



## Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA – UNIDAD IZTAPALAPA

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

Posgrado: Maestría en Biología

Título de la tesis:

**“Determinación de Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAPs) en sedimentos y músculo de *Mugil curema* utilizando cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC) acoplada a un detector de Fluorescencia.”**

Tesis para obtener el grado de: Maestra en Biología

Diana Yessica Montero Delgadillo

Matrícula: 2153805300

Correo de contacto:

[conceptomontcast@gmail.com](mailto:conceptomontcast@gmail.com)

Codirectores:

Dra. Ana Laura Ibáñez Aguirre

Dr. Eduardo González Zamora

Asesor:

Dr. Alejandro Islas Jácome

Nombres del jurado:

Presidente: Dr. Alejandro Islas Jácome

Secretaria: Dra. Alma Socorro Sobrino Figueroa

Vocal: M. en B.E Sergio Humberto Álvarez Hernández

Vocal: Dr. Leobardo Manuel Gómez Olivan

Fecha del examen de grado

Iztapalapa, Ciudad de México, 15 de febrero de 2022



# Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

*Iztapalapa*

**Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPS) en sedimento y músculo de *Mugil curema* utilizando cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC) acoplada a un detector de Fluorescencia**

TESIS

Que para obtener el grado de  
Maestra en Biología

PRESENTA

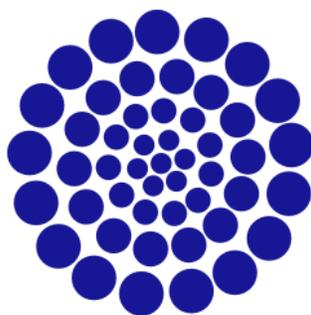
**Hidrobiól. Diana Yessica Montero Delgadillo**

Codirectores:

Dra. Ana Laura Ibáñez Aguirre  
Dr. Eduardo González Zamora

Asesor:  
Dr. Alejandro Islas Jácome

Iztapalapa, Ciudad de México, 15 de febrero de 2022



**CONACYT**

*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*

La Maestría en Biología de la  
Universidad Autónoma Metropolitana  
pertenece al Padrón de  
Posgrados de Calidad del CONACyT

## Declaración de originalidad

El (La) que suscribe Diana Yessica Montero Delgadillo alumno (a) del posgrado \_Maestría en Biología, de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y autor(a) de la tesis o idónea comunicación de resultados titulada: “Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPS) en sedimento y músculo de Mugil curema utilizando cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC) acoplada a un detector de Fluorescencia”,

Declaro que:

1. La tesis o idónea comunicación de resultados que presento ante el H Jurado para lo obtención del grado de Maestra en Biología es de mi autoría y original creación, producto del resultado de mi trabajo de investigación personal e individual; el cual cuenta con las correspondientes citas textuales del material bibliográfico utilizado y con el debido otorgamiento de los créditos autorales.
2. En la tesis o idónea comunicación de resultados no he reproducido párrafos completos; ilustraciones, fotografías, diagramas, cuadros y tablas, sin otorgamiento del crédito autoral y fuente correspondiente.
3. En consecuencia, relevo de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma Metropolitana de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la tesis o idónea comunicación de resultados, respondiendo por la autoría y originalidad de la misma, asumiendo todas las consecuencias económicas y jurídicas si ésta no fuese de mi creación.

La presente declaración de originalidad se firma en la Ciudad de México el 15 de febrero del 2022.

Atentamente



DIANA YESSICA MONTERO DELGADILLO

*Este documento debe ser firmado con tinta azul y debe anexarse copia en la tesis o idónea comunicación de resultados (tesina, reporte, etc.), el documento original será conservado por el Coordinador del Posgrado.*

El jurado designado por la  
División de Ciencias Biológicas y de la Salud  
de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis que presentó

DIANA YESSICA MONTERO DELGADILLO

El día 15 de febrero del año de 2022

*Comité Tutoral y Jurado*

Dra. Ana Laura Ibáñez Aguirre (Codirectora) \_\_\_\_\_

Dr. Eduardo González Zamora (Codirector) \_\_\_\_\_

Dr. Alejandro Islas Jácome (Asesor) \_\_\_\_\_

Sinodal: Alejandro Islas Jácome

Sinodal: Sergio Álvarez Hernández

Sinodal: Alma S. Sobrino Figueroa

Sinodal : Leobardo Manuel Gómez Olivan

***Dedicatoria***

*A Dios*

*A mis padres Saúl Montero y Margarita Delgadillo*

*A mi hermano Alaan*

*A mi sobrino Ian*

*A mi hija Anubis*

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios por esta vida y la oportunidad de este aprendizaje, por todos los caminos por los que me permitió andar para la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana y al CONACYT por la beca otorgada.

A mis codirectores, Dra. Ana Laura Ibáñez y Dr. Eduardo González por confiar en mí y brindarme su apoyo durante estos años de trabajo de campo y de laboratorio. Gracias.

Al Dr. Alejandro Islas por su amistad, el compromiso y la continua y minuciosa asesoría, muchas gracias.

A la Biol. Mónica Rincón por la confianza y el apoyo incondicional durante el proceso de los análisis. Gracias

A la Dra. Carolina Campos por estar al pendiente de mi e intentar ayudarme en las peores circunstancias, lamento que no resultara como queríamos. Gracias.

A Toñito † por el conocimiento compartido mientras estuvo en el laboratorio, Gracias donde quiera que estés.

A mi amiga, Mtra. Mayra Sandoval por estar conmigo en los momentos más difíciles, como en los momentos alegres. Gracias por todo tu apoyo, comprensión, paciencia y por no dejarme rendir. Y a todas las personas que estuvieron conmigo durante el proceso de esta tesis, Gracias.

## ABREVIATURAS

Ace	Acenafteno
Aty	Acenaftileno
Ant	Antraceno
BaF	Benzo[ <i>a</i> ]fluoranteno
BaP	Benzo[ <i>a</i> ]pireno
BbF	Benzo[ <i>b</i> ]fluoranteno
BgP	Benzo[ <i>g,h,i</i> ]pireno
BkF	Benzo[ <i>k</i> ]fluoranteno
Cri	Criseno
DaA	Dibenzo[ <i>a,h</i> ]antraceno
Fen	Fenantreno
Flr	Fluoreno
Flt	Fluoranteno
HAPs / PAHs	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
IcdP	Indeno[1,2,3- <i>cd</i> ]pireno
Naf	Naftaleno
Pir	Pireno
Ton.	Tonelada
IARC	International Agency Research on Cancer
ERL	Nivel de efecto bajo

ERM	Nivel de efecto medio
TEL	Nivel de efecto umbral
PEL	Nivel de efectos probable
GESAMP	Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection

## RESUMEN

Los Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son contaminantes persistentes, que se transportan por aire y por medio de partículas que se acumulan en el sedimento, y entran a la cadena alimenticia del detritus. Estos contaminantes tienen un alto potencial carcinógeno y mutágeno. En este estudio se analizaron 16 HAPs, considerados prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) en sedimento y músculo de *Mugil curema* (*M. curema*), que fueron recolectados durante enero del 2016, que correspondió al periodo de “vientos nortes” en la Laguna de Tamiahua, Laguna de Alvarado y en el Río Cazonés, ubicados en el estado de Veracruz. El objetivo fue detectar y cuantificar las concentraciones de estos contaminantes en sedimentos y tejido muscular de *M. curema* en los tres ambientes acuáticos de Veracruz mencionados anteriormente, e identificar si los organismos contenían HAPs de alto riesgo ambiental que pudieran perjudicar de manera directa o indirecta a la salud humana vía el consumo de la lebrancha (*M. curema*), pez de importancia comercial. La extracción de los HAPs se realizó mediante el uso de un equipo Soxhlet, seguido de una purificación de extractos por cromatografía de adsorción. La detección de los HAPs se realizó mediante cromatografía de líquidos de ultra-alta eficiencia (HPLC) con detector de arreglo de diodos (DAD) y Fluorescencia (FL). Las concentraciones de los 16 HAPs en los sedimentos no se detectaron al estar por debajo del límite de detección del equipo. Sin embargo, se obtuvo la cuantificación por gravimetría de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en sedimento de la Laguna de Tamiahua en un rango de 110 -1080 µg/g. En la Laguna de Alvarado se

observó un rango de 100 – 1120 µg/g y para el río Cazonos, el rango varió de 130 a 650 µg/g de HTP en sedimento. Si se tiene en cuenta la parte aromática y se compara con los criterios de calidad sedimentaria establecida por Long *et al.* (1995), se tiene que solo una muestra está por debajo del criterio de calidad ERM = 44.792 µg/g, con una concentración de A9 = 40 µg/g.

Por otra parte, se logró observar la presencia de Fluoreno en el tejido de *M. curema* en una muestra de la localidad de Tamiahua en el estado de Veracruz, México.

