadouani y Coggins, 2001; Belew *et al.*, 2024; Sabado-Fraile *et al.*, 2025). En México, se han alcanzado elevadas cifras de contaminación de los cuerpos de agua durante el transcurso del siglo XXI, (Jiménez-Cisneros, 2006; Apaza, 2016). Es por ello, que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de

América (EPA, por sus siglas en inglés), ha establecido una lista de compuestos contaminantes que se consideran de interés relevante por la gran capacidad que tienen para contaminar matrices ambientales como el agua (Moreno, 2003; Covarrubias y Peña, 2017). Entre estos contaminantes se encuentran los metales pesados (Zubairu *et al.*, 2014) y de estos, elementos como el cadmio (Cd) figuran entre los más peligrosos (Tiwari *et al.*, 2023), por su potencial toxicológico (Cantoral *et al.*, 2024) (Brunetti *et al.*, 2009; Wayland y Scheuhammer, 2011; Li *et al.*, 2025). El Cd es un metal pesado con alta abundancia en el planeta, cuya toxicidad es

\*Autor para la correspondencia: [marcosanchez02@uv.mx](mailto:marcosanchez02@uv.mx)

Correo electrónico: [zs24018920@estudiantes.uv.mx](mailto:zs24018920@estudiantes.uv.mx) (Sebastián Felipe Hidalgo-Torres), [marcosanchez02@uv.mx](mailto:marcosanchez02@uv.mx) (Marco Antonio Sánchez-Olivares), [braya@uv.mx](mailto:braya@uv.mx) (Blanca Esther Raya-Cruz), [jcgaytan@uaeh.edu.mx](mailto:jcgaytan@uaeh.edu.mx) (Juan Carlos Gaytán-Oyarzun)

debido a la propiedad que tiene su estructura química de alterar procesos biológicos fundamentales. No obstante, su peligrosidad se acentúa en su fracción intercambiable ( $\text{Cd}^{2+}$ ), la cual presenta una mayor cinética ambiental en contraste con el resto de sus formas químicas en el entorno (Wang *et al.*, 2016). La introducción del Cd a los ecosistemas marinos es mediante efluentes industriales y escorrentía agrícola (Korouna-Renier *et al.*, 2007), inclusive en concentraciones traza, este metal produce daños irreversibles en el medio acuático y en la salud humana (Castañé *et al.*, 2004; Karbowska, 2016; Chowdhury *et al.*, 2024; Kotnala *et al.*, 2025) derivado de su potencial de bioacumulación y biomagnificación a través de las redes tróficas (Genchi *et al.*, 2020; Layglon *et al.*, 2022). Por otra parte, su persistencia biológica facilita su acumulación progresiva en el organismo (Olmos-Palma y Octavio-Aguilar, 2022; Sahu *et al.*, 2025) cuya ingesta (más del 70%) (Sabando-Fraile *et al.*, 2025) se expresa en patologías críticas de los sistemas renal, pulmonar y óseo (Gintamo *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2022; Abd-Elbani *et al.*, 2023). De la misma manera, su neurotoxicidad se ha vinculado con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer cuando logra traspasar la barrera hematoencefálica (Alharbi *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025). Bajo esta perspectiva, tanto el Departamento de Salud de los EE. UU. (HHS) como la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasifican al Cd y sus compuestos como agentes carcinogénicos, teratogénicos y mutagénicos (Sayo *et al.*, 2020; Sánchez-Olivares, 2021; Kotnala *et al.*, 2025).

Existen una gran cantidad de estudios relacionados a la evaluación de riesgos a la salud por la exposición a compuestos tóxicos en agua, donde se utilizan una serie de indicadores regidos por ecuaciones matemáticas sustentados por la USEPA (Shakoor *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2020; Tandel *et al.*, 2024; Shuvo *et al.*, 2025; USEPA, 2025; Xie *et al.*, 2025). Para la evaluación del potencial de riesgo en metales pesados como el Cd, se requiere de técnicas que evalúen el potencial de riesgo asociado a la manifestación de efectos negativos en una población. Con esto último se aclara el hecho de que la evaluación de riesgo a la salud por agentes químicos peligrosos (AQP) como en el caso del Cd prioriza analizar la procedencia y probabilidad de qué sectores de la población están potencialmente expuestos en ambientes altamente contaminados (Garshin *et al.*, 2023). Es por esto, que se necesita de una serie de datos cuyas características describan la identidad e inherencia de dichos AQP, así como las propiedades toxicológicas que arrojen información sobre exposición y posibles daños potenciales (IPCS, 2013; Pérez-Rodrigo *et al.*, 2015).

