

Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Agronómicas
Escuela de Posgrado y Educación Continua



“Determinación de la concentración de arsénico en cultivos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en el lago de Ilopango”

por:

Sol María Muñoz Aguillón

Requisito para optar al título de:
Maestra en Ciencias en Gestión Integral del Agua

San Salvador, abril de 2025

Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Agronómicas
Escuela de Posgrado y Educación Continua



“Determinación de la concentración de arsénico en cultivos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en el lago de Ilopango”

por:

Sol María Muñoz Aguillón

Requisito para optar al título de:
Maestra en Ciencias en Gestión Integral del Agua

San Salvador, abril de 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

Rector de la Universidad:

Ing. MSc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla

Secretario general de la Universidad:

Lic. Pedro Rosalío Escobar Castaneda

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

Decano de la Facultad:

Ing. MAECE Nelson Bernabé Granados Alvarado

Secretario de la Facultad:

Ing. MSc. Edgar Geovany Reyes Melara

Director de la Escuela de Posgrado y Educación Continua

Ing. MSc. Juan Francisco Alvarado Panameño

Asesora Principal:

Dra. Marcia Lizeth Barrera de Calderón

Resumen

El lago cratérico de Ilopango, tiene una calidad natural de agua que limita usos como el de abastecimiento humano y producción acuícola, debido a sus elevadas concentraciones de arsénico, boro y mercurio. Pese a ello, existe una intensa producción de tilapia cultivada en jaulas en este cuerpo de agua. En este estudio se evalúa las concentraciones de arsénico en agua y músculo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), mediante el análisis de 13 muestras de agua y músculo colectadas en la época seca de 2022, en cinco sitios de producción de tilapia en jaulas en el lago de Ilopango y una muestra de referencia de cultivo en estanque con agua de pozo, todas distribuidas en cinco distritos circundantes del lago: Candelaria, San Pedro Perulapán, Ilopango, Santiago Texacuangos y San Miguel Tepezontes. Además, para descartar una posible fuente de arsénico procedente del alimento de los peces, se analizó la concentración de arsénico en dos muestras tomadas del producto utilizado por los productores.

En cada sitio se colectó una muestra de agua y una de músculo, consistente en un promedio de dos peces de talla comestible, que fueron disectados hasta lograr una masa de aproximadamente 400 gramos. El arsénico en las muestras de agua como las de músculo y alimento fueron analizadas por el método 200.7: Determinación de metales y elementos de trazas en agua y desechos, mediante espectrometría de emisión atómica plasmática acoplada inductivamente. Además, in situ se midieron pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura y salinidad en el agua circundante a los sitios de muestreo. El análisis de arsénico total se realizó por tres métodos distintos en dos muestras de músculo y una de agua como control de calidad.

Los resultados indican que la concentración de arsénico en el lago varía entre 0.768 y 0.968 mg/L, la conductividad eléctrica varió entre 1772 y 1842 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las trece muestras obtenidas, mientras que en las muestras de tejido muscular y alimento para tilapia el arsénico no fue detectado mediante el análisis. En base a los resultados obtenidos, es posible indicar que, para el muestreo realizado, aunque la tilapia se desarrolle en agua con concentraciones superiores a la norma de cultivo acuícola, el músculo de tilapia producido en el lago de Ilopango no representa un riesgo de ingesta de arsénico para los consumidores en ninguno de los sitios de producción, no obstante, es requerido un estudio de mayor duración para evaluar el comportamiento temporal de la bioacumulación de este metaloide. Este estudio puede ser

utilizado para evaluar la bioacumulación de metales pesados en peces producidos en distintos medios acuáticos y puede ayudar a establecer límites máximos de concentraciones de arsénico en agua para normativas nacionales en las que se desee regular la producción de tilapia en jaula.

Palabras clave: arsénico en tilapia, cultivo de tilapia, *Oreochromis niloticus*, arsénico en lagos.

Abstract

The Ilopango crater lake has a natural water quality that limits uses such as human supply and aquaculture production, due to its high concentrations of arsenic, boron and mercury. Despite this, there is intense production of tilapia grown in cages in this body of water. This study evaluates the concentrations of arsenic in water and muscle of tilapia (*Oreochromis niloticus*), by analyzing 13 water and muscle samples collected in the dry season of 2022 in five tilapia cages production sites in located in Ilopango lake. In addition it was considered an external reference sample of a pond production, all distributed in five districts surrounding the lake: Candelaria, San Pedro Perulapán, Ilopango, Santiago Texacuangos and San Miguel Tepezontes. Furthermore, to rule out a possible source of arsenic from fish feed, the arsenic concentration was analyzed in two samples taken from the product used by producers.

At each site, a water sample and a muscle sample were collected, consisting of an average of two fish of edible size, which were dissected until a mass of approximately 400 grams was achieved. Arsenic in water samples such as muscle and feed were analyzed by method 200.7: Determination of metals and trace elements in water and waste by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. In addition, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, temperature and salinity were measured in situ in the water surrounding the sampling sites. The analysis of total arsenic was carried out by three different methods in two muscle samples and one water sample as quality control.

The results indicate that the concentration of arsenic in the lake varies between 0.768 and 0.968 mg/L, the electrical conductivity varied between 1772 and 1842 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the thirteen samples obtained, while in the muscle tissue and tilapia food samples the arsenic was not detected by the analysis. Based on the results obtained, it is possible to indicate that, for the sampling carried out, although the tilapia grows in water with concentrations higher than the standard for aquaculture culture, the tilapia muscle produced in Lake Ilopango does not represent a risk of ingestion. of arsenic for consumers in any of the production sites, however, a longer study is required to evaluate the temporal behavior of the bioaccumulation of this metalloid. This study can be used to evaluate the bioaccumulation of heavy metals in fish produced in different aquatic environments and can help establish maximum limits of arsenic concentrations in water for national regulations that wish to regulate the production of tilapia in cages.

Key words: arsenic in tilapia, tilapia culture, *Oreochromis niloticus*, arsenic in lakes

Agradecimientos

Principalmente agradezco a Dios por la vida, la salud y el coraje para desarrollar la presente investigación y que además puso a muchos ángeles en mi camino, como la doctora Marcia de Calderón, quienes me apoyaron con trabajo de campo, consejos e incluso regaños, todo ello me ayudó a concluir con éxito.

El apoyo de Regina Cortez, fue sin duda incondicional en el proceso de investigación desde la concepción del título hasta el apoyo emocional para concluir el presente proyecto, muchas gracias Regina por estar siempre pendiente a pesar de su condición de salud, y con la fé en Dios que saldrá bien librada de la enfermedad que le aqueja.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), a través de la Dirección de Observatorio de Amenazas Naturales, quienes permitieron que las muestras de agua, tejido muscular y alimento para tilapia se analizaran en el laboratorio de calidad de agua, laboratorio que goza de mucha confianza por contar con personal altamente capacitado para desarrollar los procesos de laboratorio.

A los productores de tilapia ubicados en el lago, principalmente en los distritos de Candelaria, San Pedro Perulapán, Ilopango, Santiago Texacuangos y San Miguel Tepezontes, que dispusieron de su tiempo para orientarme sobre los procesos de producción que desarrollan, aportando información y proporcionando tilapia para extraer las muestras de tejido muscular.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	v
Abstract	vii
Agradecimientos.....	ix
Lista de abreviaturas.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	2
3. OBJETIVOS.....	3
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
4.1 Arsénico (As), impacto en el ambiente	3
4.2 Impacto del arsénico en la salud humana.....	6
4.3 Efecto de la bioacumulación del arsénico en peces	8
4.4 Generalidades de la tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>).....	10
5. MATERIALES Y MÉTODOS	11
5.1 Descripción de la zona de estudio	11
5.2 Descripción del cultivo de tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>), en el lago de Ilopango.....	14
5.3 Metodología de la investigación	15
5.3.1 Diseño muestral.....	16
5.3.2 Muestreo probabilístico.....	17
5.3.3 Instrumentos utilizados para la medición de parámetros en campo.....	20
5.3.4 Reconocimiento de los sitios de muestreo	20
5.3.5 Proceso de muestreo de tejido muscular de tilapia, agua y alimento para tilapia ..	21
5.3.6 Procesamiento de muestras de tejido muscular de tilapia	24
5.3.7 Análisis de laboratorio en muestras de agua, tejido muscular de tilapia y alimento para tilapia	25
5.3.8 Análisis triplicados evaluados en laboratorio, para control de calidad de los resultados.....	29
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
6.1 Características físico químicas del agua del lago de Ilopango.....	30
6.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)	31

6.1.2 Oxígeno Disuelto.....	35
6.1.3 Temperatura del agua.....	36
6.1.4 Salinidad y conductividad eléctrica.....	38
6.2 Concentraciones de arsénico en el agua, tejido muscular y alimento para tilapia	40
6.3 Determinaciones de arsénico por distintos métodos analíticos.....	47
6.4 Socialización de los resultados con los productores de tilapia en el lago de Ilopango y recomendaciones para el cultivo y consumo de tilapia proveniente del lago	48
7. CONCLUSIONES	50
8. RECOMENDACIONES	52
9. BIBLIOGRAFÍA.....	54
10. ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del lago de Ilopango.....	12
Figura 2. Actividades desarrolladas en el lago de Ilopango: A) Cultivo de tilapias en jaulas flotantes; B) Fuentes de empleo juveniles; C) Turismo en lancha; y D) Recreación contacto directo.....	13
Figura 3. Ciclo de vida de la tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>).....	15
Figura 4. Etapas desarrolladas durante la investigación	17
Figura 5. Puntos de muestreo de tilapia y agua en el lago de Ilopango y ubicación de muestra de referencia.	19
Figura 6. Toma de muestra de peces: A) y B) Captura de peces (tilapia); C) Selección de dos o tres tilapias para componer la muestra; y D) Pesado de la muestra con dos o tres peces.....	22
Figura 7. Toma de muestras, medición de parámetros de campo y preservación de muestras: A) Toma de muestra de agua del lago; B) Medición de parámetros de calidad de agua In situ; y C) Toma de muestra de agua en sitio de referencia de cultivo en estanque y aplicación de ácido nítrico para preservación de muestra.	23
Figura 8. Muestras de alimento para tilapia: A) 32% de proteína; B) 38% de proteína; y C) pesado de la muestra.	24
Figura 9. Procedimiento para extracción de muestra representativa: A) Talla y peso de las tilapias; B) Disección del tejido muscular de tilapia; y C) Pesado de la muestra y almacenamiento en congelador.	25
Figura 10. Proceso de análisis de arsénico en muestras de agua en equipo ICP-OES.....	26
Figura 11. Proceso de análisis de arsénico en tejido muscular y alimento de tilapia en equipo ICP-OES.....	28
Figura 12. Calidad de agua en función de los siguientes parámetros: conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (ppm), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), arsénico (mg/L) y pH. N=13 para todos los parámetros	34

Figura 13. Valores de oxígeno disuelto en los sitios muestreados en el lago de Ilopango. ...37

Figura 14. Correlación lineal entre pH y conductividad eléctrica..... 39

Figura 15. Distribución espacial de concentraciones de arsénico en muestras de agua del lago de Ilopango, tomadas en abril 2022..... 44

Figura 16. Variación de concentraciones de arsénico en agua del lago de Ilopango, diferenciado por sitio de muestreo con mediciones en abril 2022. 44

Figura 17. Concentraciones de arsénico en muestras de agua del lago de Ilopango en tejido muscular de tilapia, mostrando límites máximos de arsénico para agua de consumo y pescado. 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos de arsénico en pescado y alimentos similares de acuerdo a normas internacionales.	8
Tabla 2. Número de jaulas y puntos para muestreo por distrito.....	19
Tabla 3. Resultados de parámetros físico químicos medidos en los sitios en producción de tilapia en el lago de Ilopango y estadística descriptiva.	31
Tabla 4. Resultados del parámetro arsénico en agua, en tejido muscular y alimento para tilapia.	41
Tabla 5. Concentraciones de arsénico en agua y tejido muscular en muestras triplicadas. ...	42

ANEXOS

Anexo 1. Consulta a productores para describir el manejo de tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>), en el lago de Ilopango.	63
Anexo 2. Resultados de las consultas realizadas a productores de tilapia en el lago de Ilopango.....	65
Anexo 3. Brochure de entrega de resultados a los productores de tilapia.	69

Lista de abreviaturas

ATSDR (por sus siglas en inglés)	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
Can	Candelaria
CCCI	Centro de Control de Calidad Industrial
CENDEPESCA	Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura.
CMP	Contenidos máximos permisibles
DMA	Dimetilarsónico
EPA (por sus siglas en inglés)	Agencia de Protección ambiental
ICP-OES (por sus siglas en inglés)	Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo
IE	Índice de Eutrofización
IET	Índice del Estado Trófico
Ilo	Ilopango
MAG	El Ministerio de Agricultura y Ganadería
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MMA	Metilarsónico
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
PET (por sus siglas en inglés)	Tereftalato de polietileno
SMT	San Miguel Tepezontes
SPP	San Pedro Perulapán
ST	Santiago Texacuangos
TSM	Muestra de referencia de cultivo en estanque en San Miguel Tepezontes

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en el lago de Ilopango respecto a las altas concentraciones de arsénico ha generado inquietud considerando los múltiples usos que se desarrollan dentro de este, entre estos se encuentra el uso para la producción piscícola en jaulas flotantes con densidades de producción entre 46 y 93 peces/m³, abastecimiento de agua para las poblaciones, pesca artesanal, recreación, entre otros. Numerosos estudios han determinado el comportamiento de los metales pesados y trazas en lagos y lagunas de origen volcánico como el lago de Ilopango, por su parte Moune, *et al.*, (2006), plantea la posibilidad que las diferencias en las concentraciones de algunos metales en lagos podrían deberse a las contribuciones asociadas a eventos volcánicos, demostrando además que la emisión de metales como zinc, mercurio, cromo, níquel, cobre, plomo, cobalto, arsénico, selenio, cadmio, entre otros, en cantidades variables depende de cada erupción.

Considerando que el arsénico es un elemento natural que se encuentra en el lago de Ilopango las personas que desarrollan sus actividades en el referido lugar están expuestas a través del consumo de agua contaminada, el uso de agua contaminada en la producción de peces, preparación de alimentos y la exposición prolongada de la piel, para este último, los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel (OMS, 2022). Diversos estudios también enfatizan en la bioacumulación de arsénico en peces corroborando el efecto genotóxico que provoca la presencia de As en aguas (Oliveria, Prieto y Galán, 2004).

Debido a las consecuencias que genera la exposición al agua contaminada con arsénico, se consideró necesario evaluar el grado de concentración de arsénico en tejido muscular de tilapia en peces cultivados en las principales zonas de producción en el lago de Ilopango. En este sentido se planteó como hipótesis, que, debido a la elevada concentración de arsénico en el agua del lago de Ilopango, podría establecerse que, a mayor concentración de arsénico en el agua, es mayor la concentración de arsénico en el tejido muscular de la tilapia (*Oreochromis niloticus*).

Por lo que, la investigación desarrollada en relación a la determinación de la concentración de arsénico en tejidos de tilapia (*Oreochromis niloticus*), procedentes de cultivos en el lago de

Ilopango, el alimento proporcionado a los peces, además se incluyó tejido de la misma especie de peces de un sitio de producción en estanque afuera del lago, como muestra de referencia. Los materiales y métodos utilizados en campo y en laboratorio para la determinación del arsénico en agua, tejido muscular y en alimento para tilapia; se destaca el apoyo del MARN a través del laboratorio de calidad de agua que cuenta con equipo moderno para las determinaciones realizadas. Se presenta además el análisis de los parámetros medidos en campo, de igual forma se muestra de forma detallada los resultados de las consultas realizadas a los 14 productores de tilapia de los sitios donde se extrajeron las muestras de agua, tejido muscular, y alimento para tilapia.

2. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

- 1) La concentración de arsénico (As) en el tejido muscular de tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivada en el lago de Ilopango, sobrepasa, los valores establecidos en las normas internacionales de Perú y la Unión Europea para pescado frescos que establece el límite en 1.0 mg/kg.
- 2) Considerando la elevada concentración de arsénico en el agua del lago de Ilopango, puede establecerse que mientras mayor es su concentración es mayor la concentración de arsénico en el tejido muscular de la tilapia (*Oreochromis niloticus*).

3. OBJETIVOS

- 1) Evaluar el grado de concentración de arsénico en tejido muscular de tilapia que presentan los peces cultivados en cinco zonas de producción localizadas a orillas del lago de Ilopango.
- 2) Evaluar la relación entre las concentraciones de arsénico en el agua del lago de Ilopango y la tilapia cultivada en jaulas en sus orillas.
- 3) Desarrollar recomendaciones para el cultivo y consumo de tilapia proveniente del lago de Ilopango, en función de la concentración de arsénico.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Arsénico (As), impacto en el ambiente

El As se encuentra presente en la atmósfera, suelo, rocas, cuerpos de agua, minerales y organismos de formas inorgánica, orgánica y metilada. La problemática del arsénico es el resultado de su fácil movilización bajo condiciones naturales, sin embargo, el hombre ha tenido un importante impacto en la generación de formas tóxicas del As a través de la actividad minera, uso de combustibles fósiles, pesticidas orgánicos, herbicidas y desecantes agrícolas; además, se utiliza como un aditivo de alimentos para ganado y aves de corral (Rangel, *et al.*, 2015).

Estos autores indican que, cuando el arsénico se encuentra en formas insolubles, como un mineral en combinación con sulfuro y hierro no se considera tóxico, en cambio, cuando se encuentra en formas solubles, como arsénico trivalente As (III) (arsenito) o estado de oxidación 3 y arsénico pentavalente As (V) (arseniato) o estado de oxidación 5, es tóxico para los organismos vivos.

En condiciones oxidantes, se produce la desorción de arsénico si se alcanzan valores de pH alto (>8,5). Normalmente el incremento de pH se produce como consecuencia de los procesos de meteorización e intercambio iónico, combinado con los efectos de un incremento en salinidad en climas áridos y semi-áridos. El proceso de desorción en condiciones alcalinas es considerado como uno de los mecanismos más efectivos en cuanto a movilización de arsénico en condiciones oxidantes, dándose además una correlación positiva entre la concentración de arsénico en la fase acuosa y los valores de pH (Lillo, 2005).

En consistencia con lo anterior, Appelo y Postma (1994), consideran que el potencial redox y el pH son los principales factores ambientales que controlan la especiación de As en aguas. Además, Oremland y Stolz (2005) indican que la biotransformación del As por diferentes grupos fisiológicos de microorganismos juega un papel significativo en su aparición y comportamiento, así como en el reciclaje de este metaloide en los ambientes acuáticos.

En ecosistemas acuáticos, como lagos, el As(V) es el estado termodinámicamente estable en condiciones óxicas, mientras que As(III) es predominante en ambientes reducidos (Seyler y Martin, 1990). Bajo condiciones reductoras a un pH menor a 9.2, predominará la especie neutra o ácido arsenioso (H_3AsO_3), (Mínguez, 2015). La ocurrencia de As elemental (As_0) es rara en la naturaleza y la mayor parte es producida por actividad biológica.