**Palabras clave:** *Mugil curema*, sedimentos, HAPs, HTP, HPLC-DAD/FL

## ABSTRACT

The Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are persistent pollutants that could be transported by air and particles. They are accumulated in the sediment and pass to the detritus food chain. These pollutants have a carcinogenic and mutagenic potential. In this study, 16 PAHs were analyzed, selected as a priority by the Environmental Protection Agency (EPA) in sediment and muscle of *Mugil curema* (*M. curema*), which were collected during January 2016, corresponding to the wind-north season in the Tamiahua Lagoon, Alvarado Lagoon and in the Cazonas River located in the state of Veracruz. The aim was to detect and quantify the concentrations of these pollutants in sediments and *M. curema* muscle tissue in the tree aquatic environments of Veracruz, mentioned above, and to identify if the organisms contained high-risk PAHs that could directly or indirectly harm human health through the consumption of the white mullet (*M. curema*). The extraction of PAHs was carried out using a Soxhlet equipment, followed by a purification of extracts by adsorption chromatography. The detection of PAHs was performed by ultra-high performance liquid chromatography (HPLC) with a diode array detector (DAD) and Fluorescence (FL). The concentrations of the 16 PAHs in the sediments were not detected as they were below the detection limit of the equipment. However, the quantification by gravimetry of the total petroleum hydrocarbons (TPH) in sediment of the Tamiahua Lagoon was obtained in a range of 110 -1080 µg/g, in the Alvarado lagoon in a range of 100 - 1120 µg/g was obtained, and for Cazonas River the range went from 130 to 650 µg/g of TPH in sediment. Considering the aromatic part and comparing it with the sedimentary quality criteria

established by Long *et al.* (1995), only one sample is below the quality criterion ERM = 44,792 µg/g, with a concentration of A9 = 40 µg/g.

On the other hand, the presence of Fluorene was observed in the tissue of *M. curema* in a sample from the town of Tamiahua in the state of Veracruz, Mexico.

**Keywords:** *Mugil curema*, sediments, PAH, TPH, UHPLC-FL

## Índice General

1. Introducción	19
1.1 Hidrocarburos	19
1.2 <i>Mugil curema</i>	24
1.3 Cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC)	26
2. Antecedentes	27
3. Preguntas de investigación	29
• ¿Cuáles son los Hidrocarburos aromáticos presentes actualmente en el sedimento de la Laguna de Tamiahua, la Laguna de Alvarado y Río Cazonés?	29
• ¿Cuáles son los Hidrocarburos aromáticos presentes en el tejido muscular de <i>M. curema</i> ?	29
4. Hipótesis	29
5. Justificación	29
6. Objetivos	31
6.1. Objetivo general	31
6.2. Objetivos particulares	31
7. Área de estudio	31
7.1 Laguna de Tamiahua	32
7.2 Río Cazonés	34
7.3 Laguna de Alvarado	36
8. Metodología	38
8.1 Material y equipos:	38
8.2 Colecta en campo	39
8.2.1 Sedimento	39
8.2.3 Grupo control	42
8.3 Procesamiento de las muestras en laboratorio	43

8.3.1 Técnica de extracción de HAPs en sedimento	43
8.3.2 Técnica de extracción de HAPs en muestras biológicas	44
8.3.3 Limpieza de los extractos	45
8.4 Método para Analizar HAPs por Cromatografía de Líquidos	46
8.4.1 Estándar de calibración	48
8.5 Análisis estadístico	52
9. Resultados y Discusión	53
10. Conclusiones	72
11. Perspectivas	73
12. Bibliografía	74

## Índice de Figuras

Figura 1. Estructuras de los HAPS considerados en la lista de contaminantes prioritarios de la USEPA (realizadas en ChemBioDraw Professional 17.0 tomando como referencia de los publicados en la CE disponible en: <a href="https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet%20PAH_0.pdf">https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet%20PAH_0.pdf</a> ). .....	22
Figura 2. Localización de las áreas de estudio dentro del estado de Veracruz.....	32
Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo de Laguna de Tamiahua.....	33
Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo en el río Cazonas. ....	35
Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo en la Laguna de Alvarado.....	36
Figura 6. Izquierda: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de Tamiahua, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Derecha: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en $\mu\text{g/g}$ . .....	55
Figura 7. Porcentaje de Hidrocarburos Totales en sedimento superficial de la Laguna de Tamiahua. ....	56
Figura 8. Superior: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de río Cazonas, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Inferior: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en $\mu\text{g/g}$ . .....	57
Figura 9. Porcentaje de HAPs totales en $\mu\text{g/g}$ de sedimento de Río Cazonas. ....	58
Figura 10. Superior: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de Alvarado, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en	

naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Inferior: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en $\mu\text{g/g}$ .	59
Figura 11. Cuantificación de HATs totales en $\mu\text{g/g}$ de sedimento de la Laguna de Alvarado.	60
Figura 12. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales ( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de la Laguna de Tamiahua y los criterios relacionados con el daño de la fauna bentónica.	62
Figura 13. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales ( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de río Cazonés y los criterios de calidad relacionada con el daño de la fauna bentónica.	63
Figura 14. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de la Laguna de Alvarado y los criterios de calidad relacionados con el daño de la fauna bentónica.	64
Figura 15. Comparación de entre los grupos de peces con concentraciones de HTP ( $\text{ppm}=\mu\text{g/g}$ ). Los datos son representados como la media $\pm$ ESM.	65
Figura 16. Identificación del espectro de UV-VIS de Acenaftileno con una $\lambda_{\text{max}} = 230$ nm.	65
Figura 17. Corridas cromatográficas de blancos empleados para este análisis cualitativo. Imagen superior, cromatogramas de blancos sobrepuestos a distintas longitudes de onda. Imagen inferior, campo de fluorescencia con emisión de disolventes.	67
Figura 18. Comparativa de campos de fluorescencia en corridas cromatográficas de muestras de sedimentos de las estaciones Cazonés 6, Alvarado 6 y Tamiahua 4.	68

Figura 19. Comparativa de campos de fluorescencia en la corrida cromatográfica de muestra de peces de Veracruz 72.) .....	70
Figura 20. Presencia de Fluoranteno en muestra 72 de tejido de peces (panel superior) al ser comparada con las longitudes de excitación y de emisión de estándar de Fluoranteno (panel inferior).....	69

## Índice de Tablas

Tabla 1. Límites máximos permisibles para algunos HAPS en suelo agrícola, forestal pecuario y de conservación.....	23
Tabla 2. Coordenadas geográficas de los sitios de colecta, parámetros evaluados y matriz de análisis de las Lagunas de Tamiahua, Alvarado y río Cazones en Veracruz. .....	39
Tabla 3. Parámetros colectados en los tres cuerpos de agua en estudio. ....	40
Tabla 4. Concentraciones de HAPs en la ampolleta y diluciones.....	47
Tabla 5. Niveles de concentración de los estándares de calibración para UHPLC. ...	48
Tabla 6. Condiciones de operación inicial para el UHPLC. ....	51
Tabla 7. Condiciones de operación inicial para el UHPLC. ....	52
Tabla 8. Concentración de HTP en sedimento en diferentes localidades. ....	54
Tabla 9. Características físicas de los HAPs, los niveles ERL y ERM para cada uno de estos compuestos, el grupo al que pertenecen en la IARC.....	61
Tabla 10. Identificación de los picos de excitación y emisión para los hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados.....	66

# 1. Introducción

## 1.1 Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos de carbono e hidrógeno que se dividen en alifáticos, alicíclicos y aromáticos. Los primeros se subdividen en saturados con enlaces simples (alcanos) y en insaturados con enlaces dobles (alquenos) o triples (alquinos), al igual que sus análogos cíclicos y los hidrocarburos aromáticos, que son compuestos orgánicos con al menos un anillo de seis átomos de carbono con un sistema de dobles enlaces conjugados ([Rakoff y Rose, 1975](#)).

Los hidrocarburos se distribuyen ampliamente en el medio acuático como resultado de numerosas actividades humanas, aunque también tienen un origen natural; son peligrosos si entran en la cadena alimenticia ([Dixon \*et al.\*, 2002](#); [McGlashan y Hughies, 2001](#)).

La estabilidad química de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) se debe a los sistemas  $\pi$  conjugados (la alternancia entre un enlace sencillo y un enlace doble), que cuando están a temperatura ambiente se encuentran en estado sólido y con poca volatilidad. Estos compuestos absorben luz ultravioleta y producen un espectro fluorescente de acuerdo con su carácter aromático.

Los hidrocarburos derivados del petróleo incluyen una amplia gama de compuestos con diferentes propiedades físicas y químicas. Los de mayor importancia ambiental son los hidrocarburos aromáticos policíclicos ([Partida-Gutiérrez et al., 2003](#)). Estos contaminantes ambientales están asociados con resultados adversos para la salud humana debido a que algunos de los HAPs tienen potencial cancerígeno y mutágeno para organismos acuáticos, e incluso para el ser humano; estos se encuentran dentro de las clasificaciones de compuestos carcinógenos del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ([IARC, 1987](#)).

Esta lista abarca cuatro clasificaciones de compuestos carcinógenos en el ser humano. En el grupo 1, se incluyen los compuestos carcinógenos para el ser humano, en el grupo 2A se ubican los compuestos probablemente carcinógenos en humanos, en el grupo 2B están los posiblemente carcinógenos en animales y humanos, y en el grupo 3 los compuestos para los que aún no hay evidencia de que puedan causar cáncer en el ser humano ([IARC, 2018](#)).

Las principales fuentes de HAPs son las emisiones de la combustión incompleta de la materia orgánica, como incendios forestales, quema de basura o leña, emisiones de automóviles y plantas generadoras de energía ([Sepúlveda et al., 2013](#)), chimeneas de fábricas, asfaltos de pavimentación de calles o provenientes de productos de refinación del petróleo como los aceites para motor ([Wade et al., 1994](#), [Noreña-Barroso et al., 1998](#)).