Para la evaluación de riesgos a la salud se necesitan protocolos que ayuden a identificar los tipos de sustancias químicas que se van a analizar, y así identificar sectores de la población que estén expuestos a éstas a través de características individuo-específicas. Realizar este tipo de estudios cuenta con una gran relevancia, ya que de esta manera se puede evaluar en su totalidad el riesgo asociado a la exposición de compuestos químicos en el ambiente, facilitando la estimación probabilística de que un efecto adverso ocurra en un determinado sitio de estudio (Garshin *et al.*, 2023). Por lo que, el objetivo de esta investigación es estimar el riesgo a la salud en sectores expuestos por

exposición a Cd en aguas de la laguna de Tampamachoco, Veracruz, México.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Sitio de estudio

La laguna de Tampamachoco se localiza en la parte norte del estado de Veracruz, ubicada entre las coordenadas  $20^{\circ}58'93''$  y  $21^{\circ}02'28''$  de latitud norte y  $97^{\circ}19'99''$  y  $97^{\circ}23'10''$  de longitud oeste (Figura 1). Es un cuerpo de agua somero con canal artificial de navegación que atraviesa en dirección norte-sur, con una profundidad máxima de 4 m. Asimismo, su longitud y anchura máxima son de aproximadamente 11 y 1.3 km respectivamente. Al norte, se comunica con la laguna de Tamiagua por medio de un canal; al este, con el mar a través de la boca de Galindo (de origen artificial); y finalmente, al sur, con el río Tuxpan por medio de un estero. Lo cual indica que la laguna de Tampamachoco, la laguna de Tamiagua y el río Tuxpan son el límite meridional de dicho sistema (Velázquez-Simental, 1996; Ocaña y Sánchez, 2003; López-Ortega *et al.*, 2012; Botello y De la Lanza, 2016; Xochihua-Juan *et al.*, 2023).

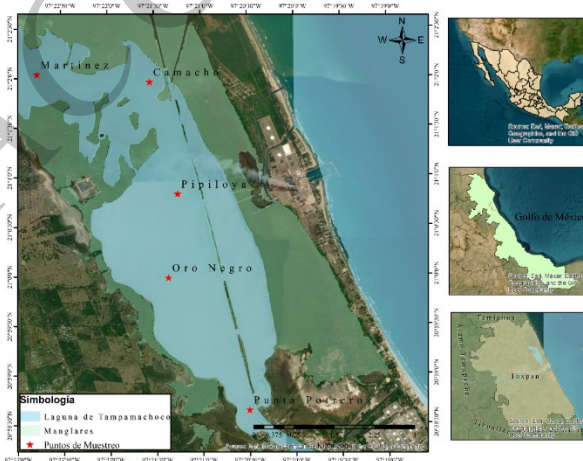


Figura 1: Sitio de estudio.

### 2.2. Preparación y análisis de las muestras

Las muestras de agua se recolectaron de acuerdo con los lineamientos presentes en la NMX-AA-051-SCFI-2016, que establece los procedimientos de medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Se realizó la recolección de las muestras de agua en recipientes de polipropileno prelavados con una solución de  $\text{HNO}_3$  al 40%. Posteriormente, se tomaron lecturas de parámetros fisicoquímicos del agua (temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales y salinidad) en cada uno de los sitios por triplicado. El análisis de las muestras recolectadas se llevó a cabo en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en el laboratorio de metales pesados del departamento de espectrofotometría de absorción atómica. En el laboratorio, se tomaron alícuotas de 45 mL de muestra de agua de cada uno de los sitios muestreados, adicionando 5 mL de  $\text{HNO}_3$  bidestilado en un horno de microondas marca Questron, modelo Q. Wave 1000 de acuerdo con la norma EPA-3015A

de digestión ácida asistida por microondas en muestras acuosas.

Para la determinación de cadmio (Cd) en el laboratorio las muestras digeridas se aforaron a un volumen de 50 mL y el análisis elemental se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian, modelo Spectr AA 880 equipado con lámpara de cátodo hueco a una intensidad de corriente de 10 mA y longitud de onda de 193.7 nm, con flama de aire-acetileno optimizada y utilizando N<sub>2</sub> de alta pureza como gas de arranque de acuerdo al estándar mexicano NMX-AA-051-SCFI-2016. Las curvas de calibración de este elemento se realizaron a partir de soluciones estándar de multielementos y/o unielementos de alta pureza.

### 3. Estimación poblacional

Se utilizaron las cifras del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI (INEGI, 2020), con estos datos, se calculó la población total de la ciudad de Tuxpan de Rodríguez Cano, en 154,570 habitantes, de los cuales se identificaron cuatro sectores expuestos: niños (0-12 años), adolescentes (13-19 años), adultos (20-64) y adultos mayores (≥65 años).

#### 3.1. Estimación de cociente de peligro ambiental, ingesta crónica diaria, cociente de peligro a la salud, riesgo de desarrollo de cáncer individual durante el tiempo de vida e incidencia de cáncer.

El cociente de peligro ambiental se utilizó para comparar la concentración de exposición contra la concentración de referencia establecida como límite de referencia ambiental (MINAM, 2015), De acuerdo con González-Mille *et al.* (2010), si el coeficiente de peligro es <1 existe un riesgo considerado “aceptable”, por otro lado, si el cociente de peligro es >1 existe un riesgo potencial considerado “alto” y se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$CP = CE / C_{Ref} \dots (1)$$

Donde:

CP: Es el Cociente de peligro ambiental.

CE: Es la Concentración de Exposición del metal pesado en el agua en mg/L

C<sub>Ref</sub>: Es el valor de concentración de referencia para el metal pesado en el agua en mg/L (LMP, NOM-001-SEMARNAT-2021).