De acuerdo a la información consultada en el estudio distribución de arsénico en la región sudamericana, los autores Bundschuh, *et al.*, (2008) señalan que, el arsénico está presente en el agua, principalmente en el agua subterránea, como As geogénico mayormente vinculado con el volcanismo en los Andes (Argentina, Bolivia, Chile, Perú, Ecuador, Colombia). El As proveniente de estas fuentes pasa al entorno (aguas superficiales y subterráneas, suelos, etc.) por disolución natural y desgaste de rocas.

Además, indican que en la provincia de Mendoza, la información señala niveles elevados de arsénico en el departamento de Lavalle, provincia de San Luis, los departamentos donde se han registrado niveles de As en agua superiores a $50 \mu g L^{-1}$ (0.05 mg/L) son Coronel Pringles, General Pedernera y Gobernador Dupuy. Estudios realizados en la localidad de Buena Esperanza, informan niveles de As entre $43 \mu g L^{-1}$ (0.043 mg/L) y $170 \mu g L^{-1}$ (0.17 mg/L)

en 13 pozos estudiados, mientras que en el agua de red se informan concentraciones de As de $97 \mu\text{g L}^{-1}$ (0.097 mg/L) al comienzo y $90 \mu\text{g L}^{-1}$ (0.09) al final de la red.

Por su parte Murray, *et al.*, (2023), explican distintos procesos asociados a las rocas volcánicas como fuentes de arsénico geogénico en el agua. Entre otros puntos, los autores destacan que la concentración de arsénico se incrementa con la composición silícica de la roca, así como con edificios volcánicos monogénicos máficos hasta estravolcanes de composición intermedia, calderas silícicas y campos de ignimbritas. Indican además, que la dinámica eruptiva tiene un enorme efecto en la concentración de arsénico. Además, se establece que a medida la explosividad de una erupción es mayor, la cantidad de arsénico que se forma es mayor. Se genera entonces absorción del arsénico en los depósitos de caída durante las erupciones volcánicas explosivas que son propensas a altas concentraciones de arsénico.

En suelos, las especies de As son más diversas, incluyendo minerales inorgánicos y orgánicos que contienen arsénico. Estas diferentes formas químicas de As pueden encontrarse precipitadas como sólidos, adsorbidas por constituyentes orgánicos o inorgánicos del suelo, formas iónicas libres y finalmente como constituyentes estructurales de minerales primarios y secundarios (Zia y Yunus, 2022).

Los microorganismos juegan papeles relevantes en los destinos ambientales del As ya que pueden llevar a cabo diferentes transformaciones, por lo que, en ambientes acuáticos y ambientales, hay transformaciones continuas entre formas solubles e insolubles y por lo tanto, entre formas tóxicas y no tóxicas. Además del impacto microbiano en los ecosistemas, el As puede ingresar a ambientes terrestres y acuáticos a través de procesos geogénicos naturales y actividades antropogénicas (Yin, *et al.*, 2022).

Asimismo, las fuentes naturales conocidas y potenciales de As incluyen emisiones hidrotermales y geotérmicas, reservorios de hidrocarburos, minerales, depósitos de carbón, polvo atmosférico y aerosoles, disolución de minerales sulfurados, incendios forestales y movilización biológica (Penrose y Woolson, 1974).

4.2 Impacto del arsénico en la salud humana

De acuerdo con Mansilla (2015), el arsénico se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, los minerales con mayores concentraciones son los arseniuros de cobre, plata, plomo, oro y sulfuros de arsénico. Además, indica que el compuesto de arsénico más utilizado es el trióxido de arsénico y es un subproducto de la fundición de minerales de cobre y plomo. La autora menciona que la exposición prolongada del arsénico tanto en la población general como en los trabajadores puede provocar lesiones específicas como cáncer en la piel y cáncer del pulmón.

El arsénico inorgánico ha sido reconocido como un veneno humano desde la antigüedad, y en altas dosis (más de 60,000 ppb en agua, que es 10,000 veces mayor que el 80% del agua potable de EE. UU. en los niveles de arsénico) puede provocar la muerte. Si se ingiere niveles más bajos de arsénico inorgánico (que oscilan de aproximadamente 300 a 30,000 ppb en agua; esto es entre 100 y 10 000 veces más que la mayoría del agua potable de EE. UU. en niveles de arsénico), se puede experimentar irritación del estómago y los intestinos, con síntomas como dolor de estómago, náuseas, vómitos y diarrea, indica la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2007).

Otros efectos que se podría experimentar debido a la ingesta crónica de arsénico inorgánico a través de aguas o alimentos contaminados son alteraciones en la piel debido a niveles altos de Inmunoglobulinas (IgG e IgE), asociado a patologías como la arsenicosis que evidencian un recuento bajo de glóbulos blancos en la sangre periférica en comparación con individuos no expuestos, lo que desencadena efectos inhibitorios sobre su capacidad proliferativa; en particular, la inmunosupresión inducida por arsénico, se vincula con algunas patologías como el cáncer de la piel y alteraciones en órganos, por ejemplo: hígado, riñón, vejiga o pulmones; así mismo puede favorecer el desarrollo de enfermedades infecciosas y cánceres (Morales, *et al.*, 2021).

Por su parte, Ortiz y Falero (2015) indican que, aunque la contaminación está ampliamente dispersa en distintos medios (suelo, aire, agua, alimentos), esta varía considerablemente según la ubicación geográfica. Por ello, estudiaron la importancia del consumo de peces como alimento en la región de Tumbes, Perú. Su estudio se enfoca en un vacío respecto a la

información del contenido de Hg, Cd, Pb y As en el tejido muscular de tres especies de peces tradicionalmente consumidas por la población.

Basado en las muestras colectadas, los autores verificaron que los factores como la especie de peces y la talla influyen la actividad metabólica de un espécimen, revelando diferentes patrones de bioacumulación, con resultados relevantes para Pb y As. En términos de sanidad de los alimentos, el tejido muscular de las especies presentó contenido por debajo de los límites legales establecidos por la Unión Europea para mercurio, cadmio y plomo, y el país de Canadá para arsénico. Además, se determinó que existe un riesgo de que los niños entre uno y nueve años de edad puedan manifestar efectos adversos a la salud por el consumo de las especies de peces descritas en su estudio, mostrando una mayor vulnerabilidad al arsénico inorgánico presente en el tejido muscular de dichas especies.

En cuanto a la ingesta de las formas solubles del arsénico, por ejemplo, los ácidos metilarsónico [MMA] y dimetilarsónico [DMA] son fuertemente tóxicos. La ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso, y finalmente a la muerte. En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas, y el arsenito más peligroso que el arseniato (Katzung, 2001).

La exposición crónica al arsénico afecta casi todos los órganos y sistemas del cuerpo humano, pudiendo causar principalmente cáncer de pulmón, de vejiga, de piel, hígado, riñón y próstata. Su absorción es mayor si está en forma hidrosoluble, como en el caso del arroz, pero su bioaccesibilidad podría reducirse por compuestos de la matriz alimenticia (Pizzali, *et al.*, 2018). Por su parte la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2009), confirma que el trióxido de arsénico se puede encontrar en los pesticidas y en los defoliantes, así como en el whiskey destilado ilícitamente.

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) el estándar internacional establecido para la calidad de agua para consumo humano es de 0.01 mg/L de arsénico como valor de referencia, por lo que, todos los países que establecen normas nacionales utilizan como parámetro principal de comparación las Guías de la Organización Mundial de la Salud, valores de referencia correspondientes a sustancias de origen natural cuya presencia en el agua de consumo humano puede afectar la salud. El autor también menciona que el arsénico se

encuentra en la dieta, particularmente en peces y mariscos, en los que se encuentra en la forma orgánica menos tóxica, en la Tabla 1, se presentan las referencias de los países respecto a los límites establecidos para el consumo de arsénico en distintos tipos de alimentos.

Tabla 1. Límites máximos de arsénico en pescado y alimentos similares de acuerdo a normas internacionales.

País/Región	Alimento	Límite Máximo (mg/kg)
EE. UU – ATSDR	En huevos y en los tejidos comestibles crudos de pollos y pavos y en ciertos subproductos crudos de cerdos.	0.5- 2
Australia	Pescado	2
Sudáfrica	Pescado y pescado procesado	3
Canadá	Tejido muscular de peces para consumo.	3.5
Perú	Peces de agua dulce	1.0

(SANIPES, 2016; Ortiz y Falero, 2015; ATSDR, 2009; y Díaz, 2019).

4.3 Efecto de la bioacumulación del arsénico en peces

Ortiz y Falero (2015) realizaron el estudio “Niveles de mercurio, cadmio, plomo y arsénico en peces del río Tumbes y riesgos para salud humana por su consumo” los resultados obtenidos con los estándares de calidad (contenidos máximos permisibles, CMP) para el consumo para todas las especies evaluadas en las estaciones, determinó que el contenido promedio de Hg y As es inferior que el CMP correspondiente, por lo cual afirmaron que las muestras evaluadas cumplían con dicho parámetro de calidad. Este estudio reveló la extrema importancia de realizar estudios de especiación de los metales y programas de vigilancia que sean importantes señales de alerta para la salud de la ictiofauna de consumo humano.

Según concluye Tomaila (2018), las especies de peces presentan distintas sensibilidades a la toxicidad de los diversos metales, las cuales se deben a las variaciones biológicas naturales de la composición genética de las poblaciones y sus condiciones individuales. La autora menciona que es usual que la variación sea menor dentro de una especie, considerando los

estadios, la condición de salud, condiciones del medio natural de origen; asimismo, los resultados obtenidos en los ensayos de toxicidad podrían estar influenciados por la historia de vida de los peces empleados, de donde provienen.

Dentro de los embalses y ríos, los metales se mueven desde el sedimento a la columna de agua, y se acumulan en los organismos acuáticos a través de las branquias y piel, o por el consumo de alimentos contaminados, este es el comienzo de la transferencia trófica, donde los contaminantes se trasladan y llegan a los peces que consumen las personas (Villalba, 2021).

De acuerdo con Bibha, *et al.*, (2017), los efectos sobre la salud de los peces incluyen varios mecanismos de toxicidad aguda y crónica, incluidos el sistema enzimático, genético e inmunológico, destacando que otros estudios revelaron altas concentraciones de As en el hígado y el riñón en comparación con los demás órganos, lo que altera el metabolismo normal; ya que la exposición al As altera funciones biológicas normales, lo que resulta en el inicio directo de la enfermedad o, al menos, predisposición de un organismo a ello.

Este autor destaca la importancia de comprender los efectos toxicológicos del As en el medio ambiente acuático es importante para mitigar sus efectos nocivos sobre la salud acuática, particularmente en peces y organismos, incluido el ser humano, que consume pescado, el regular seguimiento de los niveles de arsénico y sus efectos asociados sobre la salud en organismos acuáticos como los peces, puede no sólo proporcionar información sobre la salud acuática en general, sino que también puede actuar como centinela para impactos potenciales en la cadena alimentaria.

En un interesante estudio sobre esta problemática, Oliveria (2004), desarrolló la investigación sobre bioacumulación y daños genotóxicos en Pez Cebra en aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas, en pozo en Zimapán, México, con contenidos de arsénico de 0,50 mg/L, los ejemplares del Pez Cebra fueron estudiados durante 30 días en tres lotes separados (control negativo en agua del pozo UAEH, control positivo de 5 mg/L de As(V) y las aguas del pozo V de Zimapán), con 50 ejemplares por cada lote. En las aguas se observó la disminución de las concentraciones de As en el tiempo en tanto que en peces se produce un incremento. También el autor confirma que a los 30 días se había producido una disminución en las aguas

del control positivo de 1,000 mg/L (0,035 mg/L/día) en tanto que en peces se incrementó por bioacumulación en 0,015 mg/Kg. (0,0005 mg/kg/día). Para las aguas del experimento (pozo V de Zimapán), una disminución de 0,200 mg/L (0,0067 mg/L/día) y en peces un incremento de 0,0005 mg/kg (0,00017 mg/kg/día).

Con relación a la inducción de micronúcleos (MNs) en células de branquias, se encontró que en los controles negativos existe una inducción por generación espontánea que al término de 30 días es de 8 MNs por cada 1000 células contadas. En el control positivo de 5,000 mg/L de As una inducción de MNs 15,38 veces mayor que el control negativo, en tanto que para los peces en las aguas del pozo V de Zimapán se apreció un incremento de inducción de MNs de 2,38 veces más con respecto al control negativo. Todo ello pone de manifiesto un efecto de genotoxicidad por As (Oliveria, Prieto, y Galán, 2004).

Es importante señalar que el lago objeto de esta investigación, cuenta con diferentes estudios realizados en torno a la presencia de arsénico y otros metales en agua, por ejemplo, Ortiz (2017) y MARN (2022). Esta condición sumada a la presencia de zonas con abundante producción de tilapia desarrollada en jaulas flotantes aproximadamente a siete metros de profundidad y de 10 a 50 metros de la orilla del lago, destaca la necesidad de analizar la bioacumulación de arsénico en el tejido muscular de tilapia producida en dicho cuerpo de agua.

4.4 Generalidades de la tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Tsang y Quintanilla (2008), estimaron que el cultivo de la tilapia inició aproximadamente en 1820 en las zonas tropicales de África y Palestina, y aunque se conocen más de 100 especies de tilapia en el mundo, sólo diez especies son de importancia económica y de producción de proteína animal para mejorar la alimentación de la población.

Los autores exponen que, normalmente las 10 especies con potencial importante se producen en condiciones controladas en las aguas tropicales y subtropicales del mundo, por sus características favorables de adaptación, la tilapia es muy apropiada para la piscicultura ya que tiene rápido crecimiento, es fácil su reproducción y tiene resistencia a enfermedades.

Estos autores dedujeron que, otras bondades de la tilapia, es su bajo costo de producción, la tolerancia a desarrollarse en condiciones de alta densidad, su habilidad para sobrevivir a bajas concentraciones de oxígeno, hasta 1 mg/L y soportar un amplio rango de salinidades entre 0 y 40 ‰. Así mismo concluyeron que debido a las condiciones extremas del agua marina, la tilapia tiene una enorme capacidad para nutrirse a partir de una gran gama de alimentos naturales y artificiales. Otros autores indican que, para el óptimo crecimiento de la especie, el rango de temperatura, preferente se encuentran entre 25 a 27°C, mientras que el rango de pH ideal está entre 6 y 9 (Makori, 2017). Estas ventajas del cultivo de tilapia, son aprovechadas en la piscicultura que se practica en el lago de Ilopango.

Lo anterior es consistente con Rodríguez (2012), quien indica que los alevines de tilapia roja y Nilo de 1 y 30 días (dos protocolos), sobreviven hasta 20,000 ppm de salinidad, sin embargo, los alevines de tilapia demostraron una mayor tolerancia a las salinidades utilizando el protocolo progresivo (aumento gradual de la salinidad) en comparación con el protocolo directo o de golpe (aumento súbito de la salinidad).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción de la zona de estudio

El lago de Ilopango es el lago natural más grande del país y su origen es de tipo volcánico, se encuentra situado a 16 km de la ciudad San Salvador entre los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Paz (Figura 1); cuenta con una altitud de 440 msnm, 72 km² de espejo de agua y una profundidad de 230 metros (MARN, 2020). La cuenca alta de dicho cuerpo de agua tiene participación de catorce distritos y se estima que alberga a una población de más de 600 mil habitantes. El agua del lago es utilizada para diferentes actividades como abastecimiento humano, riego, recreación, pesca libre y actividades productivas como el cultivo de peces en jaulas (Figura 2).

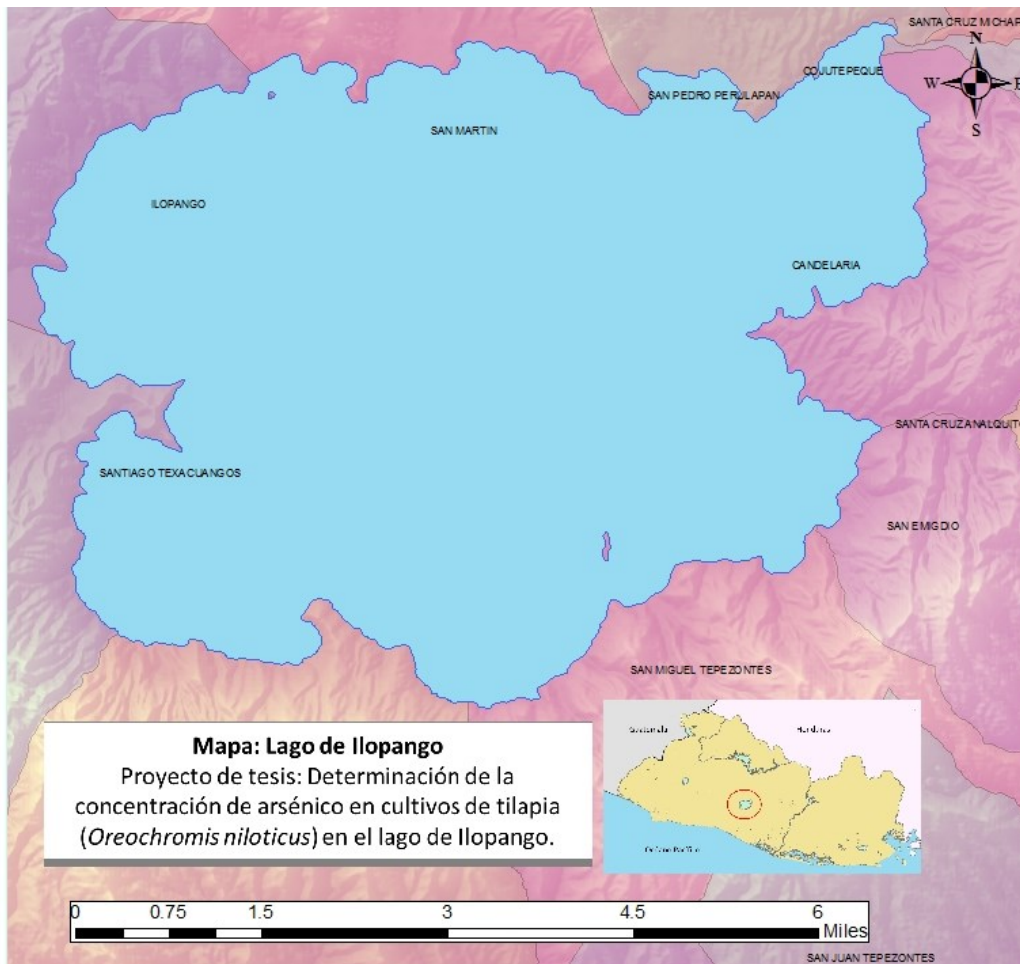


Figura 1. Ubicación del lago de Ilopango

La calidad del agua en el lago de Ilopango está influenciada por su condición geológica de lago cratérico (MARN, 2023) y por las actividades productivas desarrolladas dentro del mismo, entre las que destacan la producción piscícola, y la descarga de aguas residuales y residuos sólidos de las poblaciones que habitan en la cuenca. Estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales indican que el estado de eutrofización del lago de Ilopango valorado a través del Índice de Eutrofización (IE) lo clasifica como Eutrófico; además, el estado trófico del lago de Ilopango evaluado a través del Índice del Estado Trófico (IET) indica que varía de Mesotrófico a Hipertrófico; además, destaca que la actividad piscícola en el lago de Ilopango está afectando el estado trófico del lago, deteriorándolo de Mesotrófico a Hipertrófico (Mena, 2015).