Por ejemplo, cerca de 500 hidrocarburos aromáticos policíclicos han sido detectados en el aire de Estocolmo, Suecia; aunque las mediciones se centran en el Benzo[a]pireno (BaP) como representante de esta familia (Boström *et al.*, 2002). Los compuestos de HAPs son continuamente emitidos a la atmósfera, en gran parte como el subproducto de la combustión incompleta de la materia orgánica, los compuestos de alto peso molecular son representantes de este proceso (Van-Metre y Mahler, 2005). Moreno-Alcántara *et al.* (2017) reportaron que 5 de 7 muestras recolectadas en el Valle de Toluca, México, sobrepasan el límite máximo permisible, que es de 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  establecidos en la norma Oficial Mexicana NOM 035-SEMARNAT-1993; los intervalos que reportó varían en 51 a 83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La naturaleza hidrofóbica de los HAPs hace que tiendan a asociarse rápidamente con las partículas suspendidas en el aire y en la columna de agua, usándolas como medio de transporte para depositarse en el fondo, donde el sedimento es un reservorio importante de estos compuestos que entran en el ambiente (Gogou *et al.*, 2000; Gold-Bouchot, 2004).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) clasificó a 16 de estos HAPs como contaminantes prioritarios (Fig.1), los cuales son: Naftaleno (Naf), Acenaftileno (Acy), Acenafteno (Ace), Fluoreno (Flu), Fenantreno (Fen), Antraceno (Ant), Fluoranteno (Fluo), Pireno (Pir), Benzo[a]fluoranteno (BaF), Criseno (Cri), Benzo[b]fluoranteno (BbF), Benzo[k]fluoranteno (BkF), Benzo[a]pireno (BaP), Indeno[1,2,3-*cd*]pireno (IP), Dibenzo[a,h]antraceno (DahA) y Benzo[*g,h,i*]perileno (BP) (Gremm y Frimmel,1994).

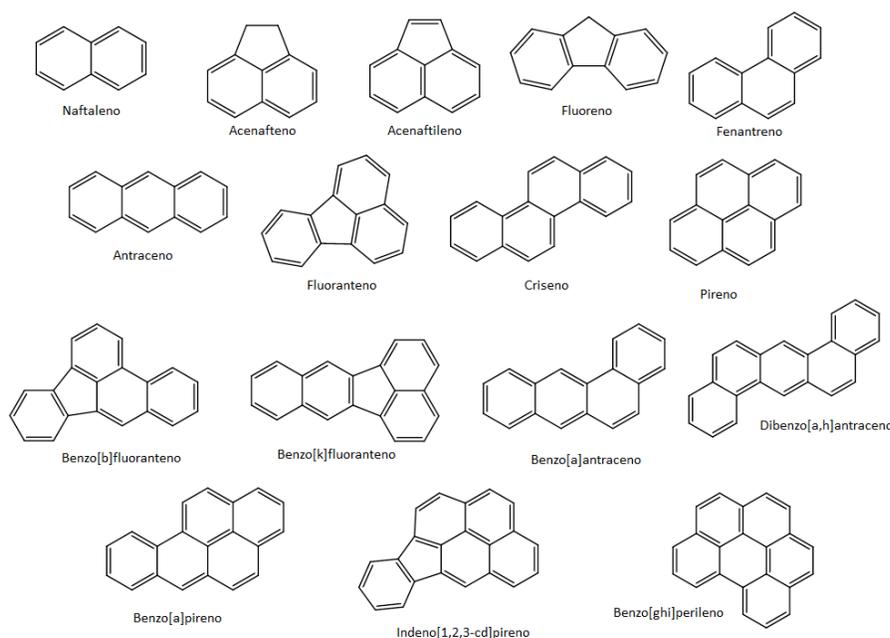


Figura 1. Estructuras de los HAPs considerados en la lista de contaminantes prioritarios de la USEPA (realizadas en ChemBioDraw Professional 17.0 tomando como referencia de los publicados en la CE disponible en: [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet%20PAH\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet%20PAH_0.pdf)).

Las concentraciones de HAPs en sedimento pueden estar sobre intervalos de varias órdenes de magnitud, desde  $\mu\text{g}/\text{kg}$  hasta  $\text{g}/\text{kg}$ , dependiendo de la proximidad de las actividades industriales y corrientes con aguas de descarga (Juhasz y Naidu, 2000). En México existe una Norma Oficial que establece los límites máximos

permisibles de los hidrocarburos en suelo y los lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones, ésta es la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Los límites máximos permisibles para algunos HAPs van de 0.002 a 0.008 mg/g para uso de suelo agrícola, forestal, pecuario y de conservación (Tabla 1). Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional ([NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, 2003](#)), aunque no existe un límite máximo permisible para el sedimento de cuerpos acuáticos ni para alimentos de consumo humano como lo es el pez *Mugil curema*.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para algunos HAPS en suelo agrícola, forestal pecuario y de conservación.

Hidrocarburo específico	Límite máximo permisible (mg/g)
Benzo[ <i>a</i> ]antraceno	0.002
Benzo[ <i>a</i> ]pireno	0.002
Benzo[ <i>b</i> ]fluoranteno	0.002
Benzo[ <i>k</i> ]fluoranteno	0.008
Dibenzo[ <i>a,h</i> ]antraceno	0.002
Indeno[ <i>1,2,3-cd</i> ]pireno	0.002

(Tomado y modificado de [NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012](#)).

En apoyo y verificación para que esta norma se cumpla adecuadamente en toda el área nacional se usará la norma con clave PROY-NMX-AA-146-SCFI-2008, que comprende el análisis de los HAPs a través de cromatografía líquida de alta eficacia con detectores de fluorescencia y ultravioleta visible (UV-VIS), para muestras de suelos.

Este método aplica para medir específicamente seis compuestos, los cuales son Benzo[a]pireno, Dibenzo[a,h]antraceno, Benzo[a]antraceno, Benzo[b]fluoranteno, Benzo[k]fluoranteno e Indeno[1,2,3-cd]pireno. Esta norma especifica que, si se requiere medir otros HAPs, es preciso desarrollar protocolos independientes ([NMX-AA-146-SCFI-2008, 2009](#)).

La contaminación de los estuarios no se limita a la contaminación del agua; también afecta a la comunidad biótica como un todo, incluyendo las especies de importancia comercial como la lebrancha (*Mugil curema*).

## 1.2 *Mugil curema*

Los mugílidos son peces óseos marinos pertenecientes al orden de los mugiliformes de la familia Mugilidae, que se distribuyen ampliamente desde los 42° N y 42° S, se encuentran en cualquier ambiente litoral y penetran en las Lagunas costeras y en las desembocaduras de los ríos, remontándose por varios kilómetros río adentro ([Calderer, 1993](#)).

Las especies de mugílidos tienen una alta capacidad para transportar materia y biomasa a los océanos, ya que forman grandes cardúmenes durante la migración reproductiva y son presa para especies con nivel trófico más alto como los delfines y tiburones, reflejando un papel importante a lo largo de las costas donde se desarrollan ([Chao et al., 2015](#)).

La dieta de *M. curema* está constituida por diatomeas bentónicas, restos orgánicos, sedimentos finos inorgánicos y dinoflagelados (Franco y Bashirulla 1992; Sánchez-Rueda *et al.*, 1997). Así mismo, Sánchez-Rueda *et al.*, (1997) estudiaron el contenido estomacal de mugílidos en la Laguna de Tamiahua ubicada en Veracruz, e identificaron que *M. curema* prefiere arenas finas a limos gruesos moderadamente clasificados, ubicándola en la trama trófica como consumidor primario, siendo así una razón importante para preocuparse por su exposición a cancerígenos y mutágenos ambientales (Dixon *et al.*, 2002). El sedimento es un reservorio que actúa como trampa de contaminantes, debido a que acumula sustancias tóxicas como los hidrocarburos.

Veracruz cuenta con 720 km de litorales, esto representa el 6% del volumen total que se tiene nacionalmente de la pesca, y *Mugil curema* representa uno de los mayores recursos pesqueros de la región. En 2017, este pez tuvo un volumen de producción pesquera nacional en peso vivo de 6,073 toneladas, de los cuales 5,077 fueron provenientes de Veracruz (CONAPESCA, 2017).

El reglamento N° 1881 (Diario Oficial de la Unión Europea, 2006) indica un límite permisible para el Benzo[a]pireno en el pescado de 2 ng/g en peso fresco. Es importante la correcta evaluación y determinación de las fuentes y composición de los HAPs que puedan causar alteración en los organismos (Yunker *et al.* 2002).

### 1.3 Cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC)

Los métodos de UHPLC son útiles para el análisis de HAPs, ya que la detección de UV y fluorescencia ofrece una selectividad mejorada con respecto a otras técnicas. ([García-Alonso y Pérez-Pastor, 2012](#)).

La cromatografía de líquidos de alta eficacia es la técnica de separación más utilizada, que consiste en una fase estacionaria no polar (columna) y una fase móvil con un determinado gradiente de polaridad, que es un líquido forzado a fluir a través de la columna con alta presión ([UNAM, 2007](#)).

Las dos fases se eligen de tal forma que los componentes de la muestra se distribuyan de modo distinto entre estas con base en su polaridad. Los que son fuertemente retenidos por la fase estacionaria se mueven lentamente con el flujo de la fase móvil, mientras los que se retienen débilmente avanzan con mayor rapidez. Estos componentes separados son detectados al final de la columna por un detector ([UNAM, 2007](#)).