La ingesta crónica diaria (por sus siglas en inglés CDI) (USEPA, 2001) se calculó a través de la concentración del contaminante en el agua, y las tasas de ingesta diaria de agua por cada grupo poblacional la ingesta diaria de agua consumida y el peso corporal por cada grupo poblacional (USEPA, 2011). Todo esto establecido en la base de datos de IRIS o de la EPA (2005), así como de la ATSDR (2004) para cada compuesto. Para calcular la ingesta crónica diaria se utilizó la siguiente ecuación (Onyinyechi y Emeka, 2018; Bitew *et al.*, 2021; Ugwu *et al.*, 2022; Obinduka *et al.*, 2025):

$$CDI = (C)(TI)(DE) / (PC)(TP) \dots (2)$$

Donde:

CDI: Es la concentración de ingesta diaria en (mg/kg/día).

C: Es la concentración del contaminante en el agua en (mg/L).

TI: Es la tasa de ingesta diaria de consumo de agua en (L/día).

DE: Es la duración de la exposición en años.

PC: Es el peso corporal del individuo en (kg).

TP: Es el tiempo promedio de exposición en (años).

La TI es la tasa de ingesta crónica diaria de agua por cada grupo poblacional y la dosis de exposición. El consumo por cada sector vulnerable se asumió de la siguiente manera: 1) Niños (0-12 años) 1 litro/niño con un peso corporal promedio (PC) de 14 kg, 2) Adolescentes (13-18 años) 1.5 litros/adolescente y 3) Adultos (19-64 años) y adultos mayores (>65 años) 2 litros litros/adulto-Adulto mayor con un peso corporal promedio (PC) de 65 kg (INSP, 2021; USEPA, 2001).

El cociente de peligro a la salud (HQ) se utilizó para la estimación de riesgo no cancerígeno, este indicador se obtuvo a partir de los datos de la CDI y la dosis de referencia para cada metal pesado.

Los valores de HQ ≥ 1 indican posibles efectos adversos para la salud que no estén relacionados con el cáncer debido a la exposición crónica del compuesto contaminante, mientras que los valores de HQ < 1 indican un riesgo a la salud “aceptable” (EPA, 2005; USEPA, 2015; IRIS, 2019). Para calcular el cociente de peligro a la salud se utilizó la siguiente ecuación (Onyinyechi y Emeka, 2018; Ugwu *et al.*, 2022; Kapoor *et al.*, 2024; Obinduka *et al.*, 2025):

$$HQ = CDI / RfD \dots (3)$$

Donde:

CDI: Es la concentración de ingesta diaria en (mg/kg/día).

RfD: Es la es la Dosis de referencia o Dosis de Riesgo Mínimo (Banco de datos de IRIS o ASTDR) dosis de referencia para vía oral del compuesto contaminante (USEPA, 2010) en (mg/kg/día).

El riesgo de desarrollo de cáncer individual durante el tiempo de vida (LCRi) se calculó a partir de los datos de la CDI y el factor de pendiente de cáncer (CSF) establecido por el banco de datos IRIS, de la EPA (2005) o de la ATSDR (2004) por contaminante. Para calcular el riesgo de desarrollar cáncer individual durante el tiempo de vida se utilizó la siguiente ecuación (Salihu *et al.*, 2019; Ugwu *et al.*, 2022; Kapoor *et al.*, 2024; Kapoor *et al.*, 2024; Obinduka *et al.*, 2025):

$$LCRi = (CDI) (CSF) \dots (4)$$

Donde:

LCRi: Es el riesgo de desarrollo de cáncer individualmente durante el tiempo de vida.

CDI: Es la ingesta crónica diaria en (mg/kg/día).

CSF: Es el factor pendiente establecido en la base de datos de IRIS o de la EPA (2005) o de la ATSDR (2004) por contaminante en (mg/kg/día).

El rango que se toma como límite del riesgo de desarrollar cáncer individual durante el tiempo de vida (LCRi) para un individuo es de 1E-05 a 1E-06. Las poblaciones que se consideran altamente expuestas a compuestos contaminantes no pueden exceder los niveles de riesgo comprendidos de 1E-05. No obstante, si el valor de riesgo de cáncer excede el valor de 1E-05, entonces se deben tomar medidas preventivas para la protección de la población (USEPA, 2001). Además, cualquier valor que exceda un (HQ≥1), se tomará en consideración para evitar el riesgo no cancerígeno en seres humanos.

La incidencia de cáncer (IC) se obtuvo mediante el producto del riesgo de desarrollar cáncer individual durante el tiempo de vida por el número total de individuos por grupo poblacional. El valor obtenido se interpretó como la representación hipotética de números de casos probables de cáncer que podrían aparecer en una población (CEPIS/OPS, 2005). Para calcular la incidencia de cáncer se utilizó la siguiente ecuación:

$$IC = (LCRi) (PT) \dots (5)$$

Donde:

IC: Es la incidencia de cáncer.

LCRi: Es el riesgo de desarrollar cáncer individualmente en el tiempo de vida (mg/kg/día).

PT: Es la población total en número de habitantes por grupo poblacional.