Adicionalmente, según los resultados de Ortiz (2017), en la investigación realizada sobre el estudio de metales pesados en el lago de Ilopango, la contaminación generada por algunos elementos se ha convertido en un problema en el lago, destacando que muchas personas se exponen diariamente a estos contaminantes a través del agua para beber, los sedimentos contaminados, así como alimentos, y que la bioacumulación de metales en organismos queda comprobada en otras investigaciones, citadas en el Estudio de metales pesados en el lago de Ilopango.

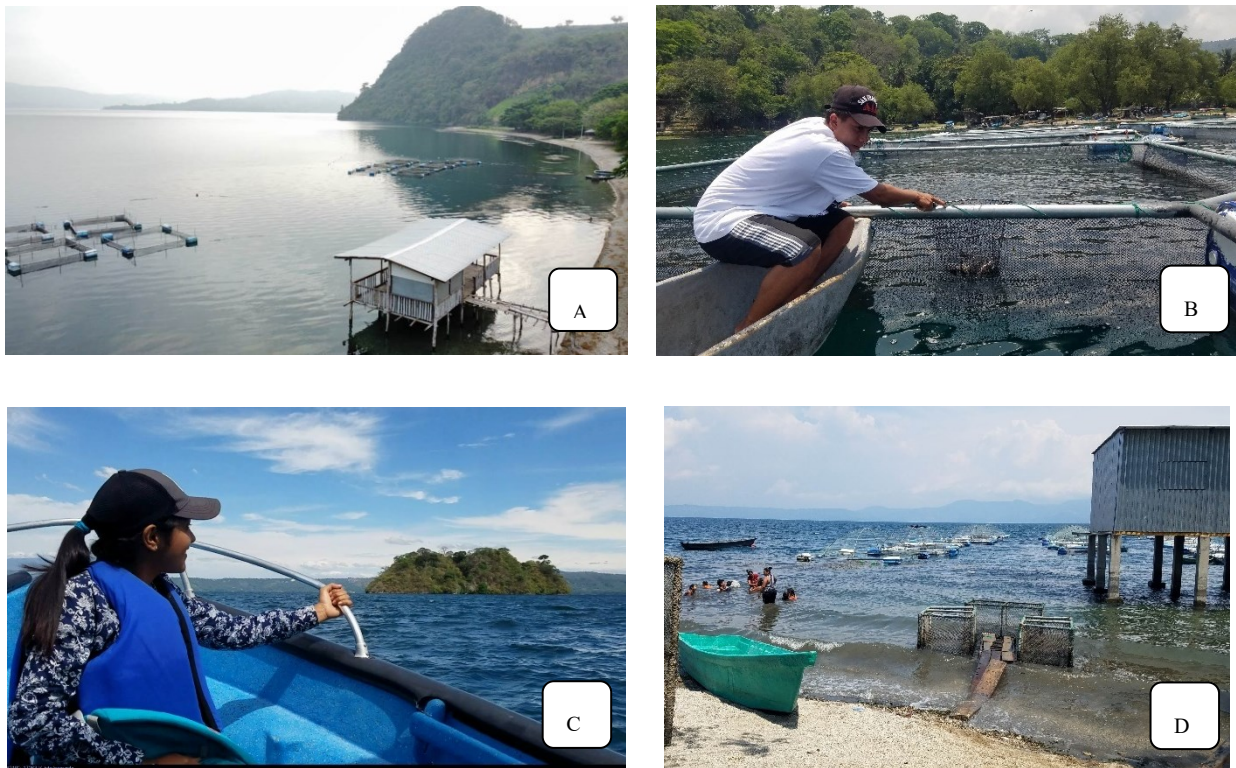


Figura 2. Actividades desarrolladas en el lago de Ilopango: A) Cultivo de tilapias en jaulas flotantes; B) Fuentes de empleo juveniles; C) Turismo en lancha; y D) Recreación contacto directo.

5.2 Descripción del cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), en el lago de Ilopango

En el lago se identifican más de 700 jaulas flotantes destinadas a la producción de tilapia, distribuidas en la zona de influencia de los distritos de Santiago Texacuangos, Ilopango y San Martín, departamento de San Salvador; San Pedro Perulapán y Candelaria Departamento de Cuscatlán; San Miguel Tepezontes y San Francisco Chinameca, departamento de La Paz, destacando el distrito de San Pedro Perulapán el cual posee más de 290 jaulas, las cuales corresponden a productores individuales y cooperativas.

Las jaulas poseen dimensiones seis metros de largo por seis metros de ancho, en general su profundidad es de tres metros. El sitio elegido para la muestra de referencia, consiste en un estanque en tierra ubicado en San Miguel Tepezontes con cuatro metros de ancho, seis metros de largo y un metro de profundidad.

La producción se inicia con alevines de 20 días de nacidos desarrollados en sitios aledaños como Acuarichard, Palo Blanco o a partir de producción propia. La densidad de siembra varía entre 42 y 92 alevines/m³. Por su parte, en el sitio de referencia la densidad de siembra es de 5 alevines/m³. Durante el ciclo de producción la pérdida de tilapia por muerte es variable, oscilando entre 4 y 50 %, con un promedio de 15 %, consistente con autores como Mueses y Ospitia (2010).

Los alevines son alimentados mediante concentrado de crecimiento al 38% de proteínas, aplicando por cada jaula ½ libra por cada tiempo y en total alimentan cuatro tiempos al día, por lo que se suministran dos libras por día de alimento concentrado por jaula, esta alimentación llega hasta los 50 días de edad.

Posterior a esa fecha, desde los 51 hasta los 90 días se suministra concentrado de desarrollo al 32% de proteína en cantidades de tres a cuatro libras por tiempo, los tiempos de alimentación por día es de tres hasta los tres meses (90 días), momento en el cual están listos para la venta, con un peso aproximado de una libra por cada tilapia. La Figura 3, muestra el ciclo de vida de la tilapia.

En cuanto a la comercialización del producto su venta se realiza a nivel local y en distritos aledaños como San Salvador, Cojutepeque, San Martín, Ilopango, Santiago Texacuangos.

Además, realiza la venta a los turistas de la zona, se provee a la Fuerza Armada, al Super Selectos; eventualmente exportan tilapia hacia México y Guatemala. Los datos de cada productor, en cuanto al manejo que realizan sus sistemas de producción pueden consultarse en el anexo 2.



Figura 3. Ciclo de vida de la tilapia (*Oreochromis niloticus*).

Tomado de Organismo Nacional de Sanidad Pesquera, (SANIPES) 2022.

La producción de la tilapia en El Salvador de acuerdo con FAO (2004), representó para el año 2003, 654.1 toneladas, de estas se exportó 229.8 toneladas, principalmente hacia Estados Unidos. En 11 de los 14 departamentos se produjo camarón de mar, de agua dulce, peces ornamentales y tilapia, pero solo en los departamentos de San Salvador y Cuscatlán se reportó el 95% de la producción de tilapia (área en m³). Por su parte MAG (2023), indicó que entre Atiocoyo sur y norte hay unos 150 acuicultores, quienes sacan más de 30,000 libras diarias, (4,898.8 toneladas/año) representan un área de 350 manzanas de espejos de agua (ríos Lempa y Sucio) dedicados al desarrollo de la tilapia.

5.3 Metodología de la investigación

La investigación se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo con el propósito de obtener muestras representativas de la población estudiada, con ello se desarrolló las ecuaciones y sistemas de selección de sujetos donde todos obtuvieron la misma oportunidad o probabilidad de ser seleccionados (McCall, 2001). Asimismo, el alcance es de tipo descriptivo, refiere a un nivel de profundidad que, si bien es básico, implica contar con una buena base de conocimiento previo acerca del tema, de manera que especifica las propiedades, las

características y los individuos o población estudiados, en este caso los productores de tilapias fueron seleccionados como población de estudio para obtener la muestra.

El abordaje de este estudio se desarrolló en seis etapas, las cuales se presentan en forma esquemática en la Figura 4, la investigación ha permitido la interacción con los productores de tilapia en las actividades propiamente de colecta de información y obtención de las muestras representativas. En los apartados siguientes se explican estas etapas con mayor detalle.

5.3.1 Diseño muestral

Considerando que en el lago de Ilopango se identifican más de 700 jaulas destinadas a la producción de tilapia, distribuidas en la zona de influencia de los distritos de Santiago Texacuangos, Ilopango y San Martín, departamento de San Salvador; San Pedro Perulapán y Candelaria Departamento de Cuscatlán; San Miguel Tepezontes y San Francisco Chinameca, departamento de La Paz, destacando que solo el distrito de San Pedro Perulapán alberga el 41% aproximadamente de jaulas, correspondiendo a productores individuales y cooperativas. Por lo que, la población está definida por un total de 14 productores existentes en cinco distritos de producción de tilapia antes mencionados, conforme a consultas realizadas, el número total de jaulas con peces de talla comercial en los cinco sitios asciende a 117 unidades. La proporción de jaulas respecto al total varía entre los productores.



Figura 4. Etapas desarrolladas durante la investigación

5.3.2 Muestreo probabilístico

El muestreo probabilístico es un método de muestreo de selección aleatoria. El requisito más importante del muestreo probabilístico es que todos en una población tengan la misma oportunidad de ser seleccionados. Este tipo de muestreo puede a la vez ser estratificado, en el cual, una población grande se divide en dos grupos más pequeños, que generalmente no se superponen, sino que representan a toda la población en conjunto. Durante el muestreo, estos grupos pueden organizarse y luego de estos se puede obtener una muestra de cada grupo por separado.

Algo común en este tipo de método es organizar o clasificar las muestras por sexo, edad, etnia, etc. Este método divide sujetos en grupos mutuamente exclusivos y luego utiliza un muestreo aleatorio simple para elegir miembros de los grupos.

Los miembros de cada uno de estos grupos deben ser distintos para que todos los miembros de todos los grupos tengan la misma oportunidad de ser seleccionados utilizando la probabilidad simple (Muguirra y Ortega, 2024). Para efectos de determinar el tamaño de la muestra se empleó la ecuación del tamaño de la muestra para poblaciones finitas:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra buscada

N = tamaño de la población o universo

z = parámetro estadístico que depende el nivel de confianza (NC)

e = error de estimación máximo aceptado

p = probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)

q = (1-p) = probabilidad que no ocurra el evento estudiado.

Partiendo de una población de 14 productores en el lago integrados por los cinco distritos, los cuales totalizan 117 jaulas, y considerando un error de 5% con un nivel de confianza de 95%, luego de aplicar la ecuación 1 a los datos se obtuvo un tamaño muestral constituido por 13 productores, distribuidos proporcionalmente en función del número de productores por distrito (Tabla 2). Además, se agregó una muestra de referencia, cuya condición fue la producción de tilapia con agua de pozo. En total se analizó 14 muestras. En todos los casos la muestra que se colectó fue de músculo de tilapia y agua. En la Figura 5 se presenta la distribución espacial de los 14 puntos de muestreo en el lago de Ilopango.

Tabla 2. Número de jaulas y puntos para muestreo por distrito.

Sitio	Distrito	Número de productores por distrito en el lago	Jaulas por sitio	Muestras por sitio
ST	Santiago Texacuangos	1	7	1
Ilo	Ilopango	4	17	2
SPP	San Pedro Perulapán	5	57	6
Can	Candelaria	2	26	3
SMT	San Miguel Tepezontes	2	10	1
TSM	Muestra de Referencia en San Miguel Tepezontes	1		1
Total		15	117	14

Nota: La muestra fue determinada a partir de una población que excluyó a la muestra de referencia TSM

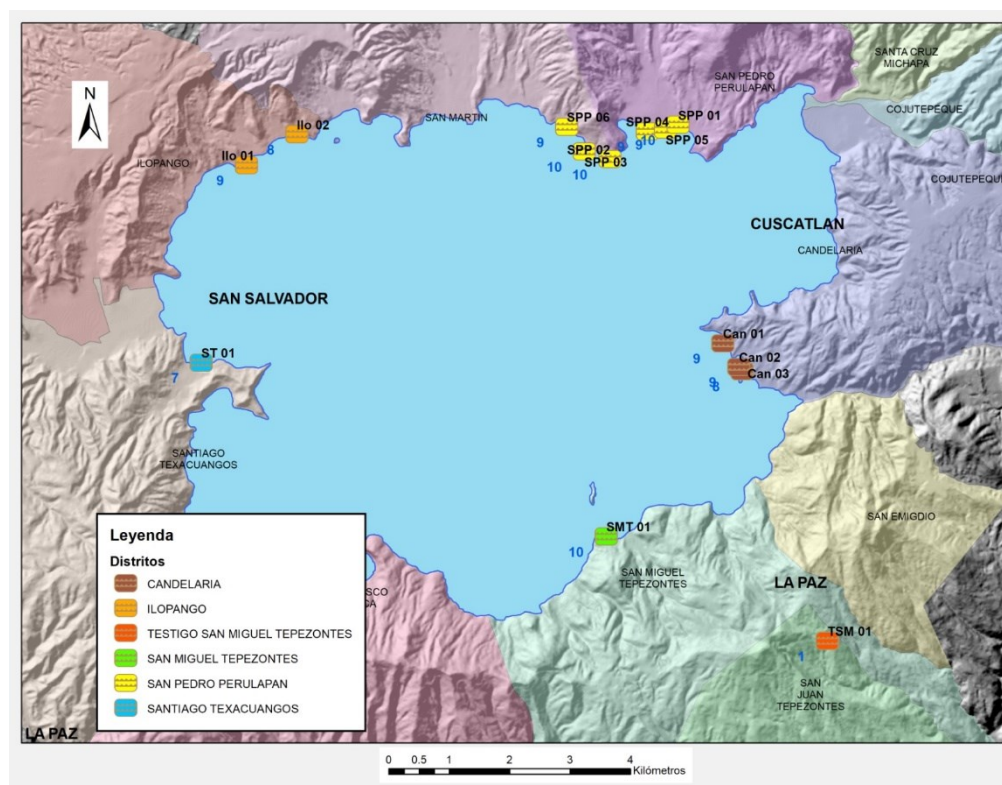


Figura 5. Puntos de muestreo de tilapia y agua en el lago de Ilopango y ubicación de muestra de referencia.

5.3.3 Instrumentos utilizados para la medición de parámetros en campo

Se requirieron dos muestreadores de campo de tipo portátil, un Oxímetro marca Extech que además mide la temperatura del agua, un multiparámetro 7 IN 1, que se utilizó para monitorear pH, salinidad, temperatura y conductividad eléctrica, y un termómetro que sirvió para medir la temperatura ambiental y del agua, considerando que las mediciones de estos parámetros se realizaron durante los muestreos.

Cabe destacar que para las muestras de agua a analizar en el laboratorio, se coordinó previamente con el laboratorio de calidad de agua del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a fin de coordinar con el personal del MARN, el protocolo de preservación con ácido nítrico aplicado a las muestras de agua previo análisis, asimismo indicando los cuidados generales para garantizar la cadena de custodia de las muestras de agua, de tejido muscular y alimento para tilapia que posteriormente se analizaron en el referido laboratorio.

5.3.4 Reconocimiento de los sitios de muestreo

Con el propósito de cuantificar el tiempo necesario para la extracción de las muestras, las mediciones de parámetros en campo, así como la obtención de las respuestas sobre a las consultas realizadas, se realizó dos jornadas de trabajo en las cuales se obtuvo colaboración de los productores. Con este trabajo, se logró definir el mejor día de la semana para la colecta de muestras.

Los puntos considerados en esta etapa están constituidos por un total de 13 de los 14 productores localizados en cinco distritos de producción de tilapia alrededor del lago de Ilopango: Santiago Texacuangos, Ilopango, San Pedro Perulapán, Candelaria y San Miguel Tepezontes; además de la muestra de referencia TSM en este último distrito (totalizando 14 puntos). Las actividades consistieron en desplazarse hasta los sitios identificados para la extracción de muestras identificando con los productores las fechas para extracción de la muestra, los desplazamientos hasta las jaulas flotantes, el tiempo de suministro de la consulta a productores sobre el manejo de las jaulas, incluso el procesamiento de la muestra en campo.

Así, antes de la toma de muestra se establecieron criterios para extracción de las tilapias que conformarían las muestras, entre estos criterios destacan: a) zonas de mayor producción (distritos); b) Jaulas con producción de tilapias entre tres y cuatro meses de vida, entre 15 y 20 (listas para la venta); c) selección al azar de las jaulas y peces; d) selección de dos a tres tilapias por sitio en promedio para obtener el tejido muscular.

Previo a desarrollar los muestreos fue necesario planificar principalmente con los productores de tilapia las horas de llegada, la disponibilidad de tilapias, la disposición de lanchas o botes para acceder hasta las jaulas con tilapias listas para la venta, así como la disponibilidad de un vehículo de doble tracción para el desplazamiento hacia los diferentes distritos donde se desarrolló la investigación, además se coordinó con los laboratorios de calidad de agua del MARN y Centro de Control de Calidad Industrial (CCCI) la recepción de las muestras de tejido muscular de tilapia, de agua, y alimento para tilapia.

Se verificó la lista de equipo, accesorios y otros insumos necesarios. De esta manera se llevó al sitio, hielera, envases plásticos de ½ litro para la toma de muestra de agua, frasco de ácido nítrico como preservante, bolsas con capacidad de cinco libras para trasladar las tilapias hacia el sitio de disección, viñetas para identificar las muestras de agua y de tejido muscular, agua desmineralizada para lavar los depósitos y equipos multiparámetros de medición de los parámetros de campo (temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica y salinidad), papel toalla para secar después de lavar con el agua desmineralizada, libreta de apuntes, bolígrafos, teléfono celular para tomar fotografías, videos y grabaciones de audio, dron para toma de algunas fotografías aéreas.

5.3.5 Proceso de muestreo de tejido muscular de tilapia, agua y alimento para tilapia

Los muestreos de agua, tejido muscular y alimento para tilapia se desarrollaron el 09 de abril de 2022, coincidiendo con la etapa final de la época seca. Esto tuvo el propósito de evitar la influencia estacional de la época lluviosa que generase dilución del agua del lago.

Muestreos de peces para extracción de tejido muscular de tilapia

El procedimiento establecido para el muestreo de peces fue similar al desarrollado por Pei, *et al.*, (2019), el cual consistió en seleccionar al azar las jaulas con producción de peces de tres meses aproximadamente, que corresponde a tilapias listas para ser comercializadas. Se le indicó al productor de donde se debía extraer la muestra y se capturó con una red aproximadamente 6 a 7 tilapias, de estas se extrajo dos o tres, en función del peso. Los peces fueron pesados para totalizar dos libras aproximadamente e integrar una muestra debidamente etiquetada (Figura 6). Luego las muestras se colocaron en hieleras y se trasladaron a un sitio adecuado para su posterior procesamiento.



Figura 6. Toma de muestra de peces: A) y B) Captura de peces (tilapia); C) Selección de dos o tres tilapias para componer la muestra; y D) Pesado de la muestra con dos o tres peces.