El detector sirve para medir la cantidad de las moléculas, visible en un cromatograma de líquidos, que es la gráfica de la respuesta del detector. La señal del detector es tomada por la base del sistema para determinar el tiempo de retención de los componentes de la muestra para análisis cualitativos y la cantidad de la muestra para análisis cuantitativos.

Se ha encontrado que gran parte de los hidrocarburos aromáticos tienen la capacidad de absorber radiación UV, la radiación absorbida generalmente se emite

mediante un proceso de fluorescencia, el cual consiste cuando una molécula absorbe luz aumentando su energía y al emitir luz esta disminuye (Gary, 2009); esta característica es conocida como fluorescencia. A este proceso de activación y desactivación energética aumenta la especificidad de cada molécula, consiguiendo un ajuste de las longitudes de onda máximos de excitación y emisión del detector (Penner, 1998, citado en Valls, 2004).

En un detector de fluorescencia, la muestra es expuesta a la luz en una longitud de onda definida (excitación), las sustancias de la muestra excitadas emiten luz a longitudes de onda elevadas. El fotomultiplicador es posicionado en un ángulo de  $90^\circ$  con la fuente de luz incidente. Manteniendo fija la longitud de onda de excitación ( $\lambda_{ex}$ ) se obtiene un espectro de emisión (UNAM, 2007).

## 2. Antecedentes

Existe un grave problema en el medio acuático con los contaminantes debido a las actividades industriales, agrícolas y urbanas, los cuales se descargan en los ecosistemas acuáticos provocando varios efectos perjudiciales sobre los organismos y también sobre la salud humana (McGlashan y Hughies, 2001).

Botello y Calva (1998) encontraron en la Laguna de Tamiahua concentraciones entre  $8.14 \mu\text{g/g}$  y  $0.58 \mu\text{g/g}$  de Hidrocarburos aromáticos totales en el sedimento de la Laguna de Tamiahua.

Sobrino-Figueroa *et al.* (2005) en el trabajo 'Efectos de compuestos genotóxicos', encontraron daños en los leucocitos del pez lisa. Estos daños se correlacionan con las concentraciones de los contaminantes que analizaron, donde para los HAPs reportaron una concentración de 23.91 µg/g, observando que, en temporada de nortes, los efectos son más drásticos en el daño de estas células.

Montory *et al.* (2008) en el trabajo del crucero CIMAR 10, las concentraciones que encontraron de HAPs en sedimento del Mar interior de Chiloé variaron desde 49.2 a 821.3 ng/g peso seco, con promedio de 210.4 ng/g, donde se tiene un dominio de fuentes pirogénicas. La estación con mayor concentración se sitúa cerca del mayor asentamiento urbano. Estos autores sugieren una entrada difusa proveniente de la deposición atmosférica o desde fuentes terrestres.

Muñoz *et al.* (2010) identificaron HAPs en muestras de peces y sedimento en cuerpos de agua dulce ubicados dentro del complejo Industrial Shushufindi, Ecuador; el análisis cualitativo que realizaron mostró la presencia de Antraceno, Naftaleno y Fenantreno en viseras de peces y Antraceno en músculo, mientras que para sedimento encontraron solo un HAP presente en cada una de sus cuatro muestras: Antraceno, Fenantreno, Benzo[*k*]fluoranteno, y Benzo[*b*]fluoranteno.

Arencibia-Carballo *et al.*, (2014) encontraron concentraciones de HAPs totales en sedimento en un intervalo de 0.054 a 0.400 µg/g. El promedio de la concentración de HAPs fue de 0.142 µg/g, valor por debajo de la concentración media máxima de HAPs totales (5.00 mg/kg materia seca), propuesta por la GESAMP (*Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*) y por la NOAA (*National*

*Oceanic and Atmospheric Administration of the United States*), concluyendo que la zona costera del Golfo de Guacanayabo, Cuba, no puede considerarse contaminada en relación con estos compuestos.

### 3. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los Hidrocarburos aromáticos presentes actualmente en el sedimento de la Laguna de Tamiahua, la Laguna de Alvarado y Río Cazonés?
- ¿Cuáles son los Hidrocarburos aromáticos presentes en el tejido muscular de *M. curema*?

### 4. Hipótesis

Si existe contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en los sedimentos provenientes de la Laguna de Tamiahua, Laguna de Alvarado y del Río Cazonés en Veracruz, entonces en el organismo detritívoro *M. curema* presentará HAPs en músculo.

### 5. Justificación

Los contaminantes ambientales se acumulan en los invertebrados marinos, peces y otros organismos de la vida acuática amenazando la salud humana, ya sea directa o indirectamente a través de la cadena alimentaria ([Dixon et al., 2002](#)).

Dentro de este grupo de contaminantes se encuentra el petróleo y sus derivados, que constituyen unas de las fuentes de introducción de hidrocarburos al

ambiente. Los hidrocarburos del petróleo contienen a los HAPs pertenecientes a la fracción más tóxica (Nair *et al.*, 2008; Zambrano *et al.*, 2012).

Los HAPs de bajo peso molecular contienen dos o tres anillos aromáticos. Estos HAPs están presentes en la atmosfera en fase gaseosa, mientras que los de mayor peso molecular son de cuatro a seis anillos y están adsorbidos en las partículas atmosféricas, siendo estas, las que presentan mayores propiedades cancerígenas, y por estar dispersos en forma de aerosol, pueden llegar al medio acuático (INECC, 2018).

Los HAPs tienen un potencial mutágeno y carcinógeno. Estos contaminantes tienen un impacto grave en la salud humana, ya que *M. curema* es un pez de importancia comercial y de consumo local. Entonces, detectar y cuantificar estos compuestos en el tejido muscular de *M. curema* es de vital importancia para los consumidores de este alimento, principalmente en Veracruz

Con el presente estudio, se pretende evidenciar la presencia de los HAPs en el músculo de *M. curema*. Los HAPs presentan solubilidad variada en disolventes orgánicos, pero son prácticamente insolubles en agua conforme aumenta su peso molecular (Herrera y Chaves, 2012), los cuales serían más persistentes y se mantendrían presentes en el músculo de este mugílido.

## 6. Objetivos

### 6.1. Objetivo general

Identificar los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el sedimento y en el tejido muscular de *M. curema* de la Laguna de Tamiahua, la Laguna de Alvarado y en el río Cazonés, en el periodo de vientos nortes del año 2016 en Veracruz.

### 6.2. Objetivos particulares

- Identificar y cuantificar los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en sedimento.
- Identificar y cuantificar hidrocarburos aromáticos policíclicos en tejido muscular del *M. curema*.

## 7. Área de estudio

El Estado de Veracruz se ubica entre las coordenadas 17° 03' 56" y 22° 27' 28" de latitud Norte y los 93° 36' 13" y 98° 36' 00" de longitud oeste a lo largo del Golfo de México en la región centro-oriental de la República Mexicana. Su territorio abarca un área de 71,826 km<sup>2</sup>, posee una forma alargada e irregular cuya longitud máxima es de 745 km y representa el 3.7% del territorio nacional, colinda al norte con Tamaulipas, al poniente con San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla, al sur con Oaxaca, Chiapas y Tabasco y al oriente con el Golfo de México.

Veracruz es un estado rico en recursos naturales. Se calcula que una tercera parte del agua del país escurre por sus cuencas; además de que posee importantes yacimientos de petróleo y minerales no metálicos como el caolín, azufre y arena sílica (SEDEMA, 2011).

Dentro del estado de Veracruz se encuentran los tres cuerpos de agua de interés para el presente estudio (Fig.2), teniendo 24 puntos de colecta para las muestras de sedimento y del pez *M. curema*. Estos cuerpos de agua son la Laguna de Tamiahua, el Río Cazonos y la Laguna de Alvarado. Para la Laguna de Tamiahua se seleccionaron 9 puntos de colecta, 6 para el Río Cazonos y 9 para la Laguna de Alvarado.

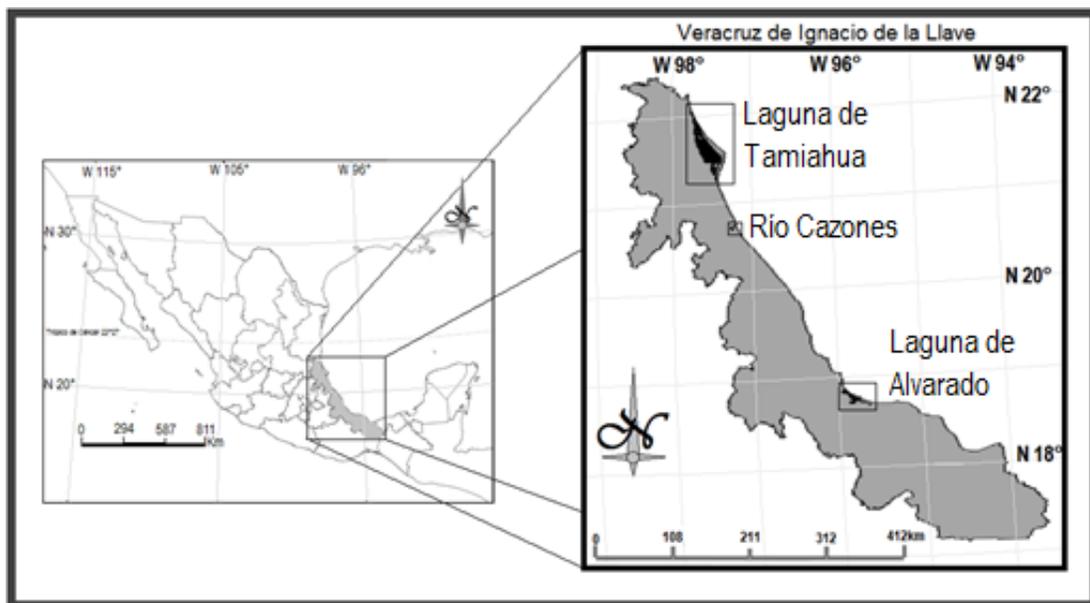


Figura 2. Localización de las áreas de estudio dentro del estado de Veracruz.