#### 4. Resultados

Los resultados indicaron la presencia de Cd en la laguna de Tampamachoco con una concentración (C) de 0.0571±0.012 mg/L, contrastado con la concentración de referencia (CRef) de la NOM-001-SEMARNAT-2021 de 0.1 mg/L, lo que señala un valor en agua por debajo del LMP. A su vez, el cálculo del CP (ecuación 1) fue de 0.5716, lo que indica una peligrosidad baja de acuerdo con González-Mille *et al.* (2010). Para el valor de la dosis de referencia por suministro oral (RfD), se utilizó el valor establecido por el banco de datos de la USEPA, 2011. (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de concentración de exposición, concentración de referencia, cálculo de peligro ambiental y dosis de referencia (USEPA, 2001).

Metal	CE (mg/L)	CRef (mg/L)	CP	RfD (mg/kg/día)
Cd	0.0571±0.01	0.1	0.5716	5E-04

(CE) Concentración de exposición; (CRef) Concentración de referencia; (CP) Cociente de peligro; (RfD) Dosis de referencia.

Los cuatro sectores expuestos que se identificaron en la laguna de Tampamachoco están conformados por niños

(35,140), adolescentes (12,156), adultos (91,061) y adultos mayores (16,213) los cuales representan el 100% del total de la población conforme al Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). Respecto a los valores de HQ para el Cd por cada sector, se obtuvieron valores superiores a 1 (HQ≥1) (Tabla 2). Esto último señala que dichos sectores expuestos presentan una susceptibilidad, así como la probabilidad de desarrollar efectos adversos a la salud no relacionados con el cáncer (WHO, 2011).

Para el riesgo de desarrollar cáncer durante el tiempo de vida (LCRi), los cuatro sectores presentaron un alto riesgo de desarrollar cáncer individual (Tabla 2). De acuerdo con el banco de datos de la USEPA (2001), el rango límite del riesgo de desarrollar cáncer de manera individual (LCRi) es de 1E-04 a 1E-6. Esto expone que la mayoría de las poblaciones altamente expuestas no deben exceder de 1E-05 niveles de riesgo; sin embargo, si los valores de riesgo de cáncer para dicho indicador son mayores a 1E-05, entonces quiere decir que se deben tomar medidas estratégicas para la protección de la población circundante.

Tabla 2. Valores calculados en los sectores expuestos.

Sector Expuesto	Metal pesado: Cd					
	CDI	RfD	HQ	CP	LCRi	IC
Niños	0.0027	5E-04	5.45	0.5716	0.0010	36.43
Adolescentes	0.0031	5E-04	6.37	0.5716	0.0012	14.71
Adultos	0.0044	5E-04	8.82	0.5716	0.0016	152.74
Adultos Mayores	0.0048	5E-04	9.60	0.5716	0.0018	29.57
					ΣIC =	233.45

CDI: Ingesta Crónica Diaria; RfD: Dosis de Referencia; HQ: Cociente de Peligro a la Salud; CP: Cociente de peligro ambiental; LCRi: Riesgo de Desarrollo de Cáncer Individual; IC: Incidencia de Cáncer

El cálculo de la incidencia de cáncer (IC) indica el número de casos probables que podrían presentarse por cada sector; estos sectores representan un total del 100% poblacional con una susceptibilidad de desarrollar afectaciones a la salud no relacionadas con el cáncer (Tabla 2).

#### 5. Discusiones

Los metales pesados como el Cd cuentan con una elevada persistencia ambiental, se bioacumulan fácilmente y presentan alta toxicidad, generando un grave impacto en el ecosistema a concentraciones mínimas (Cd, 0.1 mg/l) (Londoño-Franco *et al.*, 2016; Briffa *et al.*, 2020; Pabón *et al.*, 2020; NOM-001-SEMARNAT-2021; Olmos-Palma y Octavio-Aguilar, 2022). El deterioro en la calidad del agua por la presencia de Cd ha alcanzado elevadas dimensiones, es por ello que los estudios de química analítica realizados en el sitio de estudio sustentan la evidencia de la identificación de este metal pesado de interés toxicológico en muestras de agua en los cinco diferentes puntos analizados (Figura 1), con concentraciones muy cercanas a los límites de referencia en la normatividad

oficial mexicana (Castañé *et al.*, 2004; Apaza, 2016; Karbowska, 2016; NOM-001-SEMARNAT-2021; Chowdhury *et al.*, 2024; Kotnala *et al.*, 2025).

Los sectores expuestos a la presencia por Cd en la laguna de Tampamachoco son los niños (0-12 años), adolescentes (13-18 años), adultos (19-64 años) y adultos mayores (>65 años). En estos sectores que fueron evaluados, los valores de riesgo no cancerígeno fueron superiores a 1 ( $HQ \geq 1$ ), lo que confirma que la concentración reportada de Cd en la laguna podría ocasionar afectaciones adversas a la salud en los sectores anteriormente mencionados. Estos cuatro sectores representan el 100% de la población municipal de acuerdo con el censo poblacional (INEGI, 2020). Dicha información sobre el índice de peligro ambiental está respaldada por los estudios realizados de diversos autores (Søeborg *et al.*, 2011; Goumenou y Tsatsakis, 2019; Ogunlaja *et al.*, 2019; Samaila *et al.*, 2021; Muhammad *et al.*, 2022), los cuales señalan que si el valor de riesgo no cancerígeno de metales pesados es superior a 1 ( $HQ \geq 1$ ), habrá efectos nocivos en la salud humana.