De las 14 muestras, 13 se tomaron de jaulas en el lago y la muestra de referencia se extrajo de un estanque ubicado en el cantón Los Laureles del distrito de San Juan Tepezontes, el cual está construido de concreto con dimensiones aproximadas de cuatro metros de ancho por seis metros de largo y un metro de profundidad, el cual se llena con agua de pozo (diferente del lago).

Muestreo de agua del lago y sitio de referencia de cultivo en estanque

Próximo a las jaulas de las que se extrajeron las muestras de tilapias, se tomaron las muestras de agua para determinar arsénico, las muestras se tomaron aproximadamente de 0 a 50 cm de profundidad (Figura 7A). En cada punto se midieron los parámetros de campo salinidad T, CE, OD y pH (Figura 7B), las muestras se colectaron en envases plásticos PET, con capacidad 500 ml, se colocaron en hielera con una temperatura aproximada de 4 °C para luego ser trasladados al laboratorio de calidad del agua del MARN, donde posteriormente se procedió a su análisis. Este procedimiento corresponde con lo sugerido por Sáens (2009) y ratificado por el personal de laboratorio de calidad de agua del MARN. Adicional a las 13 muestras de agua del lago, se extrajo una muestra de agua del sitio de referencia de cultivo en estanque fuera del lago (Figura 7C).



Figura 7. Toma de muestras, medición de parámetros de campo y preservación de muestras: A) Toma de muestra de agua del lago; B) Medición de parámetros de calidad de agua In situ; y C) Toma de muestra de agua en sitio de referencia de cultivo en estanque y aplicación de ácido nítrico para preservación de muestra.

Muestra de alimento para tilapia

La toma de muestra consistió en seleccionar al azar dos de los 14 sitios, para la extracción de alimento para tilapia. Considerando que el 100% de los productores manifestó durante las

consultas realizadas, que utilizan concentrados de 38% de proteína en la etapa inicial, 32% en la etapa de desarrollo y 28% en la etapa final de la tilapia (Figura 8). Luego se colectó del saco en uso aproximadamente entre 120 y 200 gramos de cada concentrado para integrar la muestra. Estas se colocaron en bolsas resellables y se trasladaron al laboratorio para el respectivo análisis.

5.3.6 Procesamiento de muestras de tejido muscular de tilapia

El procesamiento se realizó en un sitio adecuado para llevar a cabo la limpieza, disección, pesado y almacenamiento de la muestra. Siguiendo el proceso realizado por Pei, *et al.*, (2019), el tejido muscular de cada pez que conformaba una muestra fue disectado en cubos de aproximadamente un centímetro por lado e integrado en una muestra debidamente codificada por sitio. Para ello se requirió de utensilios lavados con agua desmineralizada para evitar contaminación cruzada en las muestras, asimismo, las muestras se lavaron con agua desmineralizada.



Figura 8. Muestras de alimento para tilapia: A) 32% de proteína; B) 38% de proteína y C) pesado de la muestra.

Cada muestra quedó integrada por los cubos del tejido muscular de los dos o tres peces que la conformaban, logrando una masa media de 400 gramos, la cual se almacenó en bolsas plásticas resellables (Figura 9), que se refrigeraron y luego se trasladaron al laboratorio para su preparación y análisis.



Figura 9. Procedimiento para extracción de muestra representativa: A) Talla y peso de las tilapias; B) Disección del tejido muscular de tilapia; y C) Pesado de la muestra y almacenamiento en congelador.

5.3.7 Análisis de laboratorio en muestras de agua, tejido muscular de tilapia y alimento para tilapia

Equipos y materiales para el análisis

Las muestras de agua, de tejido muscular y alimento para tilapia fueron ingresadas para su análisis en el laboratorio de calidad de agua del MARN, el equipo utilizado para la cuantificación de arsénico en las diferentes matrices se llevó a cabo en un equipo de plasma acoplado inductivamente (ICP): consiste en una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento (ICP-OES).

En esta técnica, la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización forma un aerosol que es transportado por el gas Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido a las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados y ionizados generándose los espectros de emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas. La información es procesada por el sistema informático. El equipo utilizado fue ICP-OES marca Perkin Elmer Modelo Optima 8300.

El método utilizado para el análisis de arsénico en las diferentes matrices es el establecido por la Agencia de Protección Ambiental. Método 200.7: Determinación de metales y elementos de trazas en agua y desechos mediante espectrometría de emisión atómica plasmática acoplada inductivamente (EPA a., 1994).

Análisis del agua

Para el análisis de las 14 muestras de agua se utilizó una cantidad de 15 ml aproximadamente, las muestras de agua preservadas en campo y recibidas en el laboratorio a una temperatura entre 4 a 6 °C no presentaban sólidos, por esta razón no se filtraron, las muestras se dejaron reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente del área de trabajo (20 °C), luego se procedió a agitar la muestra para homogenizarla, transfiriéndolas a tubos de polypropileno estéril hasta la marca de 15 ml, se colocaron en el automuestrador del equipo para ser succionada, nebulizada y atomizada para la cuantificación del arsénico en el Espectrometro ICP OES (Figura 10).

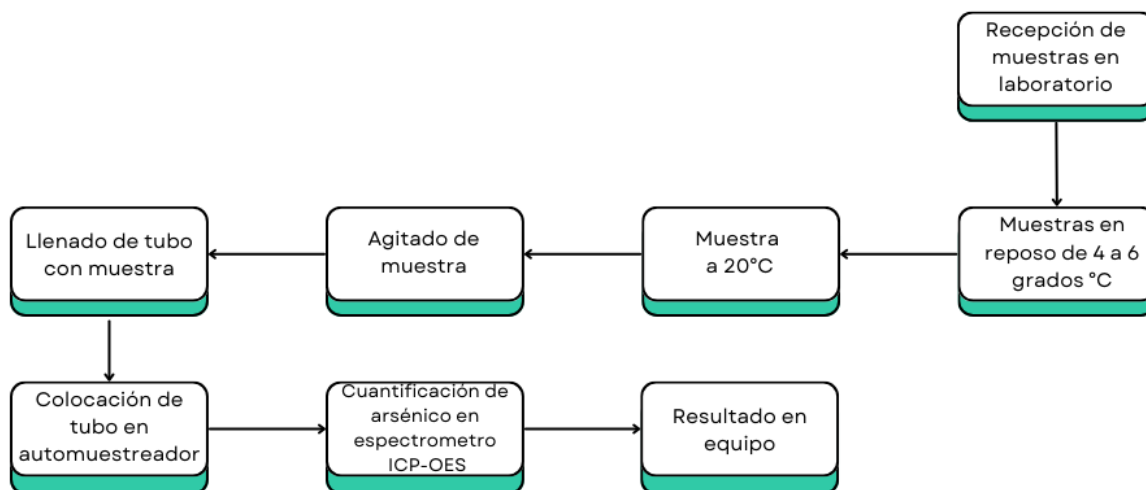


Figura 10. Proceso de análisis de arsénico en muestras de agua en equipo ICP-OES.

Análisis del tejido muscular y alimento de tilapia (muestras sólidas)

Tanto las muestras de tejido muscular como las de alimento, por encontrarse en estado sólido, se manejaron en un proceso similar. Las muestras de alimento de tilapia se ingresaron al laboratorio en bolsa plástica resellables a temperatura ambiente, y las muestras de tejido muscular de tilapia fueron ingresadas al laboratorio, en bolsas resellables con su contenido congelado. Estas últimas se mantuvieron en bandejas para que pudieran llegar a temperatura ambiente, y poder homogenizarlas en la misma bolsa.

En ambas tipos de muestras, se procedió a pesar en un porta muestras 0.5000 gramos aproximadamente, en balanza analítica Metler Toledo Modelo AB204, registrando el peso exacto por cada muestra, las que fueron transferidas a tubos de digestión de vidrio, de igual manera el alimento de tilapia se pesó 0.5000 gramos, teniendo todas las muestras en los tubos, se adicionaron 10 ml de ácido nítrico calidad metal traza, cubriendolas con tapón de vidrio, para luego proceder a colocar los tubos en un digestor de bloque programable de tal manera de mantener la temperatura a 95 ± 10 °C, durante 1 hora, se llevó a esta temperatura de forma escalonada, al completar la digestión, se dejaron enfriar los tubos, posteriormente se realizó la transferencia del contenido de los tubos para llevar a volumen de 25 ml, se realizaron lavados con pequeñas porciones de agua desmineralizada, llevando al volumen de aforo con este mismo tipo de agua, se agitó bien cada frasco volumétrico y se transfirió a tubo de polypropileno estéril 15 ml de la muestra digerida, colocándola en el automuestreador para luego ser succionada al espectrofotometro ICP-OES. Con los resultados obtenidos en el equipo se procedió a realizar cálculos de acuerdo a la ecuación 2:

$$As (mg/kg) = \frac{\text{Resultado } (\frac{mg}{L}) \text{ Vol.diges (L)}}{\text{Peso (kg)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para desarrollar esta actividad, se procedió a extraer alícuotas de muestras de agua, tejido muscular de tilapia y alimento para tilapia, bien homogenizada o mezclada, luego fue pesada la muestra en el caso del tejido muscular y alimento, y medida en el caso de agua, con precisión para continuar el procesamiento de muestras. Para el análisis de sólidos totales recuperables

en una muestra sólida o acuosa que contiene material no disuelto, los analitos se solubilizaron primero mediante reflujo suave con ácido nítrico y ácido clorhídrico (Figura 11).

Después de enfriar, la muestra se compuso de volumen, se mezcló y se centrifugó durante la noche antes del análisis. Para la determinación de analitos disueltos en una alícuota de muestra acuosa filtrada, o para la determinación total recuperable de analitos en el consumo de "análisis directo" de agua, donde la turbidez de la muestra es <1 NTU, de esta manera la muestra estaba lista para análisis mediante la adición adecuada de ácido nítrico, y luego se diluyó en un volumen predeterminado y mixto antes del análisis.

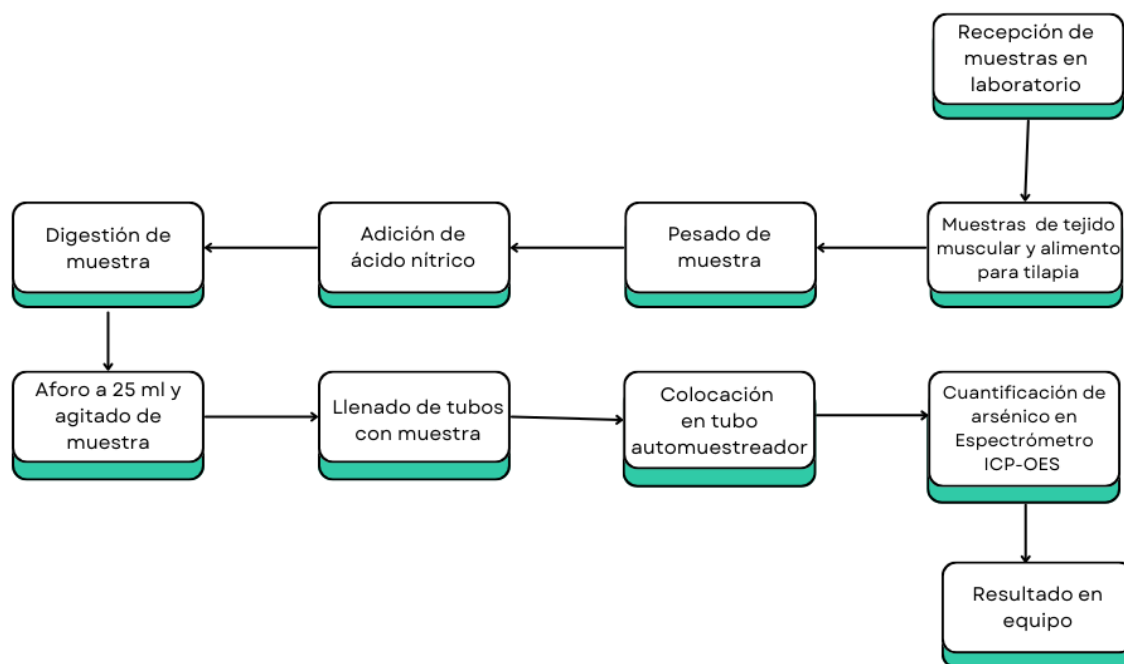


Figura 11 Proceso de análisis de arsénico en tejido muscular y alimento de tilapia en equipo ICP-OES.

El análisis descrito en este método implica determinaciones multielementos por ICP-OES utilizando instrumento simultáneo. El equipo mide los espectros característicos de emisión de la línea atómica por espectrometría óptica. Las muestras se nebulizan y el aerosol resultante

se transporta al plasma antorcha. Los espectros de emisión específicos del elemento son producidos por una radiofrecuencia plasma acoplado inductivamente.

Los espectros son dispersados por una rejilla espectrómetro, y las intensidades de los espectros de línea se controlan a nivel específico de longitudes de onda por un dispositivo fotosensible. Fotocorrientes del dispositivo fotosensible son procesadas y controladas por un sistema informático. Se requiere una técnica de corrección de fondo para compensar la variable de contribución de fondo a la determinación de los analitos. La señal de fondo debe medirse adyacente a la longitud de onda del analito durante el análisis. Varias interferencias fueron consideradas y tratadas apropiadamente.

5.3.8 Análisis triplicados evaluados en laboratorio, para control de calidad de los resultados

Con la finalidad de validar y aumentar la confiabilidad de los resultados de laboratorio realizados en el MARN para determinar las concentraciones de arsénico, se triplicó una muestra de agua y dos muestras de tejido muscular a fin de realizar las determinaciones mediante dos métodos adicionales distintos, uno en el MARN (mismo laboratorio, método distinto), consistente en el análisis mediante espectrofotómetro con horno de grafito y otro en laboratorio del Centro de Control de Calidad (CCCI), utilizando el método de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) (distinto laboratorio y método).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se abordará los resultados obtenidos y el análisis que responde a las dos hipótesis planteadas en el inicio de la investigación:

1. La concentración de arsénico (As) en el tejido muscular de tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivada en el lago de Ilopango, sobrepasa, los valores establecidos en las normas internacionales de Perú y la Unión Europea para pescado frescos que establece el límite en 1.0 mg/kg.
2. Considerando la elevada concentración de arsénico en el agua del lago de Ilopango, puede establecerse que mientras mayor es su concentración es mayor la concentración de arsénico en el tejido muscular de la tilapia (*Oreochromis niloticus*).

El análisis se enfoca en los resultados obtenidos para la tilapia cultivada en el lago, el agua circundante y las muestras de alimento. La muestra que sirvió como referencia (TSM), obtenida de un estanque construido de mampostería en el cantón Los Laureles del distrito de San Miguel Tepezontes, ubicado afuera del lago y que utiliza agua de pozo para el llenado del mismo, se excluyó de la estadística descriptiva del agua del lago por tener un origen distinto, no obstante, se utiliza como parámetro comparativo de referencia.

6.1 Características físico químicas del agua del lago de Ilopango

Los resultados de los parámetros físico químicos medidos en campo (pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y salinidad), para 13 muestras de agua del lago de Ilopango se compilan en la Tabla 3; así mismo se presenta la estadística descriptiva de dichos parámetros.

Tabla 3. Resultados de parámetros físico químicos medidos en los sitios en producción de tilapia en el lago de Ilopango y estadística descriptiva.

Sitio de muestreo	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto (%)	pH	Conductividad Eléctrica μS/cm	Salinidad (ppm)
Can 01	28	53.7	7.58	1832	911
Can 02	27.6	54.9	7.62	1813	908
Can 03	26.2	54.5	7.55	1808	900
SPP 01	28.5	67	7.65	1793	901
SPP 02	29.1	79.7	7.78	1808	902
SPP 03	28.3	58.2	7.47	1772	892
SPP 04	29.1	68.3	7.55	1809	908
SPP 05	28.4	53.8	7.5	1761	889
SPP 06	28.6	57	7.54	1789	896
Ilo 01	28.2	62.3	7.56	1768	885
Ilo 02	29	72.5	7.56	1827	909
ST 01	28.1	61.5	7.73	1842	918
SMT 01	28.1	72.3	7.61	1815	903
Media	28.2	62.75	7.59	1803	902
Desviación estándar	0.76	8.51	0.09	25.02	9.38
Mediana	28.3	61.50	7.56	1808	902
Mínimo	26.2	53.70	7.47	1761	885
Máximo	29.1	53.70	7.78	1842	918

6.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Los parámetros fisicoquímicos medidos en el lago tienen un comportamiento muy similar entre sí para los 13 sitios muestreados, con valores de pH oscilando entre 7.47 y 7.78 (Figura 12), la muestra de referencia mostró un valor en el mismo rango (7.65), en el mismo periodo de tiempo se tomaron las muestras SPP 01; SPP 03, SPP 04; SPP 05; y SPP 06 sin que se presentaran variaciones significativas de temperatura que podrían relacionarse con el valor más alto de pH registrado en la muestra SPP 02.

Sin embargo, se requerirá la evaluación de otros parámetros y un monitoreo más prolongado para establecer relaciones en este comportamiento, tal y como se presenta en un estudio desarrollado por Umaña (1990), en la laguna del Barva, Costa Rica, donde se midió entre otros

parámetros el pH, indicando que este en la superficie hasta un metro se mantiene en 7.5 y disminuye ligeramente cerca del fondo, pero se mantiene alrededor del punto neutro.

Por su parte Peña (2019), en su estudio consideró 30 años de registro de parámetros fisicoquímicos del Lago Masaya, destacando que el pH alcalino del lago (8.35 ± 0.56 unidades) podría estar explicado por el impacto de los procesos degradativos debido a la carga alóctona aportada en la época seca cuando el Lago depende de flujos subterráneos y por drenaje superficial en la época lluviosa.

En cuanto a la semejanza con otros estudios del lago de Ilopango, los datos son un tanto variables con respecto a estudios realizados por el MARN (2022), donde se midieron valores de pH entre 8.4 y 8.6, es importante mencionar que los sitios monitoreados por el MARN tienen la finalidad de evaluar la calidad de las aguas en los principales sectores del lago y la posible incidencia de las diversas actividades antropogénicas, por lo que, no necesariamente corresponde a los mismo sitios que la investigación.

Por otra parte, Ortiz (2017) desarrolló un estudio de metales pesados en el lago de Ilopango, en el que también realizó mediciones de pH, a ocho metros de profundidad en las zonas más cercanas al centro del lago, encontrando que el parámetro en cuestión osciló entre 8.67 y 8.75, la diferencia entre las citas consultadas y los resultados de la investigación puede estar influenciada por la temporalidad en la medición de los datos, los sitios y los sistemas de producción de tilapia o por diferencias instrumentales.

Sobre el efecto del pH en peces, autores como Kubitzka (2017) manifiestan que el pH extremo, por sí solo, deprime la actividad alimentaria, reduce el crecimiento, afecta negativamente y suprime la respuesta inmune de los peces y camarones cultivados, los altos valores de pH pueden potenciar la toxicidad del amoníaco para los peces y camarones, lo cual se produce principalmente durante las horas del mediodía y de la tarde.

El autor indica que, en la noche, con el cese de la fotosíntesis y el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO_2), el pH del agua disminuye. La disminución nocturna del pH proporciona a los peces y camarones un alivio de la toxicidad del amoníaco por la tarde. No

obstante, al día siguiente el pH aumentará y los animales volverán a estar expuestos a concentraciones tóxicas de amoníaco.