## 7.1 Laguna de Tamiahua

La Laguna de Tamiahua se ubicada entre las coordenadas  $20^{\circ} 57' 36''$  y  $22^{\circ} 06' 32''$  Latitud Norte y  $97^{\circ} 18' 41''$  y  $97^{\circ} 46' 17''$  Longitud Oeste (Fig. 3), es la tercera laguna costera más grande de México (Castañeda y Contreras, 2001), tiene una superficie de  $1,405 \text{ km}^2$ , una longitud de 85 km y una anchura máxima de 25 km; posee una plataforma de barrera interna, presenta dos bocas, al norte del sistema la Barra

de Tampachiche, boca artificial abierta en 1978 que necesita dragarse regularmente para mantenerla abierta, y al sur la Barra Corazones, boca natural que permanece abierta.

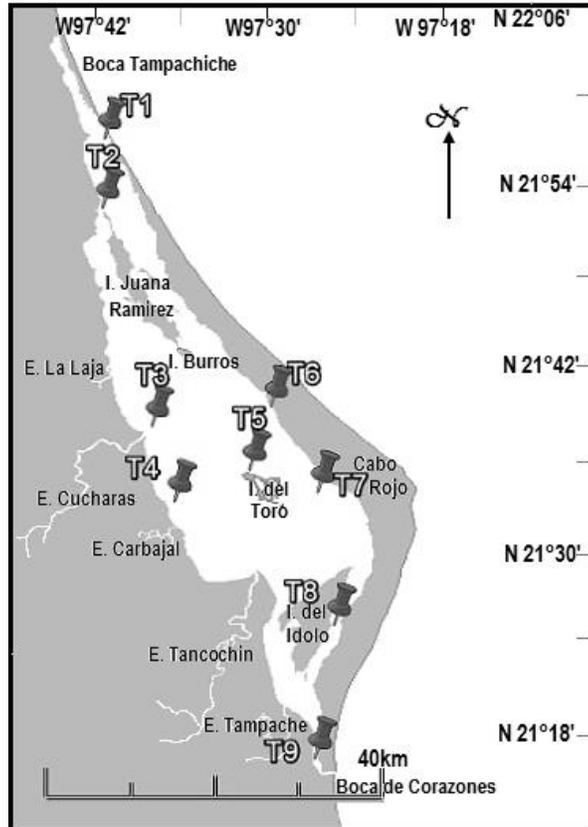


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo de Laguna de Tamiahua

La Laguna de Tamiahua es un sitio Ramsar desde 2005 (Morales-Gordillo y Paredes-Cruz, 2005), que tiene aproximadamente 120 especies de peces; es un hogar importante para las aves residentes y migratorias que buscan refugio, alimento o descanso de sus largos viajes; sus aguas son poco transparentes y contienen abundantes terrígenos finos en suspensión (DOF, 2014). En su borde continental desembocan varios ríos, en su mayor parte de flujo estacional, entre los que destacan La Laja, Cucharas, Tancochín y Tampache, que en épocas de lluvia aportan grandes

cantidades de sedimentos, especialmente limo-arcillosos, producto de la erosión de rocas terciarias de la llanura costera ([Morales-Gordillo y Paredes-Cruz, 2005](#)).

El clima de la región es subhúmedo, con evaporaciones moderadas, fuertes lluvias en verano y seco en el invierno, con excepción de las tormentas con viento; en verano prevalecen vientos del este y en invierno del norte y noreste ([García, 1987](#)).

Por la presencia de manglar en la laguna, tiene un alto valor hidrológico al filtrar los contaminantes presentes en el agua. La pesca constituye una parte socioeconómica importante, ya que aporta alimento a la población e insumos a la industria ([Aguirre-Gómez, 2004](#); [DOF, 2014](#)).

## 7.2 Río Cazones

Se localiza en la zona norte del Estado, entre los paralelos 20° 36' y 20° 49' de latitud norte; meridianos 97° 10' y 97° 25' de longitud oeste, colinda al noroeste con el municipio de Tuxpan, al noreste con el Golfo de México, al este, sur y oeste con el municipio de Papantla y al oeste con el municipio de Tihuatlán. El río Cazones nace en la sierra de Huauchinango Puebla y desemboca en el Golfo de México, formando la barra de Cazones. Se tomaron seis puntos de colecta (C1, C2, C3, C4, C5 y C6, Fig.4).

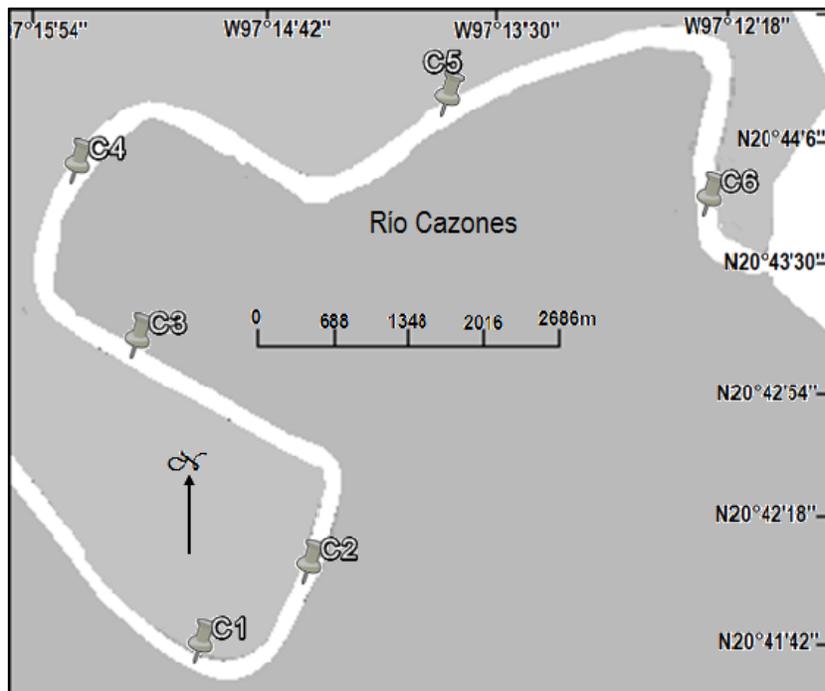


Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo en el río Cazones.

Su clima es cálido-regular con una temperatura promedio de 25 °C, con precipitación pluvial media anual de 2 mil mm (PMDC, 2014). El principal ecosistema del municipio de Cazones de Herrera es selva alta perennifolia con especies como el ojite, chicozapote, cedro, chaca, orejón, uvero, ceiba, higuerón, jobo, anona, coyol, palma, espino y nopal, donde cohabita una fauna compuesta por poblaciones de mamíferos silvestres como conejos, mapaches, tlacuaches, tejones, armadillos y coyotes.

La riqueza está representada por las maderas preciosas; su suelo es de tipo regosol, susceptible a la erosión; gran porcentaje del suelo es usado para la ganadería y la agricultura (INAFED, s.f.); además de ello, cuenta turísticamente con las playas

Azul, Boquitas, Sur, Chaparrales, Paseos de la ribera del Río y paseos en lancha por los manglares (SEFIPLAN, Gobierno de Veracruz, 2015).

### 7.3 Laguna de Alvarado

El complejo lagunar se localiza entre los paralelos  $18^{\circ} 43' 00''$  y  $18^{\circ} 52' 15''$  de latitud norte y los meridianos  $95^{\circ} 40'$  y  $95^{\circ} 57'$  de longitud oeste (Fig.5), tiene una longitud aproximada de 26 km y un ancho de 5 km cubriendo un área aproximada de  $62 \text{ km}^2$  (Castañeda y Contreras, 2001). La comunicación con el mar se da a través de la Boca Camaronera que se ubica en el extremo noroeste y de la Boca de Alvarado ubicada al noreste (Contreras, 1993).