El LCRi para los cuatro sectores evaluados señala un riesgo potencial de desarrollar algún tipo de cáncer asociado a la exposición a metales pesados y metaloides (Tabla 2). De acuerdo con la literatura, los indicadores de desarrollo de cáncer individual y poblacional (LCRi e IC) son ampliamente utilizados como referencia para estimar la probabilidad de desarrollo de algún tipo de cáncer (MINAM, 2015). Esto último refuerza la determinación de que el Cd analizado en el agua de la laguna no se encontró por encima del LMP ( $CP < 1$  y  $0.1 \text{ mg/L}$ ), pero si se encontró en frecuencias superiores a  $1E-03$ , lo cual sí representa un riesgo “no aceptable”. Asimismo, los lineamientos de la USEPA (2001) indican que para un individuo el rango aceptable de riesgo carcinogénico oscila entre  $1E-06$  y  $1E-04$ , esto quiere decir que, en poblaciones con índices de exposición elevados, lo recomendable es no superar el nivel establecido; sin embargo, si el riesgo es excedido al umbral permitido como en el caso de umbrales obtenidos en este estudio ( $1E-02$ ), es necesario la implementación de medidas de protección para salvaguardar la salud pública.

Los resultados del cálculo de incidencia de cáncer (IC) en los sectores expuestos cercanos a la laguna, revelan un impacto significativo en la salud pública. En la población total, se estimaron 233 casos probables de IC (Tabla 2). Estos datos sugieren que los sectores estudiados podrían desarrollar algún tipo de cáncer derivado de la exposición. El Cd presenta valores elevados en cuanto al IC en niños, lo que corrobora la capacidad de daño de este tipo de AQP de acuerdo con la metodología establecida por la USEPA (2001) y ATSDR (2019). Es por ello, que el uso de estos indicadores de riesgo en el presente estudio evidencia una alta probabilidad de exposición a Cd en estos sectores.

## 6. Conclusiones

Los análisis identificaron la presencia de Cd en el agua de la laguna de Tampamachoco, Ver. La concentración no superó los LMP ( $0.1 \text{ mg/L}$ ) en los puntos muestreados bajo el régimen de la normatividad mexicana, aun así, se debe tener en cuenta que existe un riesgo potencial para la salud de la población expuesta a este AQP. El cálculo del CP indicó

ausencia de efectos adversos previsibles, esto indica que no existe un riesgo apreciable para el ser humano o al medio bajo las condiciones evaluadas para este metal. Sin embargo, respecto al HQ, los cuatro sectores presentaron valores por encima del umbral de seguridad establecido por organismos internacionales (USEPA). Finalmente, para el LCRi se identificó una disparidad crítica, ya que para un adulto mayor el agua no representa un peligro de desarrollo de cáncer, para un niño el riesgo se considera 100,000 veces mayor (contrastando  $1E-03$  contra  $1E-08$ ), por lo consiguiente en el caso de la IC se pudo constatar que el valor para los niños superó por mucho el umbral de “riesgo inaceptable”. Esto señala que la IC esperada en niños es 13 veces mayor al límite máximo tolerado respecto a los demás sectores, lo cual indica que se tiene evidencia de que, aunque éstos últimos no se consideran estimaciones críticas para la población expuesta, los niños tienen la probabilidad de desarrollar enfermedades que podrían estar relacionadas con el cáncer. Estas cifras reportadas señalan de manera clara en términos de salud pública una prioridad de intervención y la implementación de programas de vigilancia epidemiológica para estos sectores con una restricción de acceso a zonas contaminadas.

## 7. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Veracruzana por prestar las instalaciones del laboratorio de Química, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por el apoyo brindado para los análisis espectrofotométricos de las muestras de agua, y asimismo a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de posgrado otorgada para la manutención de este proyecto de investigación.

## 8. Referencias

- Abd-Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalfifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhoriény, N. A., Abd-Elaty, A. E., Elgendy, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., y Mahmoud, Y. A. (2023). *Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. Toxics*, 11(7), pp. 1-29. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2004). Public Health Assessment. Guidance Manual (Update). Atlanta, Georgia: U. S. Department of Health and Human Services.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2004). Public Health Assessment. Guidance Manual (Update). Atlanta, Georgia: U. S. Department of Health and Human Services.
- Alharbi, T. Nour, H. E., Al-Kahtany, K., Zumlot, T. y El-Sorogy, A. S. (2024). Health Risk Assessment and Contamination of Lead and Cadmium Levels in Sediments of the Northwestern Arabian Gulf Coast. *Heliyon*, 10(16), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36447>.