Por otra parte, los valores de pH medidos en este estudio, resultaron inferiores a los reportados en el informe de calidad de agua para actividades recreativas en el Lago de Ilopango, realizado por la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (MARN, 2023), ya que, de acuerdo a este autor, en los seis sitios muestreados el pH osciló entre 8.79 y 8.84, cabe destacar que los datos que reporta el MARN, corresponden a sitios más alejados de las zonas productivas de tilapia, aguas adentro en el lago, lo cual podría explicar la diferencia.

Otra posible explicación de esta diferencia podría relacionarse con la época en que el muestreo fue realizado ya que los datos del MARN corresponden a la época lluviosa, en la cual una posible mezcla de la columna de agua podría estar presente, mientras que los datos de este estudio reportan la época seca, otra diferencia podría asociarse con el equipo de medición.

De acuerdo con Folleto Informativo 3.1.4.0, pH, de la Agencia de Protección Ambiental de California (EPA, 2010) la mayoría de los ambientes naturales tienen un pH entre 4 y 9. El pH del agua de mar es generalmente entre 7.5 y 8.4. En agua dulce, el pH varía entre 6.5 y 8.5 protegiendo a la mayoría de los organismos. Sin embargo, el valor del pH tolerado por diferentes organismos es variable.

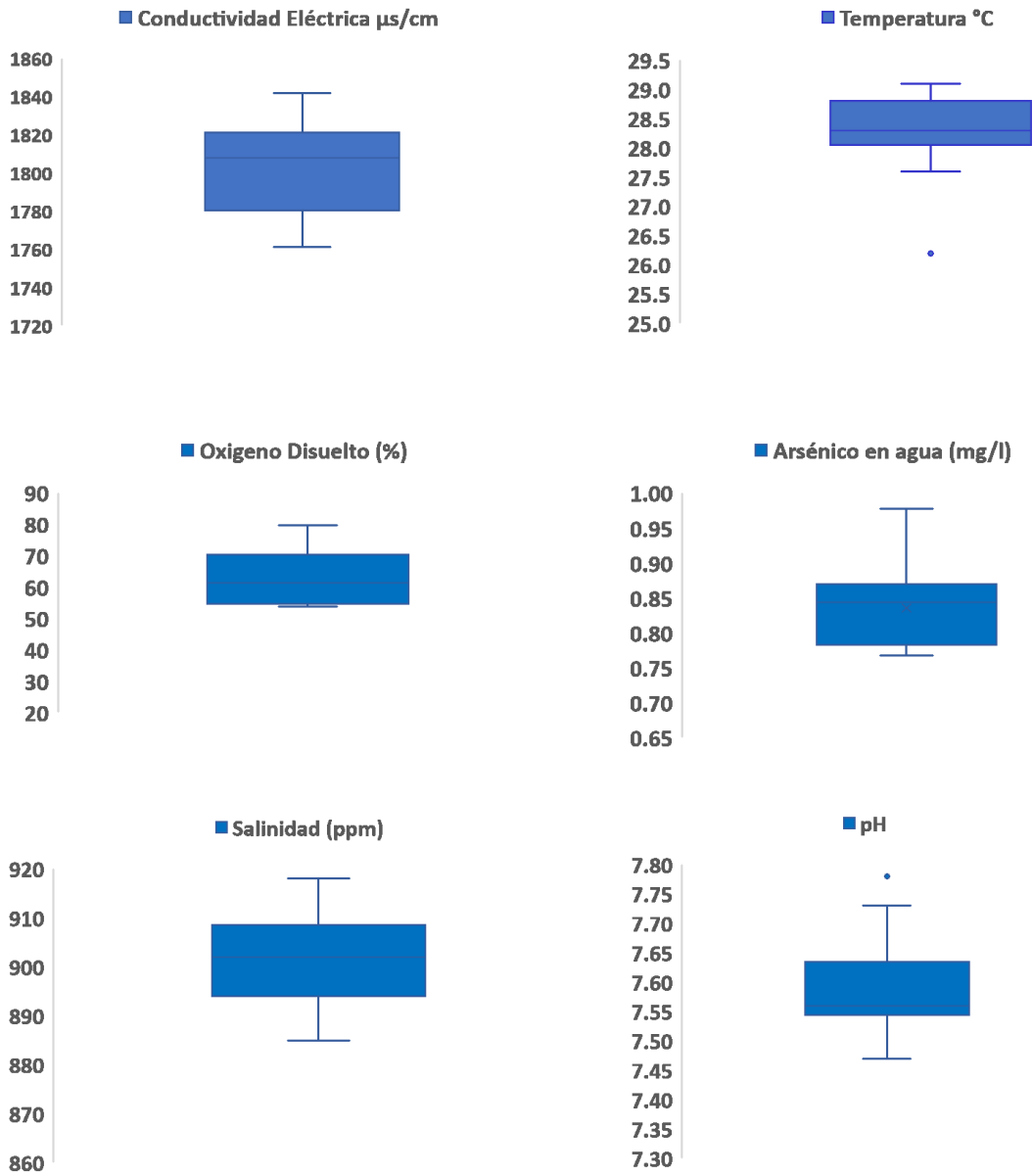


Figura 12. Calidad de agua en función de los siguientes parámetros: conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (ppm), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), arsénico (mg/L) y pH. N=13 para todos los parámetros.

6.1.2 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es un importante indicador de calidad de agua, si bien las tilapias pueden tolerar niveles bajos de oxígeno disuelto (1 mg/L), está demostrado que si los niveles de oxígeno no se mantienen en concentraciones apropiadas ($> 4\text{mg/L}$), las tilapias se afectan y no comen, lo que hace que los peces pueden ser más susceptibles a las enfermedades. Por otro lado, este hecho eleva la tasa de conversión alimenticia y consecuentemente los costos de producción, requiriéndose mayor cantidad de alimento para producir la misma cantidad de pescado lo que, además, genera mayores desechos en el agua ocasionando como consecuencia el deterioro de la calidad de agua (Palomino, 2004).

En cuanto a los valores de oxígeno disuelto (OD) en agua (Figura 12), estos oscilaron entre 4.31mg/L (53.7%) siendo el dato más bajo en el sitio Candelaria 01 y 6.26 mg/L (79.7%) como dato más alto en el sitio SPP 02, es importante mencionar que el día en que se realizaron los muestreos se observó la presencia de vientos leves durante la mañana y se incrementaron a fuertes por la tardes, por lo que, se podría inferir como una causa que el valor sea alto a pesar de las altas densidades de siembra de alevines y tilapias en producción por jaula.

No obstante, los valores determinados para OD son consistentes con valores reportados en estudios anteriores (Mena, 2016; MARN, 2023), la concentración de oxígeno disuelto está contemplada por el MARN para determinar la aptitud de uso para especies de consumo de producción animal. Pese a que el MARN no concluye (solo lo reporta) respecto de este parámetro, el oxígeno disuelto es esencial para la supervivencia de la mayoría de las especies acuáticas, puesto que, bajos niveles de OD pueden provocar la muerte de peces y dañar otras formas de vida acuática. Estudio similar desarrollado por Umaña (1990), indica que, en lagunas cratéricas como el Barva, el oxígeno disuelto en profundidad de 0 a 1 metro ronda los 6.84 mg/L.

Los resultados de la investigación realizada por González, *et al.*, (2021), también coincide con los datos obtenidos en la presente investigación, puesto que manifiesta que, el oxígeno disuelto presenta una media de 6.70 mg/L en ocho puntos de monitoreo en la laguna volcánica cratérica Quilotoa, Cotopaxi, Ecuador.

Por su parte, Tsang y Quintanilla (2008) manifiestan que en general, las tilapias son capaces de sobrevivir a bajas concentraciones de oxígeno disuelto, por la capacidad que su sangre posee para saturarse de oxígeno, cuando la presión parcial de éste es baja. En esos casos, la tilapia tiene la facultad de reducir el consumo del mismo cuando las condiciones son adversas. La tilapia nilótica es capaz de sobrevivir en aguas cuya concentración de oxígeno disuelto es menor de 0.3 mg/L (miligramo x litro), considerablemente más baja que la requerida por la mayor parte de especies cultivadas.

El oxígeno disuelto en agua varía de forma inversamente proporcional a la temperatura, es decir, una mayor temperatura implica una menor concentración de oxígeno disuelto en el agua. En algunas ocasiones este hecho podría explicar la mortalidad de peces en la época seca, puesto que un aumento de temperatura, puede ocasionar menor disponibilidad de oxígeno para los organismos que las habitan (Cheng, *et al.*, 2019).

En el lago de Ilopango, los valores medidos reflejaron mayor oxigenación en los sitios SPP 02 e Ilo 02 (Figura 13), situación que favorece el desarrollo de los peces, es importante resaltar que, entre los datos de oxígeno disuelto no se observaron datos atípicos, sin embargo el extremo inferior se mostró cercano al primer cuartil, indicando por lo tanto, que los valores de los datos son cercanos a 4.31mg/L (53.7%) y 4.51mg/L (54.5%) respectivamente.

6.1.3 Temperatura del agua

Los valores de temperatura del agua del lago oscilaron entre 26.2 y 29.1 grados Celsius (°C) para las muestras obtenidas, el dato de la mediana corresponde a 28.64 °C, por lo tanto en el rango de 13 datos medidos desde las 6:00 am hasta las 6:30 pm la diferencia fue de 3°C, considerando que también se registró un valor atípico en el sitio Can 03 (Figura 12).

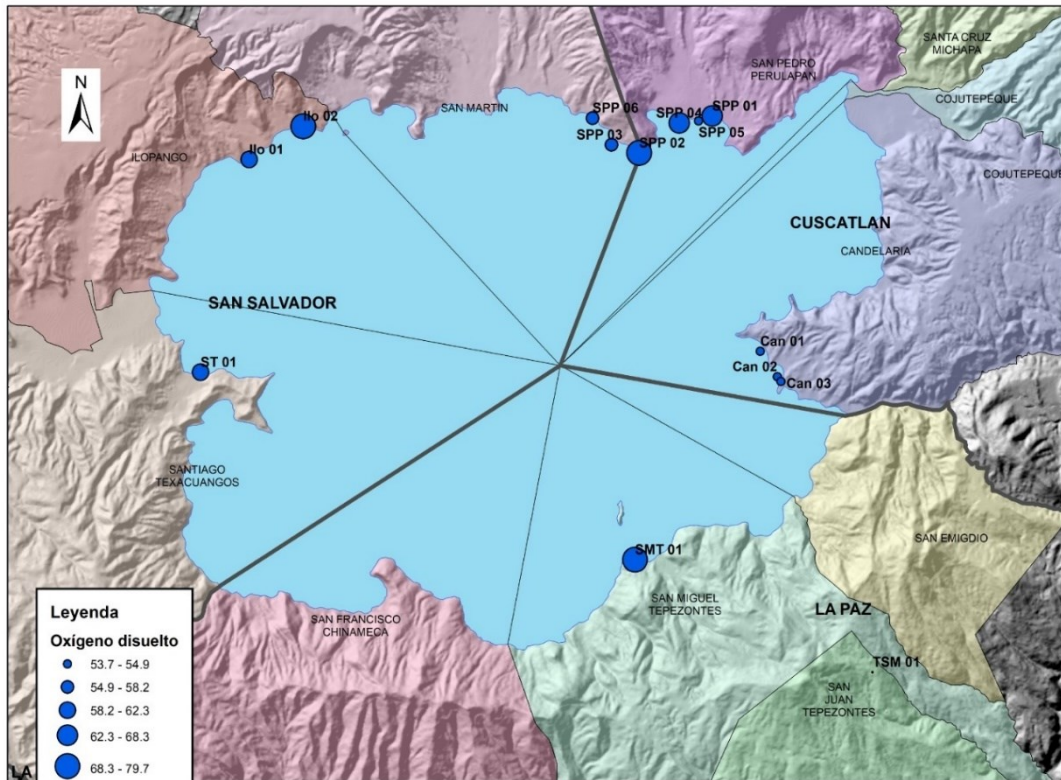


Figura 13. Valores de oxígeno disuelto en los sitios muestreados en el lago de Ilopango.

Considerando que la muestra de referencia estaba fuera del lago, el valor de temperatura obtenida fue de 26.1°C, esta temperatura puede estar influenciada por la presencia de árboles próximos al estanque construido. Resultados similares se determinaron por Peña (2019), en una investigación desarrollada en el lago Masaya, de Nicaragua, el cual indica que, se considera un cuerpo de agua cálido, por el hecho de caracterizarse por temperaturas superficiales entre 26 y 31 °C, manteniendo este mismo patrón tanto en época seca como lluviosa.

La temperatura en los peces es decisiva por tratarse de organismos poiquilotermos o de sangre fría, las tilapias mueren si la temperatura baja a menos de 10 °C. Por lo que las tilapias prefieren temperaturas elevadas y, por lo tanto, es uno de los factores ambientales más importantes en la producción. Por ello su distribución se restringe a áreas cuyas isothermas de invierno sean superiores a los 20 °C (Gui, *et al.*, 2023).

El rango natural de temperaturas en el que habita la tilapia oscila entre 20 y 30 °C, aunque pueden soportar temperaturas menores. Esto indica que en cuanto a la temperatura del agua reportada para el lago de Ilopango por estudios previos (Mena 2015; MARN, 2023) y este estudio, las tilapias se cultivan en un rango propicio para su producción.

De acuerdo con Saavedra (2006), para el óptimo desarrollo de la tilapia se requiere que en el sitio de cultivo se mantengan los requerimientos medio ambientales como temperatura en rangos de temperatura que oscilan entre 20 y 30 °C, pueden soportar temperaturas menores, sin embargo, a temperaturas menores de 15 °C no crecen. La reproducción se da con éxito a temperaturas entre 26-29 °C. Los resultados de campo indican por lo tanto que las temperaturas del agua en las zonas de producción de tilapia en el lago de Ilopango están los rangos óptimos para su exitosa producción.

6.1.4 Salinidad y conductividad eléctrica

La salinidad de los mares, lagos, ríos o acuíferos puede tener un origen natural, relacionado fundamentalmente con su estructura geológica, su secuencia sedimentológica o su contexto climático o tener un origen antropogénico, incorporándose al agua partir de vertidos o lixiviados de todo tipo. En el caso de los acuíferos, sus características específicas provocan que, a nivel global se pueda considerar usual la existencia de procesos de salinización natural de sus aguas, que posteriormente se verifican en sus descargas, en formas de fuentes, lagos o humedales salinos. En muchos ecosistemas, el exceso de salinidad es un factor que limita la supervivencia de organismos de agua dulce, generando efectos negativos de tipo económico y para la salud (Rivera, 2016).

Los datos obtenidos de salinidad en las muestras de agua del lago resultaron entre 885 y 918 ppm, con una media de 901.69 ppm como se observa en la (Figura 12) un gráfico bastante proporcional entre las diferentes mediciones, no mostrándose datos atípicos. Para el caso de la muestra de referencia, por tratarse de agua diferente a la del lago el valor de salinidad resultó en 153 ppm (consistente con las características del agua dulce), a pesar de guardar una relación

proporcional la conductividad eléctrica con la salinidad, la desviación estándar de este último parámetro resulto en 9.38, mostrando poca variabilidad en los datos.

De acuerdo con el folleto informativo de Conductividad Eléctrica/Salinidad. s.l. de la Agencia de Protección Ambiental de California EPA (2010), la conductividad eléctrica se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}).

Además, los iones más negativos son cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato, bicarbonato, se observa una relación proporcional, que a medida aumenta el pH, la conductividad electrica tambien es alta. Para los datos obtenidos, esta proporcionalidad es baja ($R^2=0.2942$), posiblemente porque la cantidad de datos tambien es baja, sin embargo se mantiene una tendencia conforme a lo indicado anteriormente (Figura 14).

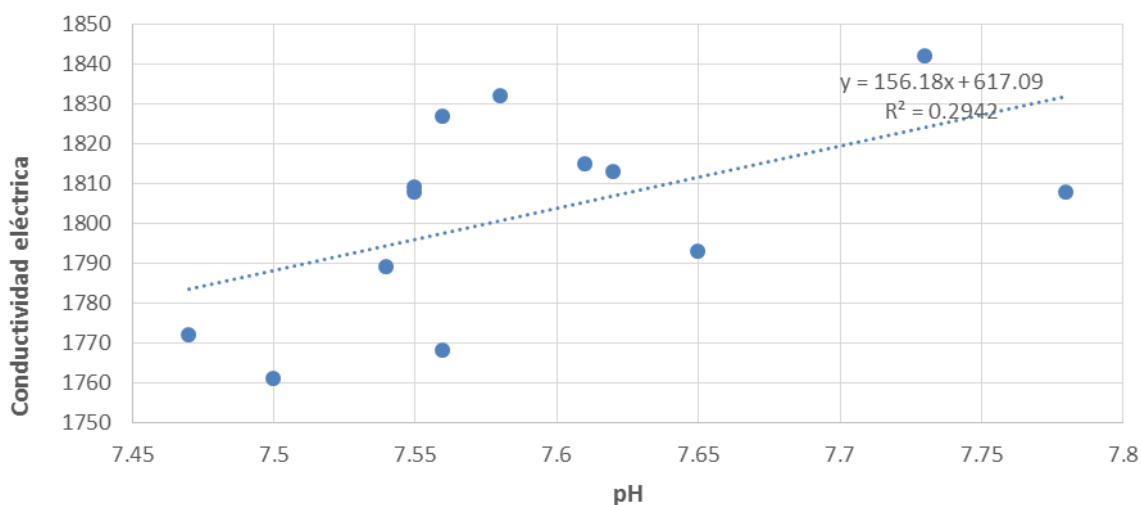


Figura 14. Correlación lineal entre pH y conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica en los sitios analizados osciló entre 1761 y 1842 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una media de 1,808 $\mu\text{S}/\text{cm}$, observándose una distribución uniforme (Figura 12). Los datos obtenidos son consistentes con lo reportado por el MARN en estudios previos (Mena, 2016; MARN, 2023). Para la muestra de referencia la conductividad eléctrica resulto de 305 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

valor típico para agua subterránea fresca del área de San Salvador y sus alrededores (Barrera, *et al.*, 2021).

Pese a excluir del análisis de desviación estándar el valor de la muestra de referencia, la desviación es de 25.02 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica poca variabilidad en las sales disueltas en los sitios muestreados durante la investigación. Los sitios estudiados en el lago de Ilopango indican que los valores obtenidos pueden tener altas cantidades de sales disueltas puesto que la conductividad eléctrica sobrepasa los 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, condición que limita el agua para ser utilizada como agua potable, como lo indica el Boyd (2017).

Es importante mencionarlo puesto que se observó que próximo a la zona de muestreo en el distrito de Santiago Texacuangos existe una captación de agua por parte de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA) destinada para el abastecimiento de las poblaciones de una parte de la población del área metropolitana de San Salvador (AMSS). Sin embargo, el agua aprovechada de dicho lago es potabilizada en una planta de tratamiento.

6.2 Concentraciones de arsénico en el agua, tejido muscular y alimento para tilapia

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las concentraciones de arsénico en agua, tejido muscular y alimento para tilapia. Los resultados muestran que el arsénico únicamente pudo detectarse en agua del lago de Ilopango, con valores entre 0.768 y 0.968 mg/L, mientras que, en la muestra de referencia, el tejido muscular y en los dos alimentos analizados, los valores estuvieron por debajo del límite de detección de 0.000591 mg/kg.