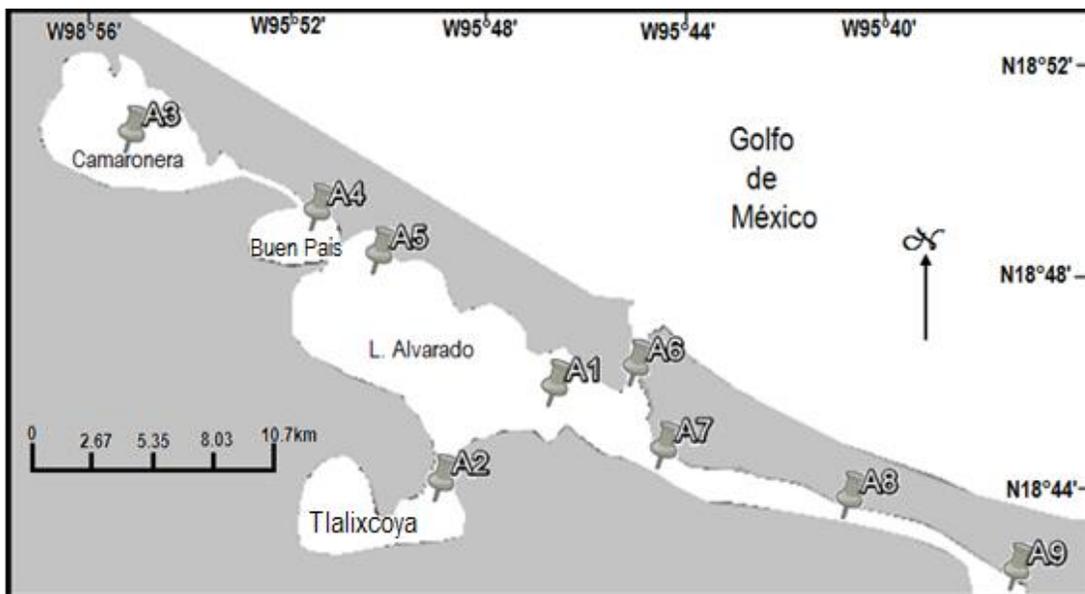


Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo en la Laguna de Alvarado.

La Laguna de Alvarado es somera; “presentando una profundidad promedio de 2.2 m en la parte central y profundidades máximas a lo largo del río Papaloapan de 9 m a 13.5 m, en el canal que conduce hasta el muelle de desembarque del puerto

pesquero piloto de Alvarado se registra 5 m de profundidad” ([Reséndez, 1973](#)), en esa zona la obtenida en este estudio registró 7.3m. Cabe resaltar que hay un registro de aproximadamente 89 especies de peces ([Reséndez y Kobelkowsky, 1991](#)).

La Laguna de Alvarado es un sitio Ramsar y humedal prioritario, considerado el tercer humedal de mayor extensión en México ([Portilla-Ochoa, 2003](#)). Es un área de alimentación, refugio, reproducción y anidación, desarrollo y crecimiento para diferentes especies.

## 8. Metodología

### 8.1 Material y equipos:

#### Disolventes

Hexanos, (95% *n*-HEXANOS) HPLC/HH1007 CAS: 110-54-3

Metanol, J.T. Baker® CAS 9070-1

Diclorometano MACRON Fine Chemicals™ ChromAR® CAS 75-09-2

Acetonitrilo Sigma Aldrich® CAS 75-05-8

Agua milli-Q 18Ω

Acetona

Sílica gel

Alúmina

Sulfato de sodio anhidro

Hidróxido de potasio

Estándar SUPELCO ss EPA

Estándar Antraceno

Estándar Pireno

#### *Equipos*

Aparato de extracción Soxhlet LUZEREN®

Rotavapor, Buchi™ R-3, con la bomba de vacío Buchi™ V-700

HPLC Thermo Scientific™ Dionex™ UltiMate™ 3000

Detector DAD-VIS Thermo Scientific™ Dionex™ UltiMate™ 3000

Detector de Fluorescencia R-3100 Thermo Scientific™ Dionex™ UltiMate™

## 8.2 Colecta en campo

### 8.2.1 Sedimento

Se realizó la colecta de muestras de sedimento superficial en tres ambientes costeros de Veracruz durante el mes de enero de 2016. En la Laguna de Tamiahua se consideraron nueve puntos de referencia, seis en el Río Cazonés y nueve en la Laguna de Alvarado (Tabla 2). En cada punto se registró la profundidad, la temperatura ambiental, la temperatura superficial del agua y la salinidad superficial. (Tabla 3).

Tabla 2. Coordenadas geográficas de los sitios de colecta, parámetros evaluados y matriz de análisis de las Lagunas de Tamiahua, Alvarado y río Cazonés en Veracruz.

<b>Laguna de Tamiahua</b>				
Est.	Referencia	Latitud N	Longitud O	Matriz Analizada
T1	Boca Tampachiche	21°56.902'	97°42.163'	Sedimentos y organismos
T2	Puente San Andrés	21°52.216'	97°42.091'	Sedimentos y organismos
T3	Cucharas	21°37.881'	97°38.334'	Sedimentos y organismos
T4	Tubo Pemex	21°32.992'	97°36.665'	Sedimentos y organismos
T5	Isla Toro	21°35.041'	97°31.464'	Sedimentos y organismos
T6	Restinga	21°39.178'	97°30.003'	Sedimentos y organismos
T7	Cabo Rojo	21°35.383'	97°27.120'	Sedimentos y organismos
T8	Aguacatal	21°25.010'	97°25.408'	Sedimentos y organismos
T9	Cooperativa	21°16.44'	97°26.652'	Sedimentos y organismos

...Continuación tabla 2

<b>Río Cazones</b>				
Est.	Referencia	Latitud N	Longitud O	Matriz Analizada
C1	Los Migueles	20°41.611'	97°14.992'	Sedimentos y organismos
C2	El Torno	20°14.985'	97°14.433'	Sedimentos y organismos
C3	Palmas	20°43.050'	97°15.271'	Sedimentos y organismos
C4	La Encantada	20°43.778'	97°15.678'	Sedimentos y organismos
C5	Ducto Pemex	20°44.170'	97°13.754'	Sedimentos y organismos
C6	Barra	20°43.721'	97°12.321'	Sedimentos y organismos

<b>Laguna de Alvarado</b>				
Est.	Referencia	Latitud N	Longitud O	Matriz Analizada
A1	Entrada Puquita	18°45.644'	95°46.85'	Sedimentos y organismos
A2	Salida río Blanco	18°43.764'	95°48.979'	Sedimentos y organismos
A3	Camaronera	18°50.197'	95°55.297'	Sedimentos y organismos
A4	Antes de Arbolitos	18°48.890'	95°51.606'	Sedimentos y organismos
A5	Punta tía Pancha	18°47.895'	95°50.381'	Sedimentos y organismos
A6	Puente Alvarado	18°46.066'	95°45.282'	Sedimentos y organismos
A7	Caño de Rojas	18°44.676'	95°44.751'	Sedimentos y organismos
A8	Buena Vista	18°43.585'	95°41.046'	Sedimentos y organismos
A9	El conejo	18°42.396'	95°37.840'	Sedimentos y organismos

Tabla 3. Parámetros colectados en los tres cuerpos de agua en estudio.

### Laguna de Tamiahua

Est.	Referencia	Profundidad (m)	Temp./Ambiental (°C)	Temp./Agua (°C)	Salinidad (UPS)
T1	Boca Tampachiche	3.5	15	19	35
T2	Puente San Andrés	0.8	16	18	30
T3	Cucharas	1.5	15	15	24
T4	Tube Pemex	2	15	18	25
T5	Isla Toro	1.5	15	17	24
T6	Restinga	2	16	17	25
T7	Cabo Rojo	1.5	15	17	25
T8	Aguacatal	1.5	15	18	24
T9	Cooperativa	2.5	15	17	25

### Río Cazones

Est.	Referencia	Profundidad (m)	Temp./Ambiental (°C)	Temp./Agua (°C)	Salinidad (UPS)
C1	Los Migueles	6.2	17	19	1
C2	El Torno	4	17	19	3
C3	Palmas	3.5	17	19	2
C4	La Encantada	4.25	17	19	2
C5	Ducto Pemex	2.5	17	19	5
C6	Barra	2.75	17	19	6

### Laguna de Alvarado

Est.	Referencia	Profundidad (m)	Temp./Ambiental (°C)	Temp./Agua (°C)	Salinidad (UPS)
A1	Entrada Puquita	1.4	23	24	5
A2	Salida río Blanco	1.2	24	25	0
A3	Camaronera	1	27	25	2
A4	Antes de Arbolitos	0.8	26	27	6
A5	Punta tía Pancha	1.5	25	25	5
A6	Puente Alvarado	7.3	26	25	10
A7	Caño de Rojas	4	27	25	5
A8	Buena Vista	6.75	24	25	5
A9	El conejo	1	23	24	1.5

Las muestras se obtuvieron utilizando una draga Van Veen de 6 L, la cual proporciona sedimentos superficiales. Las muestras son almacenadas en frascos de vidrio de boca ancha, previamente lavados con detergente neutro, libre de fosfatos y enjuagados con acetona, seguido de hexano (Calva-Benítez y Torres-Alvarado, 2007). Las muestras se mantuvieron en refrigeración a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta su procesamiento en laboratorio.

#### 8.2.2 Peces

Los peces correspondientes a la Laguna de Tamiahua se adquirieron de diferentes pescadores, se midió la longitud total ( $30.54 \pm 1.74\text{ cm}$ ), se colectó in situ con ayuda de una red, 25 peces del Río Cazonos ( $31.92 \pm 2.13\text{ cm}$ ) y directamente de la cooperativa de la Laguna de Alvarado 30 ejemplares ( $29.34 \pm 1.60\text{ cm}$ ).

Se determinó el sexo de estos peces (Tamiahua: 20 hembras, 10 machos, Río Cazonos: 13 hembras, 11 machos y un indeterminado; Alvarado: 27 hembras y 3 machos). Se envolvieron en papel aluminio y se congelaron en hielo seco para su análisis posterior en el laboratorio.