- Anteneh-Belew, A., Tesfaye-Besha, A. y Arega-Belete, A. (2024). Determination of heavy metals and health risk assessment in drinking water in Jigjiga City, Ethiopia. *Discover Environment*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00071-z>
- Apaza, P. H. R. (2016). Determinación del contenido de mercurio en agua y sedimentos del Río Suches-Zona Bajo Paria Cojata-Puno [Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Geológica e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional del Altiplano] Puno, Perú.
- ATSDR. (2019). Agency for Toxic Substances and Disease Registry Toxicology Course. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [Online]. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology\\_curriculum/es\\_index.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/es_index.html) 04/16/2021.
- Bamuwayme, M., Ogwok, P., Tumuhairwe, V., Eragu, R., Nakisozi, H. y Ogwang, P. E. (2017). Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Kampala (Uganda) Drinking Water. *Journal of Food Research*, 6(4), 6-16. <https://doi.org/10.5539/jfr.v6n4p6>.
- Botello, V., y De la Lanza Espino, G. J. (2016). Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México características y diagnóstico ambiental. 2009-2012.
- Brunetti, P., Soler-Rovira, G., Farrag, K., y Seneci, N. (2009). Tolerance and accumulation of heavy metals by wild plant species grown in contaminated soils in Apulia region, Southern Italy. *Plant Soil*, 318(1), 285-298. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9838-3>.
- Cantoral, A.; Collado-López, S.; Betanzos-Robledo, L.; Lamadrid-Figueroa, H.; García-Martínez, B.A.; Ríos, C.; Díaz-Ruiz, A.; Mariscal-Moreno, R.M.; Téllez-Rojo, M.M. (2024). Dietary Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Commonly Consumed Foodstuffs in Mexico. *Foods*, 13(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/foods13223649>.
- Castañé, P. M., Topalian, M. L., Cordero, R. R. y Salibian, A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología*, 20(1), 13-18. Recuperado de: <https://rev.aetox.es/wp/index.php/20-16/>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente/Organización Panamericana de la Salud (CEPIS/OPS) (2005). Curso de autoinstrucción. Obtenido de Evaluación de Riesgo asociado a Contaminantes de Aire. Editorial del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima-Perú.
- Chowdhury, A.I., Shill, L. C., Raihan, M. M., Rashid, R., Hoque-Bhuiyan, N., Reza, S. y Rahanur-Alam, M. (2024). Human health risk assessment of heavy metals in vegetables of Bangladesh. *Scientific Reports*, 14(15616), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65734-6>.
- Covarrubias, S. A., y Pena, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>.
- Das-Shuvo, S., Mallick, T., Khanum, L., Chakraborty, T. K., Hossain, M. D., Parvin, R., Roy, D. y Elahi, M. T. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals and trace elements of poultry and domestic chicken tissues marketed in Bangladesh. *Applied Food Research*, 5(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101025>.
- Dessie, B. K., Gari, S. R., Mihret, A., Desta, A. F. y Mehari, B. (2021). Determination and health risk assessment of trace elements in the tap water of two Sub-Cities of Addis Ababa, Ethiopia. *Heliyon*, 7(5), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06988>.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2005). Integrated Risk Information System (IRIS). Washington, D. C.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2005). Integrated Risk Information System (IRIS). Washington, D. C.
- Environmental Protection Agency (EPA-3015A). 2007. Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. Environmental Protection Agency. 25 pp.
- Estándar Mexicano. NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua. Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- Garshin, A., Altynova, N., Djangalina, E., Khamdiyeva, O., Baratzhanova, G., Tolebaeva, A., Zhaniyazov, Z., Khussainova, E., Cakir-Kiefer, C., Jurjanz, S., Delannoy, M., y Djansugurova, L. (2023). Individual Risk Assessment for Population Living on the Territories Long-Term Polluted by Organochlorine Pesticides. *Toxics*, 11(6), 1-24. <https://doi.org/10.3390/toxics11060482>.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., y Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Ghadouani, A. y Coggings, L. X. (2011). Science, technology and policy for water pollution control at the watershed. Scale: Current issues and future challenges. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(1), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.05.011>.
- Gintamo, B., Khan, M.A., Gulitat, H., Shukla, R.K. y Mekonnen, Z. (2022). Determination of the Physicochemical Quality of Groundwater and its Potential Health Risk for Drinking in Oromia, Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 16(1), 1-11. <https://doi.org/10.1177/11786302221096051>.
- González-Mille, D.J., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Espinoza-Reyes, G. Costilla-Salazar, R., Díaz-Barriga, F. Ize-Lema, I. y Mejía-Saavedra, J. (2010). Exposure to persistent