Los datos de arsénico en agua, como se observa en la Figura 12, reflejan una asimetría positiva con datos concentrados en el extremo inferior, muy cercano al primer cuartil, la media resultó 0.823mg/L y la mediana resultó de 0.844 mg/L muy cercano al tercer cuartil, además la desviación estándar fue 0.059 mg/L considerándose pocas variaciones entre los datos obtenidos.

Tabla 4. Resultados del parámetro arsénico en agua, en tejido muscular y alimento para tilapia.

Código de Muestra	Arsénico en agua (mg/L)	Arsénico en tejido muscular (mg/kg)	Arsénico en alimento para tilapia (mg/kg)
Can 01	0.978	ND	
Can 02	0.872	ND	
Can 03	0.867	ND	
SPP 01	0.864	ND	
SPP 02	0.874	ND	
SPP 03	0.844	ND	
SPP 04	0.809	ND	
SPP 05	0.796	ND	
SPP 06	0.794	ND	
Ilo 01	0.772	ND	
Ilo 02	0.773	ND	
ST 01	0.768	ND	
SMT 01	0.853	ND	
Media	0.836		
Desv. Std	0.059		
Mediana	0.844		
Mínimo	0.768		
Máximo	0.978		
TSM	ND	N/A	
Pesqueta			ND
Tecnutral			ND

ND: No Detectado (por debajo del límite de detección de 0.000591mg/kg); N/A: no aplica

En cuanto a los resultados de los análisis triplicados y analizados por el método de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (método distinto, mismo laboratorio) y los análisis realizados mediante espectrofotometría de absorción atómica con el

método de llama (método y laboratorio distinto); los resultados indican que la concentración en la muestra de agua analizada con horno de grafito, se redujo casi a la mitad (0.392 mg/L), mientras que en el método de llama el arsénico no fue detectado. Por su parte los análisis de arsénico en muestras de músculo de tilapia, resultaron no detectables en ambos casos (Tabla 5).

Tabla 5. Concentraciones de arsénico en agua y tejido muscular en muestras triplicadas.

Identificación de la muestra	Unidades	Laboratorio MARN (espectrometría de absorción atómica con horno de grafito).	Laboratorio MARN (Equipo Plasma de Acoplamiento Inductivo método (ICP)).	Laboratorio CCCI (Espectrofotometría de absorción atómica método de llama).
SPP 06 Agua	mg/L	0.392	0.794	<0.002
SPP 06 Tejido muscular	mg/kg	ND	ND	<0.002
ST 01 Tejido muscular	mg/kg	ND	ND	<0.002

6.2.1 Arsénico en agua

El origen del arsénico en el agua del lago de Ilopango, se puede asociar a su condición de caldera silícica (Saxby, *et al.*, 2016) y a la explosividad de sus erupciones y los depositos de ceniza resultantes de la misma (Pedrazzi, *et al.*, 2019). Por consiguiente, sus elevadas concentraciones se pueden clasificar como arsénico inorgánico asociado directamente a la geología de la zona.

Las concentraciones de arsénico en los 13 sitios de muestreo dentro del lago, como se indicó antes, variaron entre 0.768 y 0.968 mg/L (Figura 15), correspondiendo a valores intermedios de los datos reportados por el MARN en estudios previos (Mena, 2016; y MARN, 2023). En todos los casos, estos valores superan los límites establecidos de 0.05 mg/L para agua de consumo humano (RTS, 2018). Por su parte, la muestra de referencia resultó como no detectable, confirmando que la fuente de agua es de origen distinto (agua de pozo).

Los resultados de este estudio coinciden con la investigación realizada por Mena (2016), en la que se documentó que las concentraciones encontradas en ese año oscilaban entre 0.8246 y 1.081 mg/L, aunque en la referida investigación los datos se colectaron en zonas más cercanas al centro del lago y no en la zonas de producción como el caso del presente estudio.

En contraste, López, *et al.*, (2009), reportaron concentraciones en un rango entre 0.15 y 0.77, detectándose al sur los mayores valores del lago. A diferencia de estos autores, en este proyecto no se tomó muestras en el sur, sin embargo, la concentración en el sureste es similar a los máximos de los reportados por los mencionados autores.

Estas concentraciones más elevadas se distribuyen en los sitios de muestreo ubicados en los distritos de Candelaria (Can), identificada como una de las zonas con mayor producción de tilapia en jaulas flotantes; San Miguel Tepezontes (SMT) y San Pedro Perulapán (SPP); mientras que los valores más bajos pero superiores a la normativa para agua de consumo humano se identificaron en Santiago Texacuangos (ST), cercano a una extracción de agua para uso doméstico e Ilopango (Ilo) (Figura 16).

Este comportamiento amerita un estudio específico que incorpore el análisis de las corrientes u otros factores que generan el gradiente de concentraciones de arsénico observado además de los aspectos volcánicos tales como el vulcanismo de mayor actividad, las concentraciones de arsénico en sedimentos y limnológicos, como la estratificación y la mezcla de la columna de agua, señalados por López, *et al.*, (2009).

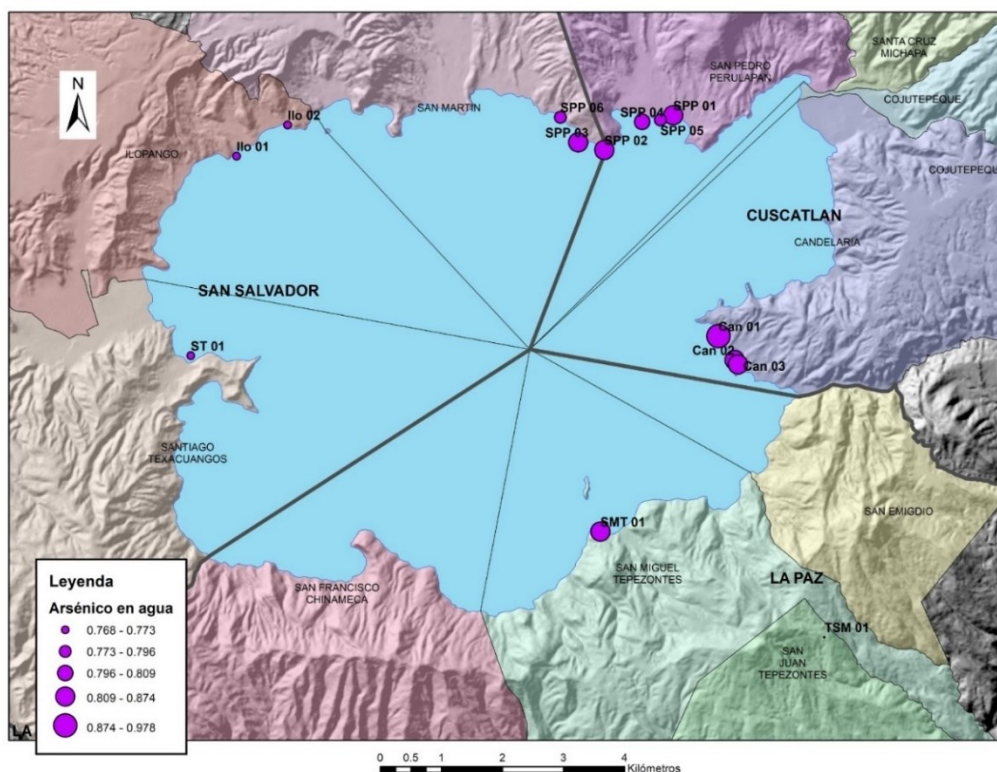


Figura 15. Distribución espacial de concentraciones de arsénico en muestras de agua del lago de Ilopango, tomadas en abril 2022.

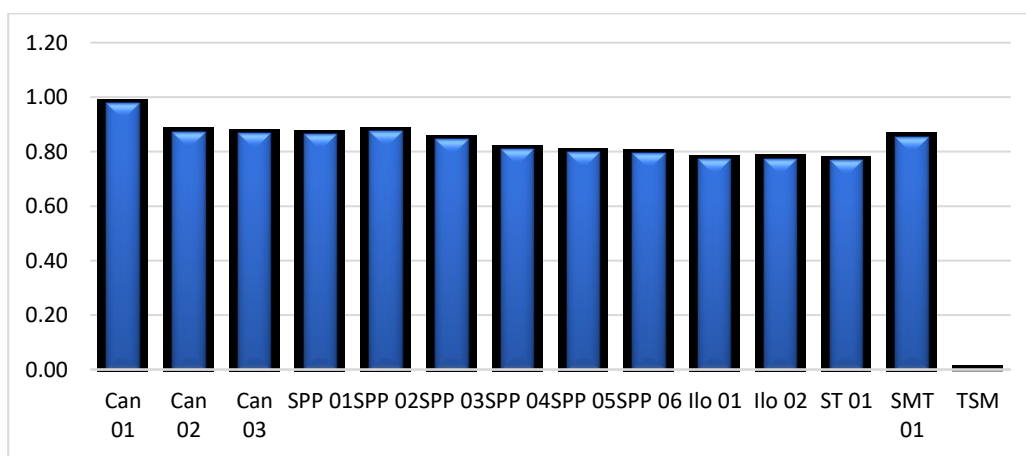


Figura 16. Variación de concentraciones de arsénico en agua del lago de Ilopango, diferenciado por sitio de muestreo con mediciones en abril 2022.

Nota: la concentración de arsénico en la muestra de referencia (TSM) resultó No Detectable.

Adicionalmente, las concentraciones de arsénico en agua superan, en todos los casos, el valor guía con respecto a la aptitud de uso para especies de consumo de producción animal (Figura 17), el cual es $<0.2 \text{ mg/L}$, según las guías de calidad de agua debido a la presencia de valores por encima de las guías de calidad de agua para arsénico, boro, mercurio y conductividad eléctrica (MARN, 2022), considerando que el promedio de todos los sitios muestreados resulto igual a 0.823 mg/L .

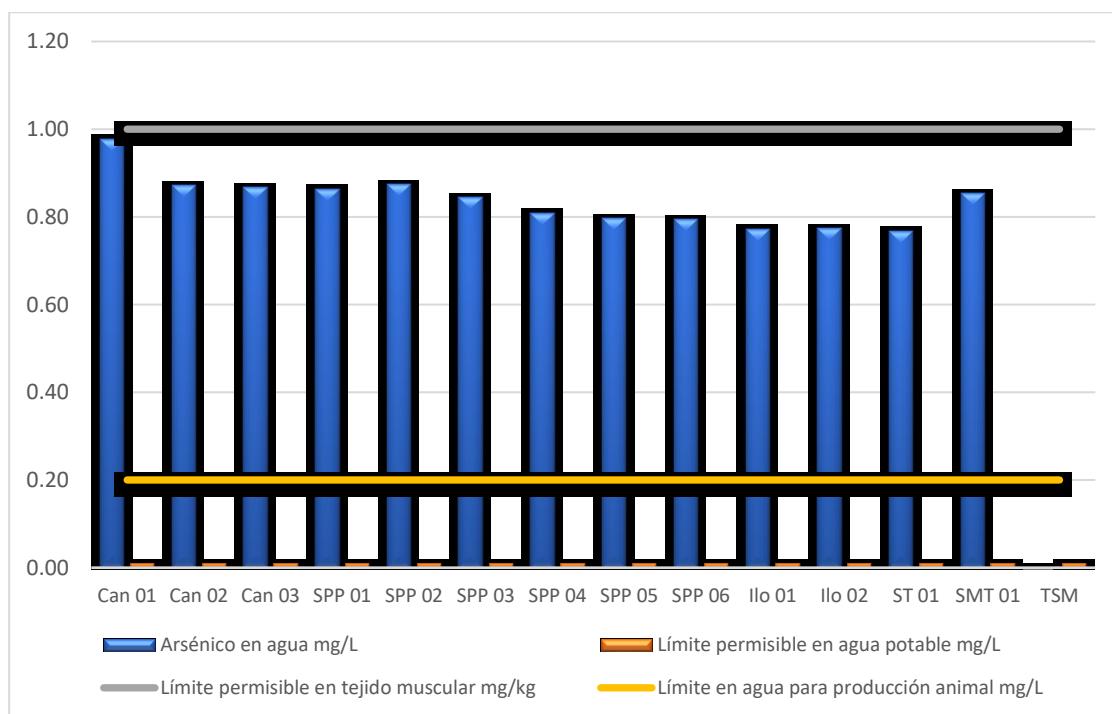


Figura 17. Concentraciones de arsénico en muestras de agua del lago de Ilopango en tejido muscular de tilapia¹, mostrando límites máximos de arsénico para agua de consumo y pescado.

¹ En el 100% de las muestras obtenidas durante la investigación el arsénico resultó No Detectable (ND)

6.2.2 Arsénico en el músculo de tilapia

Las concentraciones de arsénico determinadas en las muestras de músculo de tilapia no sobrepasan los valores límites establecidos en normas internacionales de Perú y la Unión Europea para pescado fresco que establece el límite de 1.0 mg/kg. Los datos obtenidos se encuentran por debajo de los límites de detección pueden obedecer a su condición inorgánica relacionada a su origen geogénico, propio de ambientes cratéricos (Delgado, *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos pueden explicarse a partir del estudio realizado por Pei, *et al.*, (2019), quienes expusieron peces de tilapia a un régimen alimenticio alto en arsénico inorgánico (806.5 and 772.1 $\mu\text{g/g}$ de peso seco) durante períodos de tiempo consecutivos variando entre 2 y 32 días.

Pese a la alta exposición, su experimento indicó que los peces excretaron el arsénico en forma inorgánica hasta en un 85%, mientras que la bioacumulación de arsénico es explicada por los autores por ocurrir en el orden intestino>hígado>branquias>músculo, debido al comportamiento del arsénico en la tilapia.

Por consiguiente, es posible considerar que el arsénico presente en el músculo de la tilapia muestreada en esta investigación, pese a un período más prolongado de vida de los peces (90 días) comparado al experimento de Pei, *et al.*, (2019) de 32 días, no logra una bioacumulación a concentraciones detectables en el músculo, mostrando menores valores que los reflejados por una dieta alta en arsénico inorgánico. El tamaño o peso de la tilapia es un elemento importante a tener en cuenta para la bioacumulación, partiendo de estudios como el de Uceda (2015), que evidencian la presencia de arsénico en el filete, cuando presentan un peso superior a dos libras.

Para el caso del lago de Ilopango el origen inorgánico del arsénico favorece las bajas tasas de bioacumulación en músculo (Kar, *et al.*, 2011; Pei, *et al.*, 2019), volviéndolo más seguro para los consumidores en cuanto a los bajos contenidos de arsénico establecidos en las normativas internacionales mencionadas antes.

6.2.3 Arsénico en alimento de tilapias

Los resultados de arsénico en alimento para tilapia en las dos muestras de concentrado evaluado, indicaron que, la concentración de arsénico no fue detectada, descartando la ingesta de arsénico de los peces evaluados por fuentes distintas al agua del lago. Estos resultados difieren con los estudios de Naranjo y Ching (2023), quienes desarrollaron una evaluación de arsénico, cadmio, mercurio y plomo en alimentos importados para mascotas en Costa Rica, encontrando arsénico en cuatro muestras de concentrado para peces ornamentales en concentraciones de 0.012, 0.059, 0.036 y 0.023 mg/kg.

Asimismo Rivas (2018), determinó la presencia de arsénico en cuatro muestras de pienso para alimentación de truchas (*Oncorhynchus mykiss*) en el distrito de Panchagara, provincia de Oyón, región Lima, Perú.

No obstante otros autores documentan que el nivel máximo permitido en piensos para peces es de 4 ppm, sin embargo, el arsénico es bioacumulable (Pei, *et al.*, 2019) y puede alcanzar niveles de toxicidad crónica y causar la muerte del animal tal y como lo demostraron. En animales de vida productiva corta (aves y cerdos) son menos susceptibles de desarrollar signos de toxicidad por arsenicosis, pese a ser capaces de bioacumular este metal (López y Guinovart, 2005).

6.3 Determinaciones de arsénico por distintos métodos analíticos

De acuerdo con el análisis realizado el laboratorio de Centro de Control de Calidad (CCCI), las concentraciones en agua y tejido muscular resultaron menores al límite de detección, a la baja sensibilidad del método de absorción atómica con llama, esto obedece a que las concentraciones deben estar en el orden de ppm para poder detectarlo.

En espectrometría de absorción atómica con horno de grafito o por plasma acoplado inductivamente las técnicas son más sensibles. Por lo tanto, para el método de horno de grafito, el límite de detección por lo menos tendría que presentar valores arriba de 0.002 mg/L o ppm, tal y como resultó en las muestras de agua.

Al contrario, en las muestras de músculo de tilapia, las concentraciones son tan bajas que ni el método de horno de grafito ni el de absorción atómica con llama lograron detectar los niveles de arsénico en las muestras. En este caso, el método de absorción atómica con horno de grafito podría considerarse confiable debido a su alta sensibilidad (EPA, b, 1994) para el análisis dado que su límite de detección de 0.002 mg/kg es inferior al valor guía de 1 mg/kg, establecido en las normas peruanas y de la Unión Europea.

Asimismo, el método de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) tiene una sensibilidad de 0.000591 mg/kg, pudiendo establecerse como el método más confiable para las determinaciones en bajas concentraciones como en el caso de este estudio para músculo de tilapia, alimento y agua. Para este estudio se han adoptado las determinaciones realizadas con este método.

6.4 Socialización de los resultados con los productores de tilapia en el lago de Ilopango y recomendaciones para el cultivo y consumo de tilapia proveniente del lago

Para responder el objetivo tres que establecía “*desarrollar recomendaciones para el cultivo y consumo de tilapia proveniente del lago de Ilopango, en función de la concentración de arsénico*” se elaboró un documento de divulgación de los resultados anteriormente discutidos (anexo 3). El documento se ha enfocado en información colectada a partir de las consultas realizadas, así mismo las características del lago y los resultados obtenidos que indican altas concentraciones de arsénico en el lago, más no, en el tejido muscular de la tilapia.

En base a los resultados de este estudio es posible brindar las siguientes recomendaciones sobre el cultivo y consumo de tilapia producida en el lago, en lo referente a su contenido de arsénico:

1. El análisis de concentraciones de arsénico en el alimento para tilapia indicó que en las muestras analizadas no se detectó arsénico, indicando los peces no ingirieron arsénico por ese medio, no obstante, una revisión periódica de este alimento es recomendable para asegurar la calidad reflejada en este estudio.

2. Los resultados indican que el medio de cultivo (agua del lago Ilopango), fue seguro para consumo de las muestras de tejido muscular analizado en cuanto a sus concentraciones de arsénico, sin embargo, se recomienda realizar un estudio que incorpore todas las partes consumibles del pez y los contaminantes existentes en el medio de producción que pueden ser nocivos y puedan representar un riesgo para la salud de los consumidores.