#### 8.2.3 Grupo control

Se obtuvo la muestra control de la zona costera de Barra de Cazonos con ayuda de los pescadores de la zona. Los juveniles colectados el 16 de junio de 2016 fueron transportados en un tinaco que fue llenado previamente con agua de su ambiente para trasladarlos a la Planta Experimental de Producción Acuícola en la UAM-I.

Se mantuvo a los juveniles de *M. curema* en tinas con capacidad de 800 L, en sistemas de recirculación usando Filtros fluval modelo MS306 y se mantuvieron a temperaturas controladas en  $28.5 \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se registró el pH ( $8.8 \pm 0.3$ ), el amonio ( $0.5$

$\pm 0.2$  mg/L), los nitritos ( $0.4 \pm 0.7$  mg/L) y nitratos ( $0.9 \pm 0.5$  mg/L), al igual que el oxígeno disuelto ( $3.6 \pm 0.6$  mg/L), de las tinas donde se desarrollaron (Ibáñez y Montero, 2018).

Después se cambiaron a un estanque con capacidad de  $5 \text{ m}^3$  para que el pez se desarrollara en un espacio suficiente para su crecimiento y alcanzar una talla promedio. Las primeras muestras control se obtuvieron entre el 16 de diciembre de 2016 y el 22 y 24 de enero de 2017, obteniendo una longitud promedio de  $12.36 \pm 0.92$  cm y una masa de  $5.95 \pm 21.26$  g, a estas muestras se les congeló inmediatamente. Para que en el día siguiente se les retirara la piel y el músculo, el cual fue colocado en una estufa de secado a una temperatura máxima de  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ . El tejido seco se homogenizó en un mortero de porcelana para la extracción de hidrocarburos haciendo uso de un equipo Soxhlet, como se detalla más adelante.

### 8.3 Procesamiento de las muestras en laboratorio

#### 8.3.1 Técnica de extracción de HAPs en sedimento

Se descongelaron las muestras del sedimento contenidas en los frascos de vidrio posteriormente se secaron a temperatura ambiente. La extracción de HAPS de sedimento superficial de las lagunas se realizó mediante la técnica de CARIPOL (1986) (UNEP, 1992).

Se trituro la muestra en un mortero de porcelana y se tamizaron con una malla de  $0.250 \text{ mm}$  para homogenizar la muestra. Se pesó una submuestra de  $5 \text{ g}$  de sedimento de cada punto para hacer las extracciones en el Soxhlet con  $500 \text{ mL}$  de

hexano y DCM (1:1, v/v) durante 8 horas a una temperatura entre los 35 y 38°C, sin llegar a los 40°C.

### 8.3.2 Técnica de extracción de HAPs en muestras biológicas

Para el tejido muscular del pescado se usó la técnica de UNEP/FAO/IOC/IAEA No.6 (1993) para purificar el extracto el cual se consiguió secando el tejido muscular a temperaturas entre 40 y 50 °C en charolas de aluminio, se homogenizó en mortero de porcelana y se pesó una submuestra de 3 g de tejido para la realización de la extracción en el Soxhlet.

Se agregaron 250 mL de MeOH en un matraz balón de 500 mL para hacer lavados sucesivos con el solvente durante 8 horas, a una temperatura entre los 35 y 38°C, sin llegar a los 40°C. Posteriormente, se añadieron 20 mL de KOH [0.7 M] y 30 mL de agua milli-Q al matraz balón para extraer por 2 horas adicionales. Entonces se colocó el extracto de la muestra en un embudo de separación de 500 mL, se enjuagó varias veces el matraz balón para evitar pérdidas y se añadieron 90 mL de hexano y 20 mL de agua. Se agitó el embudo para mezclar bien y se esperó para la formación de dos fases para la recuperación de la fase orgánica en un matraz balón de 250 mL. La fase de potasa metanólica se regresó al embudo para volver a extraer con 50 mL de hexano y recuperar de nuevo la parte orgánica. Este procedimiento se realizó tres veces. Después, se filtró con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y fibra de vidrio. Finalmente, se concentró hasta aproximadamente 5 mL con ayuda de un rotavapor a una temperatura del baño maría de 40 °C y la presión de la bomba de vacío a 40 psi.

### 8.3.3 Limpieza de los extractos

Para la limpieza del extracto en columnas de absorción se utilizaron columnas de 2 cm de diámetro interno por 30 cm de longitud, se empacaron en el siguiente orden: fibra de vidrio, 5 g de Sílica, 10 g de Alúmina y 2 g de Sulfato de sodio anhidro. La Sílica y la Alúmina se activaron a 200 °C durante 4 horas y se desactivaron con el 5% de su peso de agua milli-Q.

Se añadió la muestra con ayuda de una pipeta Pasteur enjuagando varias veces el matraz balón, se agregaron 20 mL de hexano como eluyente y se estableció un goteo lento para una buena separación. Esta fue la fracción 1 que contiene los hidrocarburos alifáticos, parafinas o saturados.

Para la fracción 2 formada por los hidrocarburos no saturados y aromáticos, se añadieron 20 mL de una mezcla hexano y diclorometano (90:10, v/v) y 30 mL de hexano y diclorometano (1:1, v/v); se colectó en un matraz balón de 50 mL; después se concentraron las dos fracciones en un rotavapor hasta un volumen de 5 mL, se trasvasó a viales utilizando nitrógeno para llevar a sequedad en los viales. Después se realizaron varios enjuagues a los matraces balón con las fracciones F1 con hexano y F2 con la mezcla 9:1, v/v hexano:DCM. Como control se incluyeron el análisis de blanco de reactivos (1 por cada 10 muestras problema) y se llevó a sequedad para su análisis mediante UHPLC.

## 8.4 Método para Analizar HAPs por Cromatografía de Líquidos

Los HAPs tienen un carácter aromático que, dependiendo de estos, absorben luz ultravioleta y producen un espectro fluorescente característico. Estos son poco solubles en agua y desde el punto de vista químico, reaccionan por sustitución de hidrógeno o por adición cuando se produce su saturación; además de que estos compuestos se foto-oxidan para ser eliminados de la atmósfera cuando están en el ambiente (Castaño, et al. 2004).

La espectroscopía UV-VIS es una técnica en laboratorio capaz de detectar casi todas las moléculas, en esta técnica la luz UV-VIS pasa a través de la muestra en una determinada longitud de onda, donde parte de esta luz es transmitida. La transmisión es la relación entre la intensidad de la luz transmitida y la luz incidente y esta correlacionada con la absorbancia. La absorbancia se puede utilizar de forma cualitativa para identificar un compuesto haciendo coincidir la absorbancia medida en un rango de longitudes de onda, llamado espectro de absorbancia, con los datos publicados.

Este método consistió en la detección de HAPs usando el equipo UHPLC Dionex Ultimate 3000 equipado con detector DAD\_3000 y FLD\_3100 en serie, empleando la técnica del estándar externo.

Para la preparación de las soluciones de trabajo empleadas en las pruebas preliminares y en la prueba inicial de desempeño, se partió del estándar certificado SS EPA 610 PAH Mix, Supelco contenido en MeOH:DCM (1:1, v/v) 1 mL (Sigma-Aldrich 4S8743).

- Dilución primaria de la mezcla del estándar (D1).

De la mezcla de 16 HAPs que incluye 4 concentraciones diferentes en un intervalo de 2000 mg/L a 100 mg/L en metanol-diclorometano 1:1 y conociendo las proporciones, se tomaron 50  $\mu$ L con una jeringa de vidrio Hamilton de 500  $\mu$ L y se añadieron a 950  $\mu$ L de acetonitrilo para obtener, de este estándar, concentraciones desde 5  $\mu$ g/mL a 100  $\mu$ g/mL para cada hidrocarburo aromático policíclico (Tabla 4).

- Dilución secundaria de la mezcla de estándar (D2).

De la solución de disolución primaria se tomaron 250  $\mu$ L y se mezclaron con 750  $\mu$ L de acetonitrilo para obtener concentraciones entre 25  $\mu$ g/mL y 1.25  $\mu$ g/mL del estándar.

- Dilución terciaria de la mezcla de 16 PAHs (D3).

De la solución de dilución secundaria se tomaron 250  $\mu$ L y se mezclaron con 750  $\mu$ L de acetonitrilo para tener concentraciones entre 6.25  $\mu$ g/mL y 0.3125  $\mu$ g/mL. A partir de la disolución terciaria se realizaron los niveles de calibración.

Tabla 4. Concentraciones de HAPs en la ampolleta y diluciones.

Componente	Original ( $\mu$ g/mL)	D1 ( $\mu$ g/mL)	D2 ( $\mu$ g/mL)	D3 ( $\mu$ g/mL)
Antraceno	100	5	1.25	0.3125
Benzo[a]antraceno	100	5	1.25	0.3125
Benzo[a]pireno	100	5	1.25	0.3125
Benzo[k]fluoranteno	100	5	1.25	0.3125
Criseno	100	5	1.25	0.3125
Indeno[1,2,3-cd]pireno	100	5	1.25	0.3125
Fenantreno	100	5	1.25	0.3125
Pireno	100	5	1.25	0.3125
Benzo[b]fluoranteno	200	10	2.5	0.625
Benzo[g,h,i]perileno	200	10	2.5	0.625
Dibenzo[a,h]antraceno	200	10	2.5	0.625
Fluoranteno	200	10	2.5	0.625

Continuación Tabla 4				
Fluoreno	200	10	2.5	0.625
Naftaleno	1000	50	12.5	3.125
Acenafteno	1000	50	12.5	3.125
Acenaftileno	2000	100	25	6.25

#### 8.4.1 Estándar de calibración

Los estándares de calibración se prepararon por triplicado a cinco niveles de concentración a partir de la dilución terciaria de la mezcla del estándar de HAPs, empleando 30, 40, 50, 60 y 70  $\mu\text{L}$  para cada nivel respectivamente en un volumen final de 1000  $\mu\text{L}$  con ACN. La tabla 5 muestra los niveles de concentración empleados en la construcción de las curvas de calibración para cada hidrocarburo.