- organic pollutants (POPs) and DNA damage as an indicator of environmental stress in fish or different feeding habits of Coatzacoalcos, Veracruz, México. *Ecotoxicology*, 19(1), 1238-1248. <https://doi.org/10.1007/s10646-010-0508-x>
- Goumenou, M. y Tsatsakis, A. (2019). Proposing new approaches for the risk characterisation of single chemicals and chemical mixtures: The source related Hazard Quotient (HQS) and Hazard Index (HIS) and the adversity specific Hazard Index (HIA). *Toxicology Reports*, 6(1), 632-636. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.06.010>.
- INSP, Instituto Nacional de Salud Pública. (2021). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020 sobre Covid-19 Resultados Nacionales. Instituto Nacional de Salud Pública.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). (2013). Inorganic Chromium(VI) Compounds. Concise International Chemical Assessment Document 78. International Programme on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva: IPCS. Disponible en: [www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad\\_78.pdf](http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad_78.pdf)
- Karbowska, B. (2016). Presence of thallium in the environment: sources of contaminations, distribution and monitoring methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5647-y>.
- Karouna-Renier, N. K., Snyder, R. A., Allison, J. G., Wagner, M. G., y Ranga Rao, K. (2007). Accumulation of organic and inorganic contaminants in shellfish collected in estuarine waters near Pensacola, Florida: contamination profiles and risks to human consumers. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 145(2), 474-488. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.04.035>
- Kotnala, S., Tiwari, S., Nayak, A., Bhushan, B., Chandra, S., Rocha-Medeiros, C. y Melo-Coutinho, H. D. (2025). Impact of heavy metal toxicity on the human health and environment. *Science of The Total Environment*, 987(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179785>.
- Layglon, N., Lenoble, V., Longo, L., D'Onofrio, S., Mounier, S., Mullot, J. U., Sartori, D., Omanović, D., Garnier, C., & Misson, B. (2022). Cd transfers during marine sediment resuspension over short and long-term period: Associated risk for coastal water quality. *Marine Pollution Bulletin*, 180, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113771>
- Li, Y., Zhang, J., Song, N., Wang, Y., Yu, J., He, L., Yang, R., Yang, L. y He D. (2025). Assessment of health risk and identification of pollution sources of heavy metals in water in Chongqing's wastewater treatment plants based on ICP-MS. *Environmental Pollution*, 373(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126193>.
- López-Ortega, M., Vázquez-Castán, L., Sánchez-Olivares, M. A., López-Jiménez, A., y López-Castro, R. (2014). Presencia de coliformes fecales y totales en el *Isognomon alatus* en la laguna de Tampamachoco, Veracruz. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(3), 537-543. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v2i1.319>.
- Ma, Y., Su, Q., Yue, C., Zou, H., Zhu, J., Zhao, H., Song, R., & Liu, Z. (2022). The Effect of Oxidative Stress-Induced Autophagy by Cadmium Exposure in Kidney, Liver, and Bone Damage, and Neurotoxicity. *International journal of molecular sciences*, 23(21), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijms232113491>.
- MINAM (2015). Guide for the elaboration of Environmental and Health Risk Assessment (ERSA) studies in contaminated sites. N° 002-2013-MINAM. Ministerio Del Ambiente. Manual. Lima, Peru, 144 pp.
- Moreno, M. (2003). Toxicología ambiental. Primera Edición. España: Mc Graw-Hill. Mortelmans, K.
- Muhammad, S., Ahmed, T., Amin, S., Tokali, C., Ustaoglu, F., Ahmad, A., Ali, W. y Farooq, U. (2025). Spatial distribution of hazard index via heavy metals consumption in water from the himalayan lacustrine ecosystems. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 138(1), 103858. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103858>.
- Obinduka, F., Ndubuisi, E.C., Uchekukwu, T.O., Ononogbo, C., Nwawuike, N., Madu, F. U. y Iheaturu, N. C. (2025). Investigation of carcinogenic and non-carcinogenic human health risk of heavy metals in spent synthetic-based drilling mud. *Discover Environment*, 3(25), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00209-7>.
- Ocaña, L. A. y R. M. Sánchez. (2003). Diversity of Ichthyoplankton in Tampamachoco lagoon, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Biología, Serie Zoología*, 74(2), 179-193. Disponible en: <https://anales.ib.unam.mx/index.php/SerZool/article/view/2732/2749>.
- Olmos-Palma, D.A. y Octavio-Aguilar, P. (2022). Efectos sobre la salud por agua contaminada con metales pesados. *Herreriana*, 4(1), 43-47. Disponible en: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/issue/archive>.
- Ogunlaja, A., Ogunlaja, O. O., Okewole, D. M., y Morenikeji, O. A. (2019). Risk assessment and source identification of heavy metal contamination by multivariate and hazard index analyses of a pipeline vandalised area in Lagos State, Nigeria. *The Science of the total environment*, 651(2), 2943-2952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.386>.
- Onyele, O. G. y Anyanwu, E. D. (2018). Human Health Risk Assessment of Some Heavy Metals in a Rural Spring, Southeastern Nigeria. *African Journal of Environment and Natural Science Research*, 1(1), 15-23. Recuperado de: <https://abjournals.org/ajensr/wpcontent/uploads/sites/15/jo>

[urnal/published\\_paper/volume-1/issue-1/AJENSR\\_xUItsoHS.pdf](https://doi.org/10.14642/RENC.2015.21.sup1.5056)