7. CONCLUSIONES

- En general, las concentraciones de arsénico en el tejido muscular de tilapia resultaron no detectables, pese al límite de detección de 0.000591 mg/kg, de acuerdo a los análisis realizados en laboratorio en las 14 muestras de tejido muscular (100 % de las muestras) extraídas de cinco sitios de producción de tilapia, ubicados en el lago de Ilopango, lo cual permite rechazar la primera hipótesis que establecía concentraciones superiores a 1.0 mg/kg.
- La concentración de arsénico en las 13 muestras de agua (100 %) osciló entre 0.768 y 0.978 mg/L, con un valor medio de 0.826 mg/L. Estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos en otras investigaciones e indican que se debe desarrollar con precaución algunas actividades productivas y turísticas en el lago de Ilopango, las muestras de agua fueron tomadas en las mismas zonas de donde se extrajeron las muestras de tejido muscular de tilapia. Con estas concentraciones y las del músculo de tilapia, no es posible rechazar ni aceptar la segunda hipótesis, ya que las concentraciones en el músculo de tilapia fueron indetectables en todas las muestras, por consiguiente, no fue posible relacionar su comportamiento con las concentraciones de arsénico en agua.
- La concentración de arsénico en agua y músculo de tilapia de la muestra de referencia resultó en ambos casos indetectable. El agua de cultivo en este caso proviene de pozo, no obstante, las concentraciones en el músculo de tilapia fueron similares a las obtenidas en los peces cultivados en el lago, dejando evidenciado que, pese al medio de cultivo, para una vida media de tres meses, la bioacumulación de arsénico en estos peces no alcanza los límites de detección.

- Considerando que el alimento utilizado por los productores para la nutrición de las tilapias resultó para las dos muestras analizadas en concentraciones no detectables, es posible indicar que este tipo de alimento para el lote analizado no representó una fuente de ingesta de arsénico a los peces, lo cual fue consistente con las concentraciones no detectables en músculo.

- Para las muestras de abril 2022 y considerando que el ciclo de vida de tilapia es en general es de 0 a 3 meses (hasta su comercialización para el consumo), los resultados indican que la elevada concentración de arsénico en agua del lago Ilopango (0.836 mg/L, en promedio), no afecta la calidad del músculo de tilapias producidas en jaulas flotantes en cuanto a su concentración de arsénico. No obstante, la existencia de otros metales pesados disueltos en el agua del lago no formó parte de los alcances de este estudio, por consiguiente, solo se puede afirmar que el consumo del músculo de tilapia cultivada en los cinco sitios de muestreo puede ser seguro en cuanto a su concentración de arsénico debido a sus concentraciones son inferiores del límite de detección.

- Las densidades de siembra de tilapia en la mayoría de los casos oscilan entre 42 y 92 alevines/m³, y las muertes de peces representan entre el 10% y 20% respectivamente en todo el ciclo de producción, por lo que, en la etapa final de desarrollo la densidad es de 74 tilapias/m³ cuando la siembra es de 93 tilapias/m³; y 42 tilapias/m³ cuando la siembra es de 5,000. Los entrevistados manifestaron que, debido a la densidad de siembra de las tilapias, estas se golpean entre ellas y esos daños mecánicos a veces generan enfermedades bacterianas, por lo tanto, se disminuye la calidad para su venta.

8. RECOMENDACIONES

- A partir de los resultados obtenidos al analizar la concentración de arsénico en el tejido muscular de tilapia, los resultados indicaron que el arsénico no es detectable en el tejido muscular de tilapia en las 14 muestras analizadas en cinco zonas muestreadas de igual número de distritos, por lo que, se recomienda realizar estudios más prolongados en el tiempo y profundizar sobre el conocimiento de otros metales pesados, además de considerar tanto la época seca como la lluviosa en los análisis.
- Considerando que en el lago de Ilopango existe una cultura de consumo de peces en libre desarrollo como el ejote (*Melaniris guatemalensis*), cuatro ojos (*Anableps dowei*), guapote tigre (*Parachromis motaguensis*), entre otros, algunos de los cuales se consumen completamente, se recomienda desarrollar investigaciones de bioacumulación de arsénico y otros metales en peces que se reproducen libremente y de forma sistemática en todo el lago, con el propósito de evaluar, si bajo condiciones menos controladas el producto que se consume, en cuanto a su comportamiento biológico, alimentación, edad y cuidados, presenta metales pesados.
- Para la determinación de concentraciones de arsénico en agua, solicitados a laboratorios analíticos se recomienda evitar el análisis mediante el método de Espectrofotometría de absorción atómica método de llama, debido a su baja sensibilidad, ya que los resultados podrían ocultar concentraciones que podrían ser nocivas para la salud en caso de análisis de agua para consumo. En su lugar se recomienda el método 200.7: Determinación de metales y elementos de trazas en agua y desechos mediante espectrometría de emisión atómica plasmáticos acoplada inductivamente.
- Los resultados de esta investigación brindan importantes aportes sobre la bioacumulación de arsénico en el músculo de tilapia para peces cultivados en jaulas con hasta tres meses de edad. Para ese estadio, los datos indican que cuando el agua

de cultivo posee concentraciones medias de arsénico inorgánico de 0.836 mg/L, estos peces no presentan biocumulación de arsénico en el músculo en valores detectables de hasta 0.000591 mg/kg, volviéndose un medio potencialmente seguro en para la producción de estos peces. Por consiguiente, se debe continuar investigando si el comportamiento es similar en otras partes comestibles del pez a fin de que se pueda adoptar valores normativos de concentración de arsénico en agua para cultivo de tilapia en jaula u otros medios.

- El presente estudio puede ser utilizado para evaluar la bioacumulación de metales pesados en peces producidos en distintos medios acuáticos y puede ayudar a establecer límites máximos de concentraciones de arsénico en agua para normativas nacionales en las que se desee regular la producción de tilapia en jaulas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Appelo, C. y Postma, D. (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Geological Magazine , Volume 132 , Issue 1 , January 1995 , pp. 124 – 125.
- ATSDR. (2007). Perfil toxicológico para Arsénico. Departamento de salud y servicios humanos de EE.UU. DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS HUMANOS DE EE.UU. UU. Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades.
- ATSDR. (2009). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) Estudios de Caso en Medicina Ambiental (CSEM) La toxicidad del arsénico.
- Bibha, K.; Kumar, S. A.; Jaw, A.; A.K.; G. y Hanping, W. (2017). Toxicología del arsénico en peces y sistemas acuáticos. Cartas de química ambiental. 43-64.
- Boyd, C. (16 de Octubre de 2017). Principios y medición de un importante parámetro de producción. School of Fisheries, Aquaculture and Aquatic Sciences. Auburn University Auburn, Alabama. Obtenido de Global Seafood Alliance: <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>
- Bundschuh, J.; Pérez, C. y Litter, M. (2017). Distribución del arsénico en las región sudamericana. CYTED, 10-11.
- Cheng, L.; Abraham, J.; Hausfather, Z. y Trenberth, K. E. (2019). How fast are the oceans warming? Science, 363(6423), 128-129. <https://doi.org/10.1126/science.aav7619>
- Delgado, V.; Altamirano, M. y Bundschuh, J. (2020). Arsénico en geoambientes de Nicaragua: exposición, efectos en la salud, mitigación y necesidades futuras. Ciencia del medio ambiente total, 710 -13, 65, 27.
- Díaz, A. A. (2019). Metales pesados. Contenidos maximos en metales pesados en productos alimenticios. Union Europea. Secretaría de Estado de Comercio revisión febrero 2019. Valencia. Valencia.

- EPA. (2010). California Environmental Protection Agency. Conductividad Eléctrica / Salinidad. s.l. : Folleto Informativo 3.1.3.0; Folleto Informativo 3.1.4.0, Ph; y Folleto informativo 3.1.1.0 Oxígeno Disuelto. Obtenidos de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/p. Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/
- EPA, a. (1994). Method 200.7, Revision 4.4: Determinación of Metals and Trace Elements in Water and Wasted by Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry.
- EPA, b. (1994). Method 200.9, Revision 2.2: Determination of Trace Elements by Stabilized Temperature Graphite Furnace Atomic Absorption. Determination of trace elements by stabilized temperature. Estados Unidos de América.
- FAO. (2004). Visión general del sector acuícola nacional. El Salvador.
- González, M.; Acuña, J.; Escobar, J.; Viteri, F.; Villacis, L., Parra, Y.; . . . Araque, J. (2021). Calidad físico química del agua de la laguna volcánica cratérica Quilotoa, Cotopaxi, Ecuador. *Revista Respectiva* 21 (1), 2020: 71-83 - ISSN 1996-5257, 71-83.
- Gui, F.; Sun, H., Qu, X.; Niu, S.; Zhang, G. y Feng, D. (2023). Temperature and Dissolved Oxygen Lead to Behavior and Respiration Changes in Juvenile Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) during Transport. *Fishes*, 8(12), 565. <https://doi.org/10.3390/fishes8120565>
- Kar, S.; Maity, J. P.; Jean, J.-S.; Liu, C.-C.; Liu, C.-W.; Bundschuh, J. y Lu, H.-Y. (2011). Health risks for human intake of aquacultural fish: Arsenic bioaccumulation and contamination. *Journal of Environmental Science and Health., Part A* (11) 1266-1273.
- Katzung, B. (2001). *Farmacología básica*. Editorial Manual Moderno. Mexico.
- Kubitza, F. (23 de Enero de 2017). Responsible seafood. Obtenido de El parámetro de calidad del agua a menudo ignorado: pH. Es importante mantener niveles de acidez deseables en estanques acícolas.: <https://www.globalseafood.org/advocate/el-parametro-de-calidad-del-agua-a-menudo-ignorado-ph/>

- Lillo, J. (2005). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas.
- López, D. R. (2009). Volcanic arsenic and boron pollution of Ilopango Lake, El Salvador. En J. Bundschuh, M. Armienta, P. Birkle, P. Bhattacharya, J. Matschullat, y A. Mukherj. En Natural Arsenic in Groundwaters of Latin América, CRC. Press. Londres.
- López, S. y Guinovart, J. M. (12 de mayo de 2005). Sustancias indeseables en el pienso: arsénico. Obtenido de Nutrición. Artículos sobre porcicultura y todo lo relacionado con la cría, engorde, levante, comercialización de cerdos: https://www.3tres3.com/latam/articulos/sustancias-indeseables-en-el-pienso-arsenico_9843/
- MAG. (2023). Tilapia, una buena opción alimentaria. Disponible en: <https://www.mag.gob.sv/2023/07/02/tilapia-una-buena-opcion-alimentaria/>
- Makori, A. J. (2017). Effects of water physico-chemical parameters on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth in earthen ponds in Teso North Sub-County, Busia County. Fisheries and Aquatic Sciences, 2, 20 (1), 30.
- Mansilla, B. y Pamela, A. (2015). Determinación de metales pesados en agua, peces, almejas e hydrilla verticillata del lago de Izabal. Guatemala.
- MARN. (2020). Estudios batimétricos en lagos y lagunas de El Salvador. Informe de batimetría del lago de Ilopango. San Salvador.
- MARN. (2022). Calidad de Agua del Lago de Ilopango. Aptitud de uso para especies de consumo de producción animal. San Salvador.
- MARN. (2023). Calidad de Agua para actividades recreativas en el lago de Ilopango. San Salvador.

- McCall, R. B. (2001). *Fundamental Statistics for Behavioral Sciences*. Virginia: Wadsworth Publishing Company.
- Mena, Z. (2015). *Evaluación de la calidad del agua, lago de Ilopango*. San Salvador.
- Mena, Z. (2016). *Evaluación de la calidad del agua lago de Ilopango*. Dirección General del Observatorio Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador.p.11. San Salvador.
- Mínguez, I. P. (2015) *Ecotoxicología del arsénico en suelos de la comunidad de Madrid*. Facultad de Farmacia. Departamento de Edafología.
- Morales, G.; Lam, A.; Segura, M.; Cortez, L. y Sanchez, F. (2021). Respuesta inmunológica a la exposición al arsénico inorgánico. *Revista Científica. Dominio de las Ciencias*. ISSN: 2477-8818, 345-359.
- Moune, S.; Pierre, J.; G., Sigurdur, R. y Gislason, O. S. (2006). Desgasificación y enriquecimiento de oligoelementos en la columna eruptiva de la erupción del año 2000 del volcán Hekla, Islandia. *Geochimica y Cosmochimica Acta*, Volumen 70, Número 2.
- Museses, J. y Ospitia, R. A. (Noviembre de 2010). Evaluación de la eficiencia en tres densidades de siembra de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) en jaulas flotantes durante la etapa inicial en el embalse de la Salvajina, departamento del Cauca. Evaluación de la eficiencia en tres densidades de siembra de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) en jaulas flotantes durante la etapa inicial en el embalse de la Salvajina, departamento del Cauca. Popayán, Colombia.
- Muguirra, A. y Ortega, C. (06 de abril de 2024). Obtenido de Tipos de muestreo probabilístico. Muestreo aleatorio simple: <https://www.questionpro.com/blog/es/tipos-de-muestreo-para-investigaciones-sociales/>
- Murray, J.; Guzmán, S.; Tapia, J. y Nordstrom, D. K. (2023). Rocas volcánicas silíceas, principal fuente regional de arsénico geogénico en aguas: perspectivas desde el

altiplano-punal, Andes centrales. Geología química. Volumen 629, 5 de julio de 2023, 121473.

Naranjo, C. y Ching, R. (2023). Arsénico, cadmio, mercurio y plomo en alimentos importados para mascotas en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, volumen 34., Páginas 5 y 6.

Oliveria, B.; Prieto, G. y Galán, C. (2004). Bioacumulación y daños genotóxicos en Pez Cebra (Danio rerio). *AquaTIC*, 9.

OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición que incorpora la primera adenda, página 373. Ginebra.

OMS. (7 de Diciembre de 2022). Fuentes de exposición al arsénico. Guías de calidad de agua para consumo humano.

Oremland, R. S. y Stolz, J. F. (2005). Arsenic, microbes and contaminated aquifers. *Trends and microbiology*, 45-49.

Ortiz, A. y Colón, J. (2017). Estudio de metales pesados en el lago de Ilopango. *Ciencia, Cultura y Sociedad*, 11 y 13.

Ortiz, D. y Falero, S. (2015). Niveles de mercurio, cadmio, plomo y arsénico en peces del río Tumbes y riesgos para salud humana por su consumo.

Palacios, F. (agosto de 2021). Conocimiento inicial sobre los productores de tilapia. (S. Muñoz, Entrevistador).

Palomino, A. y Baltazar, P. (2004). Manual de cultivo de tilapia. Programa de transferencia de tecnología en acuicultura para pescadores artesanales y comunidades campesinas. Perú.

- Pedrazzi, D.; Sunye, P.; G., A.; Costa, A.; Smith, C.; Poret, M.; . . . y Gutiérrez, E. (2019). The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377, 81-102.
- Pei, J.; Zuo, J.; Wang, X.; Yin, J.; Liu, L. y Fan, A. W. (16 de Marzo de 2019). The Bioaccumulation and Tissue Distribution of Arsenic Species in Tilapia. Obtenido de *Int J Environ Res Public Health*: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6427281/>
- Penrose, W. R. y Woolson, E. A. (1974). Arsenic in the marine and aquatic environments: Analysis, occurrence, and significance. *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, Penrose, W. R., y Woolson, E. A. (1974). Arsenic in the marine and aquatic environments: Analysis, occurrence, and significance. C 465-482. <https://doi.org/10.1080/10643387409381621>.
- Peña, C. F. (2019). Algunas consideraciones sobre 30 años de registro de parámetros físicoquímicos. *Revista científica agua y conocimiento*, 44-64.
- Pizzali, M. M.; Robles, P.; Mendoza, M. y Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: El impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Perú. Med. Exp. Salud*, 99.
- Rangel, E.; Montañez, L.; Luevanos, M. y Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana Volumen 33. Número 2.*, 2.
- Resolución de Dirección Ejecutiva, No. 057-2016 (Organismo Nacional de Sanidad Pesquera, SANIPES. 23 de junio de 2016).
- Rivas, W. (2018). "Determinación de arsénico, mercurio y plomo en truchas (*Oncorhynchus mykiss*) piensos y agua de piscigranjas del distrito de Pachangara, provincia de Oyón, región Lima". Lima, Perú.

- Rivera, F. (2016). Salinidad y aguas subterráneas, disponible, Hidrogeología emergente. FCIHS 2016. ISBN 978-84-921469-2-. https://www.researchgate.net/publication/308327108_SALINIDAD_Y_AGUAS_SUBTERRANEAS. Obtenido de file:///C:/Users/smuno/Desktop/Downloads/TEMA-06_RIBERA.pdf
- Rodriguez, M.; Hernández, I. y Rivas, R. (2012). Evaluación de los límites de tolerancia a la salinidad en alevines de uno y 30 días de edad de tilapia roja *Oreochromis sp* y del Nilo O. niloticus. Zamorano, Honduras.
- RTS, O. S. (2018). Agua. Agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad. Reglamento Técnico Salvadoreño. RTS 13.02.01:14. San Salvador, El Salvador.
- Saavedra, M. A. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. Managua.
- Sáens, P. B. (2009). Procedimiento de muestreo de agua superficial. Laboratorio de calidad ambiental facultad de ciencias del ambiente de la Universidad Nacional.
- Saxby, J. G.; Gottsmann, J.; Cashman, K. y Gutiérrez, E. (2016). Almacenamiento de magma en una caldera de desgarre. *Nature Communications*, 7(1), 12295.
- Sayler, P. y Martin, J. M. (1990) Distribución de arsenito y arsénico total disuelto en los principales estuarios franceses: dependencia de los procesos biogeoquímicos y de los aportes antropogénicos. *Química marina*. Volumen 29 ,1990, páginas 277-294.
- Tomaila, J.; Iannacone, J. (2018). Toxicidad letal y subletal del arsénico, cadmio, mercurio y plomo sobre el pez *Parachaeiiron innesi* neon tetra (*Characidae*). *Revista de Toxicología* ISSN: 0212-7113 ISSN: 1697-0748 revista@aetox.es
- Tsang, S. H. y Quintanilla, M. (2008). Manual sobre Reproducción y cultivo de tilapia. Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de El Salvador. p.4. La Libertad.

- Uceda, K. E. (2015). Determinación de la presencia o ausencia de metales pesados (plomo, cadmio, mercurio y arsénico) en la producción de tilapias (*Oreochromis niloticus*) en época de verano en las jaulas flotantes del lago de Ilopango, Municipio de San Pedro Perulapan, Cantón San Agustín, departamento de Cuscatlán. Universidad Salvadoreña “Alberto Masferrer”. San Salvador.
- Umaña, G. (1990). Limnología básica de la Laguna del Barva. *Revista Biologica tropical*, 432.
- Villalba, M. J. (06 de Julio de 2021). Las concentraciones de mercurio y arsénico en peces del embalse Río Tercero podrían afectar la salud de quienes los consumen. Obtenido de unciencia: <https://unciencia.unc.edu.ar/biologia/las-concentraciones-de-mercurio-y-arsenico-en-peces-del-embalse-rio-tercero-podrian-afectar-la-salud-de-quienes-los-consumen/>
- Yin, S.; Zhang, X.; Yin, H. y Zhang, X. (2022). Current knowledge on molecular mechanisms of microorganism-mediated bioremediation for arsenic contamination: a review. *Microbiological Research*, Volumen 258, 12, 69, 90. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.126990>
- Zia, U. M. y Yunus M. Md. (2022). Arsenic Speciation Techniques in Soil Water and Plant: An Overview. En M. Stoytcheva y R. Zlatev (Eds.), *Arsenic Monitoring, Removal and Remediation*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99273>

10. ANEXOS

Anexo 1. Consulta a productores para describir el manejo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), en el lago de Ilopango.