- Pérez-Rodrigo, C., Morán-Fagúndez, L. J., Riobó-Servan, P. y Aracenta, J. (2015). Métodos de cribado y métodos de evaluación rápida. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 21(1), 88-95. <https://doi.org/10.14642/RENC.2015.21.sup1.5056>.
- Sabando-Fraile, C., Corral-Bobadilla, M., Lostado-Larza, R. y Somovilla-Gomez, F. (2025). Eco-efficient cadmium (II) removal from water using alcohol distillate waste: A study of life cycle assessment. *Environmental Technology & Innovation*, 37(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103916>.
- Sahu, P., Raj-Patel, A., Pandey, A., Hait, M. y Kumar-Patra, G. (2025). Assessment of heavy metal ion toxicity in wastewater: A comprehensive review. *Inorganic Chimica Acta*, 585(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2025.122751>.
- Samaila, B., Maidamma, B., Usman, B., Jega, A.I. y Alhaji, S. A. (2022). Assessment of hazard index and incremental life cancer risk associated with heavy metals in the soils. *Science Progress and Research*, 2(1), 496-516. <https://doi.org/10.52152/spr/2022.155>.
- Salihu, N., Ya'u, M. y Babandi, A. (2019). Heavy Metals Concentration and Human Health Risk Assessment in Groundwater and Table Water Sold in Tudun Murtala Area, Nassarawa Local Government Area, Kano State, Nigeria. *Journal Applied Sciences Environmental Management*, 23(8), 1445-1448. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.6>.
- Sánchez-Olivares, M.A. (2021). Evaluación toxicológica y gestión de riesgos del agua potable de Zimapán, Hidalgo [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].
- Sánchez-Olivares, M. A., Gaytán-Oyarzun, J. C., Prieto-García, F., y Cabrera-Cruz, R. B. E. (2021). Evaluación Rápida de Potencial de Riesgo Genotóxico (ERPRG) asociada a metales pesados en agua potable: Caso de estudio Zimapán, Hidalgo, México. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(17), 114-120. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7140>
- Sayo, S., Kiratu, J. M. y Nyamato, G.S. (2020). Heavy metal concentration in soil and vegetables irrigated with sewage effluent: A case study of Embu sewage treatment plant, Kenya. *Scientific African*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00337>.
- SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Shakoor, M.B., Nawaz, R., Hussain, F., Raza, M., Ali, S., Rizwan, M., Oh, S.E. y Ahmad, S. (2017). Human health implications, risk assessment and remediation of As-contaminated water: A critical review. *Science of Total Environment*, (1), 601-602(1). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.223>.
- Søeborg, T., Frederiksen, H., y Andersson, A. M. (2012). Cumulative risk assessment of phthalate exposure of Danish children and adolescents using the hazard index approach. *International Journal of Andrology*, 35(3), pp. 245-252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2605.2011.01240.x>.
- Tiwari, A.K., Pal, S.L., Srivastava, N., Shah, M., Ahmad, I., Alshahrani, M.Y. y Pal, D.B. (2023). Bioadsorbent and adsorbent-based heavy metal removal technologies from wastewater: new insight. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, (1), 13335-13356. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02343-1>.
- Ugwu-Chidiebere, E., Chukwudi, M. I., Monday, S. S. y Anakwuo-Ikechukwu, A. (2022). Human health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in three senatorial districts of Anambra State, Nigeria. *Toxicology Reports*, 9(1), 869-875. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.011>.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2010). IRIS toxicological review of hexavalent chromium (2010 External Review Draft). EPA/635/R-10/004A.2010. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA (2010). Integrated Risk Information System. United State Environmental Protection Agency. <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/compare.cfm>.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2011). Human Health Risk Assessment: Unpacking the "Black Box". US Environmental Protection Agency, Washington, DC. Recuperado de <https://semspub.epa.gov/work/HQ/174873.pdf>
- USEPA. (2001). EPA530-F-00-032. An overview of risk assessment and RCRA. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. USA, 5 pp. [online]. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/201504/documents/riskybiz.df>
- USEPA IRIS (US Environmental Protection Agency)'s Integrated Risk Information System (2011). Environmental Protection Agency Region I, Washington DC 20460. <http://www.epa.gov/iris/>. Accessed 21/04/2017
- Velázquez-Simentel, L.C. (1996). Zonificación Hidrobiológica de la Laguna Tampamachoco, Ver. [Tesis de Especialidad, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Wang Y., Wang, Y., Chen, L., Gao, Y., Zhang, Y., Wang, C., Zhou, Y., Hu, Y., Shi, R., & Tian, Y. (2016). Effects of prenatal exposure to cadmium on neurodevelopment of infants in Shandong, China. *Environmental Pollution*, 211, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.038>
- Wayland, M. y Scheyhammer, A. M. (2011). Cadmium in birds. In: Beyer, W. N. Meador, P. M. (eds.).

- Environmental Contaminants in biota. 2nd Edition. Nueva York. Taylor and Francis.
- World Health Organization (WHO). (2011). Guidelines for Drinking Water Quality: First Addendum to fourth Edition. Vol. 1 Recommendations. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
- Xie, H., Zhang, M., Shi, Y., Wu, Y., Li, M., Li, Q., Zhao, Y. y Hua, J. (2025). Heavy metal pollution in aquatic systems of the Hunhe River Basin, China: Source apportionment, ecological and health risk assessments. *Process Safety and Environmental Protection*, 201, (A), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107478>.
- Xochihua-Juan, J. L., Bautista-Juárez, A. E., García-Ticante, V. J., Martínez-Mar, H. J, Rodríguez-Morales, N. H. y Villegas-Pérez, A. J. (2023). Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICA) de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo*, 2(2), 47-52. [https://remcid.utgz.edu.mx/Archivos/SD2023/2\(2\)\\_revista\\_completa.pdf](https://remcid.utgz.edu.mx/Archivos/SD2023/2(2)_revista_completa.pdf)

ACEPTADO--ACCEPTED