Preguntas para productores de tilapia (*Oreochromis niloticus*), en el lago de Ilopango

Objetivo: Conocer la dinámica de los sistemas de producción de tilapia en cinco distritos circundantes en el lago de Ilopango, durante el mes de abril 2022.

No.	Sitio identificado	Nombre del entrevistado	Coordenadas

1. ¿Cuáles son las dimensiones de las jaulas? M²

2. Cuál es el origen de los alevines?

3. ¿Cantidad de alevines sembrados por jaula?

4. ¿Número de muertes de tilapias?

5. ¿Tipo de alimentación, periodicidad de alimentación?

6. ¿Cuáles enfermedades identifica en las tilapias?

7. ¿Dónde se realiza la venta y distribución de la tilapia?

8. ¿Qué problemas de calidad de agua identifica (atol, azufrado, otros), de que tipo y en qué fecha?

9. ¿Cuál es el costo estimado de la inversión para una jaula?

10. ¿Reciben quejas de algún comprador debido a la calidad en el tiempo?

11. ¿Presentan enfermedades de la piel, los cuidadores de tilapia?

12. ¿Recibe asistencia técnica de CENDEPESCA u otra entidad?

Anexo 2. Resultados de las consultas realizadas a productores de tilapia en el lago de Ilopango

No.	Sitio identificado	Nombre del entrevistado	Coordenadas	1. ¿Cuáles son las dimensiones de las jaulas? M ²	2. Cuál es el origen de los alevines?	3. ¿Cantidad de alevines sembrados por jaula?
1	Can 01	Alexander Pérez	13 40 13.74 -89 00 30.28	36	Productor vecino	5000
2	Can 02	Geovany Pérez	13 40 01.01 -89 00 21.47	36	Productor vecino	5000
3	Can 03	José Francisco Cruz	13 39 58.7 -89 00 19.6	16	Acuarichar (productor vecino)	3,500
4	SPP 01	Angel Flamenco	13 42 11.3 -89 00 54.93	36	Propio (San Pedro Perulapan)	5000
5	SPP 02	Ludwin Valle	13 41 52.8 -89 01 32.5	36	Propio (San Pedro Perulapan)	5,000
6	SPP 03	Wilber Flamenco	13 41 56.89 -89 01 46.65	36	Propio (San Pedro Perulapan)	7,000
7	SPP 04	Moris Flamenco 7589 6928	13 42 07.77 -89 01 11.86	36	San Pedro Perulapán	5,000
8	SPP 05	Cintia Graciela Flamenco	13 42 08.76 -89 01 01.91	36	De la zona	10,000
9	SPP 06	Moris de Jesus Flamenco	13 42 10.23 -89 01 56.39	36	Producción propia de alevines	10,000
10	Ilo 01	Angel Portillo	13 41 49.5 -89 04 52.87	36	Palo Blanco	5000
11	Ilo 02	Francisco Javier	13 42 06.14 -89 04 25.01	36	San Fco. Chinameca	7000
12	ST 01	José David Martinez	13 40 03.26 -89 05 17.75	36	San Fco. Chinameca	5000
13	SMT 01	Salvador Barahona	13 38 29.70 -89 01 34.53	36	CENDEPESCA	4500
14	TSM 01	Martha Aguilar	13 37 33.5 -88 59 32.6	24	FUNDESOS. Nueva Concepción	200

No.	Sitio identificado	Nombre del entrevistado	Coordenadas	4. ¿Número de muertes de tilapias?.	5. ¿Tipo de alimentación, periodicidad de alimentación?	6. ¿Cuáles enfermedades identifica en las tilapias?
1	Can 01	Alexander Pérez	13 40 13.74 -89 00 30.28	500	Pesketa, Tecnotral	Golpe entre ellos generar enfermedades producto del asinamiento.
2	Can 02	Geovany Pérez	13 40 01.01 -89 00 21.47	200	Pesketa, Tecnotral	Golpe entre ellos generar enfermedades producto del asinamiento.
3	Can 03	José Francisco Cruz	13 39 58.7 -89 00 19.6	200	Técnotral	No identifica
4	SPP 01	Angel Flamenco	13 42 11.3 -89 00 54.93	500	Pesketa, Tecnotral	Golpe entre ellos generar enfermedades producto del asinamiento.
5	SPP 02	Ludwin Valle	13 41 52.8 -89 01 32.5	200-300	Técnotral	Golpe entre ellos generar enfermedades producto del asinamiento. Caída de escamas.
6	SPP 03	Wilber Flamenco	13 41 56.89 -89 01 46.65	3500	Pesketa, Tecnotral, Areca	Ojos Saltones, Granitos con pus en la cola. Se sospecha que es por asinamiento.
7	SPP 04	Moris Flamenco 7589 6928	13 42 07.77 -89 01 11.86	700	Pesketa, Tecnotral	Estreptococo
8	SPP 05	Cintia Graciela Flamenco	13 42 08.76 -89 01 01.91	2000	Pequeta, Areca	Por lo saturado se golpeaban, por lo helado.
9	SPP 06	Moris de Jesus Flamenco	13 42 10.23 -89 01 56.39	2000	Areca	Perdida de escamas por asinamiento, hongos
10	Ilo 01	Angel Portillo	13 41 49.5 -89 04 52.87	500	Pesketa, Tecnotral	Enfermedades bacterianas.
11	Ilo 02	Francisco Javier	13 42 06.14 -89 04 25.01	1500	Peketa, Tecnotral	Ojudos
12	ST 01	José David Martinez	13 40 03.26 -89 05 17.75	500	Pesketa y Tecnotral	Estreptococos, ojos hinchados, se le caen las escamas.
13	SMT 01	Salvador Barahona	13 38 29.70 -89 01 34.53	500	Pesketa	Perdida de ojos por acinamiento, parches blancos en el musculo
14	TSM 01	Martha Aguilar	13 37 33.5 -88 59 32.6	0	Tecnotral	No se identifican

No.	Sitio identificado	Nombre del entrevistado	Coordenadas	7. ¿Dónde se realiza la venta y distribución de la tilapia?	8. ¿Problemas de calidad de agua identificados (atol, azufrado), de que tipo y en qué fecha?	9. ¿Cuál es el costo estimado de la inversión para una jaula?
1	Can 01	Alexander Pérez	13 40 13.74 -89 00 30.28	Municipios aledaños	Mala calidad de agua de ríos aledaños.	\$ 2,000.00
2	Can 02	Geovany Pérez	13 40 01.01 -89 00 21.47	Municipios aledaños	Mala calidad de agua de ríos aledaños.	\$ 2,000.00
3	Can 03	José Francisco Cruz	13 39 58.7 -89 00 19.6	Cojutepeque y restaurantes del lugar	Si, azufre en época de vientos y lluvias	\$ 1,500.00
4	SPP 01	Angel Flamenco	13 42 11.3 -89 00 54.93	Venta local y municipios aledaños	Mala calidad de agua de ríos aledaños.	\$ 2,000.00
5	SPP 02	Ludwin Valle	13 41 52.8 -89 01 32.5	Venta local	Si, solo cuando hay viento, hay problemas con el azufre.	\$ 2,000.00
6	SPP 03	Wilber Flamenco	13 41 56.89 -89 01 46.65	Venta local, San Salvador, Cojutepeque, San Martin, Mexico, Guatemala, Selectos.	Arraste de sedimentos en época lluviosa.	No tiene idea
7	SPP 04	Moris Flamenco 7589 6928	13 42 07.77 -89 01 11.86	Venta local	Durante la época lluviosa principalmente, problemas por azufre, muerte de peces.	No tiene idea
8	SPP 05	Cintia Graciela Flamenco	13 42 08.76 -89 01 01.91	Venta local y mercados de municipios aledaños	Azufre cuando hay vientos	Datos aislados
9	SPP 06	Moris de Jesus Flamenco	13 42 10.23 -89 01 56.39	Venta local y México	Azufre cuando hay vientos	Datos aislados
10	Ilo 01	Angel Portillo	13 41 49.5 -89 04 52.87	Turistas, restaurantes locales y fuerza armada.	Enfermedades bacterianas provocan granos.	\$ 1,800.00
11	Ilo 02	Francisco Javier	13 42 06.14 -89 04 25.01	Soyapango, San Martin, Cojutepeque	Azufrado	\$ 4,000.00
12	ST 01	José David Martinez	13 40 03.26 -89 05 17.75	Local y ST	Achaco y azufre en épocas de mayores vientos, contaminación del río cuaya.	\$ 2,500.00
13	SMT 01	Salvador Barahona	13 38 29.70 -89 01 34.53	Municipios Aledaños, San Salvador 200libras.	Azufre negro, azufre azul y contaminación que baja de los ríos.	\$ 2,000.00
14	TSM 01	Martha Aguilar	13 37 33.5 -88 59 32.6	Consumo familiar y venta a vecinos	Falta de oxigenación	No lo recuerda, beneficiaria de un proyecto

No.	Sitio identificado	Nombre del entrevistado	Coordenadas	10. ¿Reciben quejas de algún comprador debido a la calidad en el tiempo?	11. ¿Los cuidadores presentan enfermedades de la piel?	12. ¿Recibe asistencia técnica de CENDEPESCA u otra entidad?.
1	Can 01	Alexander Pérez	13 40 13.74 -89 00 30.28	No	No	CENDEPESCA
2	Can 02	Geovany Pérez	13 40 01.01 -89 00 21.47	No	No	CENDEPESCA
3	Can 03	José Francisco Cruz	13 39 58.7 -89 00 19.6	No	No	CENDEPESCA
4	SPP 01	Angel Flamenco	13 42 11.3 -89 00 54.93	No	No	CENDEPESCA
5	SPP 02	Ludwin Valle	13 41 52.8 -89 01 32.5	No	Si, hongos en los pies, (chancomido)	No
6	SPP 03	Wilber Flamenco	13 41 56.89 -89 01 46.65	No	Hongos en los dedos de los	No
7	SPP 04	Moris Flamenco 7589 6928	13 42 07.77 -89 01 11.86	No	Hongos en los dedos de los pies,	CENDEPESCA
8	SPP 05	Cintia Graciela Flamenco	13 42 08.76 -89 01 01.91	No	No	CENDEPESCA
9	SPP 06	Moris de Jesus Flamenco	13 42 10.23 -89 01 56.39	No	Ardor en la vista	CENDEPESCA
10	Ilo 01	Angel Portillo	13 41 49.5 -89 04 52.87	No	Hongos	CENDEPESCA
11	Ilo 02	Francisco Javier	13 42 06.14 -89 04 25.01	No	Hongos	CENDEPESCA
12	ST 01	José David Martinez	13 40 03.26 -89 05 17.75	No	Hongos en los pies y la piel de los cuidadores.	CENDEPESCA y MAG
13	SMT 01	Salvador Barahona	13 38 29.70 -89 01 34.53	No	Hongos en los pies de los cuidadores.	No
14	TSM 01	Martha Aguilar	13 37 33.5 -88 59 32.6	No	No identifican	ONG. FUNDESO

Anexo 3. Brochure de entrega de resultados a los productores de tilapia.

Ciclo de vida de la Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

El ciclo de vida de la Tilapia (figura 5) está compuesto por cinco periodos: oval, larval, alevín, juvenil y adulto. Su importancia radica en el elevado auge económico que ha cobrado debido a la alta demanda en el mercado por ser un alimento con altos signos de proteína.



Figura 5 Ciclo de vida de la Tilapia.

Los datos recabados en la encuesta relacionados con la producción de Tilapia en el lago, específicamente en los sitios de muestreo indicando lo siguiente:

- ◆ 76% de las jaulas miden 36 metros cuadrados.
- ◆ En el 50% de las Jaulas se siembran 5,000 alevines y en el 29% entre 7,000 y 10,000 Alevines.
- ◆ Poco más del 50% de los alevines sembrados provienen de los mismos sitios de producción.
- ◆ En el 71% de los sitios muestreados los productores manifestaron que en los primeros meses del año existe una mayor presencia de azufre que sale a la superficie y este fenómeno limita el oxígeno en las jaulas.
- ◆ 79% de los productores encuestados reciben asistencia técnica de CENDESCA.

Actividades desarrolladas en el lago de Ilopango:

- Abastecimiento para las poblaciones.
- Producción piscícola en jaulas flotantes.
- Actividades de recreación (contacto directo, belleza paisajística).
- Pesca artesanal.
- Comercio local.

Parámetros de campo en agua:

Los resultados de las mediciones de campo en agua indican para el caso de la temperatura del agua esta oscila entre 26.1 y 29.1 °C (figura 4); el oxígeno disuelto osciló entre 53% en los sitios de muestreo de Candelaria y 79% en los sitios de San Pedro Perulapán; la salinidad en los sitios de muestreo es poco fluctuante ya que osciló entre 885 y 918 ppm; la conductividad eléctrica en los sitios de muestreo resultó poco variable entre 1761 y 1842; y el potencial de Hidrogeno o pH también resulto con valores similares en los sitios de muestreo pues osciló entre 7.47 y 7.73.

Parámetros de campo en los sitios de muestreo

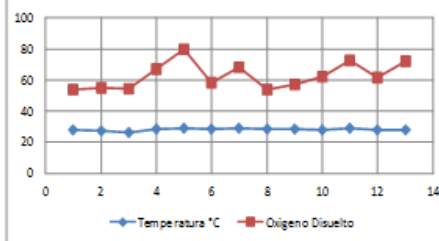


Figura 4 Resultados de parámetros de campo Oxígeno disuelto y Temperatura.



Universidad de El Salvador

Determinación de la concentración de arsénico en cultivos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en el lago de Ilopango.



Objetivo:

Conocer si las especies de tilapia cultivadas dentro del lago de Ilopango poseen algún contenido de arsénico en el tejido muscular, puesto que se ha reconocido en otras investigaciones y se confirma en esta que el lago tiene altas concentraciones de este metal (figura 1) y que probablemente su origen sea natural por ser un lago de origen volcánico.

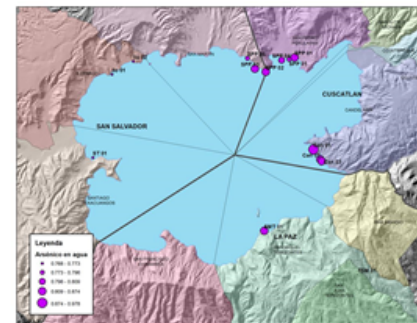


Figura 1: Concentraciones de arsénico en agua en los sitios muestreados

Lago de Ilopango

El lago de Ilopango es el lago natural más grande del país y su origen es de tipo volcánico, se encuentra situado a 16 km de la ciudad San Salvador entre los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Paz; cuenta con una altitud de 440 msnm, 72 km² de espejo de agua y una profundidad de 230 metros de acuerdo al último estudio batimétrico realizado por MARN en el año 2020, como se observa en la figura 2. La cuenca alta de dicho cuerpo de agua tiene participación de catorce municipios y se estima que alberga a una población de más de 600 mil habitantes. El agua del lago es utilizada para diferentes actividades como abastecimiento humano, riego, recreación, pesca libre y actividades productivas como el cultivo de peces en jaulas.

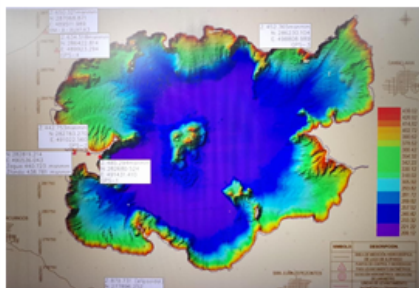


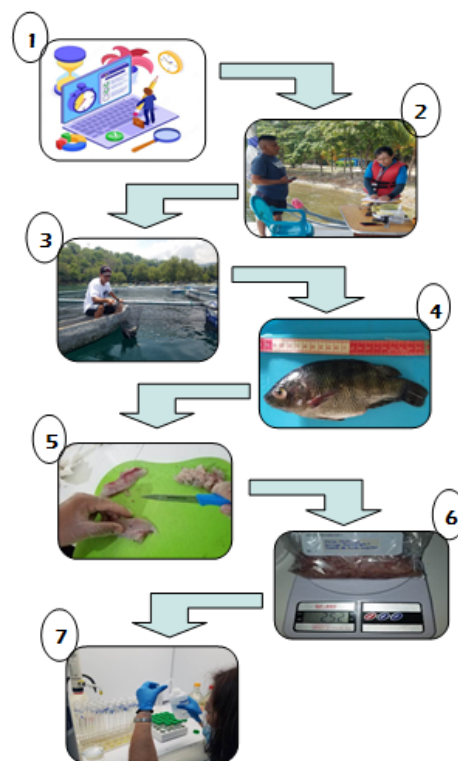
Figura 2. Batimetría del Lago de Ilopango.

Índice de eutrofización

Estudios realizados por el MARN sobre el Índice de Eutrofización (IE) e Índice Estado Trófico (IET) manifiestan que el lago de Ilopango se clasifica como: Eutrófico (IE) y Mesotrófico a Hipertrofico (IET), concluyendo en que existe la probabilidad que esto se deba a la alta producción de peces a la orilla del lago.

Procedimiento metodológico desarrollado durante la investigación:

1. Selección de sitios para la investigación.
2. Entrevista con propietarios proveedores de Tilapia para la investigación.
3. Muestreo (adquisición con los propietarios).
4. Pesado y medido de las tilapias.
5. Disección del tejido muscular.
6. Pesado de la muestra para llevar al laboratorio.
7. Análisis del tejido muscular de Tilapia en laboratorio.



Resultados

El Arsénico en el tejido muscular de tilapia resultó No Detectable (ND), de acuerdo a los análisis realizados en laboratorio en las 14 muestras de tejido muscular (100% de las muestras) extraídas de cinco sitios de producción de tilapia, ubicados en el lago de Ilopango, analizando dos muestras en dos laboratorios diferentes.

La concentración de Arsénico en el agua, en el 100% de las muestras equivalente a 14 oscilan entre 0.768 y 0.978 mg/l (figura 3). Estos resultados confirman los resultados obtenidos en otras investigaciones e indican que se debe desarrollar con precaución algunas actividades productivas y turísticas en el lago de Ilopango, las muestras de agua fueron tomadas en las mismas zonas de donde se extrajeron las muestras de tejido muscular de tilapia.

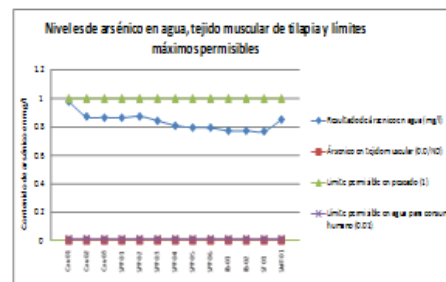


Figura 3: Resultados de arsénico.

Durante la investigación se realizó un solo muestreo a finales de la época seca (abril) en 14 muestras extraídas de las zonas de producción de los municipios de Ilopango, San Pedro Perulapán, Candelaria, San Miguel Tepezontes y Santiago Texacuangos.