Tabla 5. Niveles de concentración de los estándares de calibración para UHPLC.

Componente	N1 (ng/mL)	N2 (ng/mL)	N3 (ng/mL)	N4 (ng/mL)	N5 (ng/mL)
Antraceno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Benzo[ <i>a</i> ]antraceno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Benzo[ <i>a</i> ]pireno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Benzo[ <i>k</i> ]fluoranteno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Criseno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Indeno[1,2,3- <i>cd</i> ]pireno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Fenantreno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Pireno	9.375	12.5	15.625	60.3125	21.875
Benzo[ <i>b</i> ]fluoranteno	18.75	25	31.25	60.625	43.75
Benzo[ <i>g,h,i</i> ]perileno	18.75	25	31.25	60.625	43.75
Dibenzo[ <i>a,h</i> ]antraceno	18.75	25	31.25	60.625	43.75
Fluoranteno	18.75	25	31.25	60.625	43.75
Fluoreno	18.75	25	31.25	60.625	43.75
Naftaleno	93.75	125	156.25	63.125	218.75
Acenafteno	93.75	125	156.25	63.125	218.75
Acenaftileno	187.5	250	312.5	66.25	437.5

## Obtención de los espectros de UV y Fluorescencia.

Con el propósito de conocer las longitudes de onda a la que los HAPs absorben radiación UV se inyectó el estándar de la segunda dilución o D2 (Fig. 10) probándose los diferentes gradientes para la separación de los compuestos y la tercera dilución o D3 (Fig. 11) para su identificación empleando el detector de arreglo de diodos.

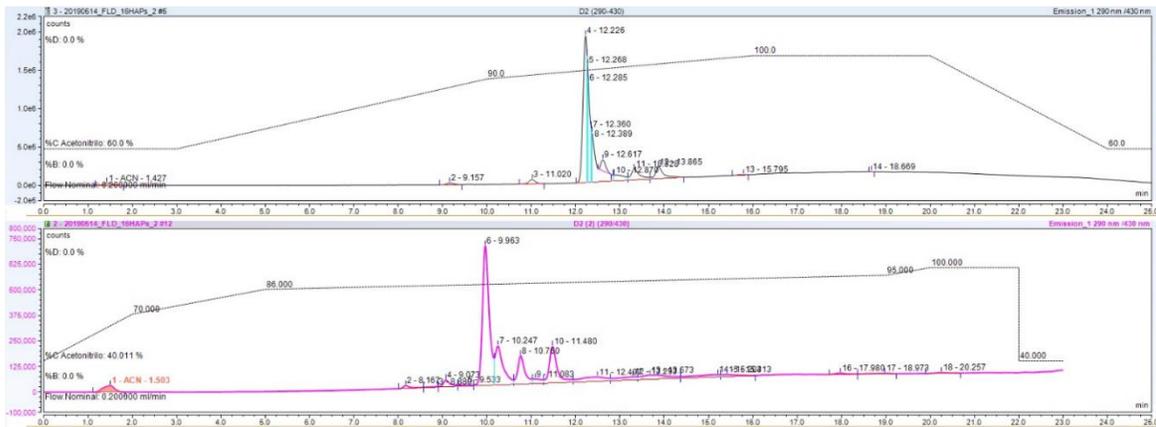


Figura 10. Se muestran dos diferentes gradientes para la separación de los compuestos en el estándar de la disolución 2, donde se observa que el cromatograma inferior tiene una mejor separación de compuestos.

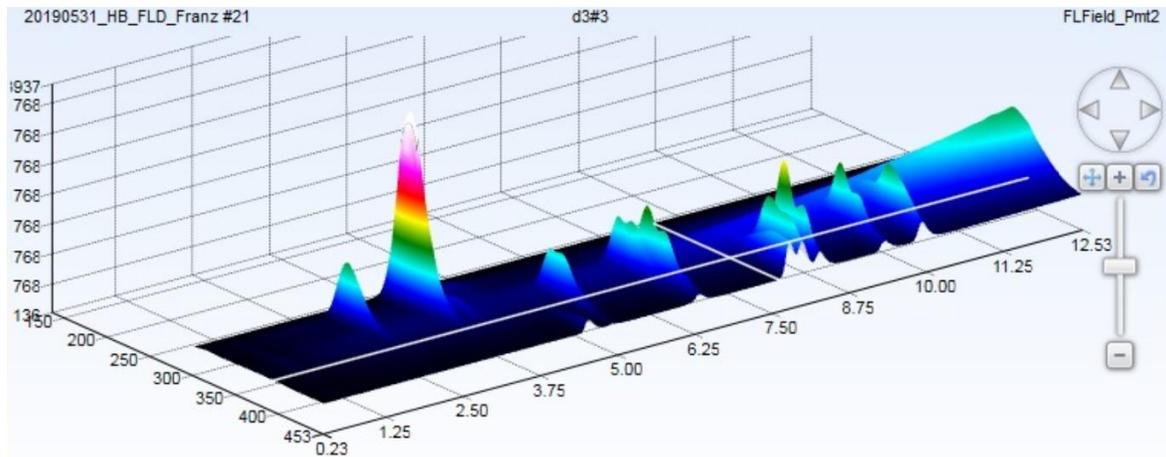


Figura 11. Grafica en campo 3D, donde se observan los picos de los componentes del estándar de la Disolución 3, dentro de los primeros 12 min para su mejor apreciación y resolución.

Para establecer el programa de longitudes de onda de excitación y emisión en el detector de fluorescencia se necesitó saber las longitudes de onda a la que se excitan y emiten cada uno de estos hidrocarburos. Por este motivo fue necesario obtener los espectros de excitación y emisión de fluorescencia para cada uno de los HAPs, utilizando el detector de fluorescencia en campo 3D. El software que se empleó para el sistema de datos de cromatografía fue Chromeleon 7, versión 7.2-SR3.

Para la identificación de las longitudes de onda se tomó en cuenta las longitudes de onda reportadas por Masrat *et al.* (2012) para Naftaleno el cual presenta una longitud máxima en  $\lambda_{\max} = 221.8$  nm y Pireno donde la longitud máxima para este compuesto es de  $\lambda_{\max} = 337$  nm. En la detección de Fluoranteno, Naftaleno, Antraceno y Fenantreno se utilizó las siguientes longitudes de onda las 214 nm, 234 nm, 254 nm, 280 nm, 325 nm y 350nm que son reportadas por Story *et al.*, (2001) para estos cuatro HAPs. Franz y Jendreizik (2015) recomiendan para los 16 HAPs usar la longitud de onda de excitación en 219 nm y para la emisión las siguientes longitudes que son 380, 400, 425 y 435 nm, esto para la detección con fluorescencia y para el uso del detector UV el uso de la longitud de onda en 240 nm.

#### 8.4.2 Condiciones de operación del UHPLC

Las condiciones de operación de inicio del UHPLC que fueron establecidas se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de operación inicial para el UHPLC.

Cromatógrafo	UHPLC Dionex UltiMate serie 3000	
Automuestreador	Dionex UltiMate serie 3000	
Detector FLD	Dionex UltiMate serie 3100	
Detector DAD UV-VIS	Dionex UltiMate serie 3000	
Columna	Zorbax SB-C18 (2.1 x 100mm, 3.5µm)	
Fase móvil	A Agua	
	C Acetonitrilo	
Elución	Gradiente	
Programa de gradiente	t(min)	%C
	0	60
	1	60
	2	85
	4	90
	20	100
	25	100
25	60	
Temperatura	25 °C	
Flujo	0.2 mL/min	
Tiempo de corrida	25 min	
Volumen de inyección	10 µL	

A las condiciones de partida se les hicieron las siguientes modificaciones:

Columna: Zorbax Eclipse XDB-C18 (2.1 x 100mm, 3.5µm)

Temperatura: se probó con 30, 25 y 22 °C.

Flujos: Se utilizaron flujos de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mL/min.

Gradientes: se realizaron 10 programas

Programas de fluorescencia: se manejaron 28 instrumentos de método.

Después de probar y analizar las nuevas modificaciones, se establecieron las condiciones finales (óptimas) para el UHPLC (Tabla 7). Con estas condiciones se monitorearon las señales de los analitos por fluorescencia, y para el acenaftileno por UV a una longitud de onda de 230 nm.

Tabla 7. Condiciones de operación inicial para el UHPLC.

Cromatógrafo	UHPLC Dionex UltiMate serie 3000		
Auto muestreador	Dionex UltiMate serie 3000		
Detector FLD	Dionex UltiMate serie 3100		
Detector DAD UV-VIS	Dionex UltiMate serie 3000		
Columna	Zorbax Eclipse XDB-C18 (2.1 x 100mm, 3.5µm)		
Fase móvil	A Agua		
	B Metanol		
	C Acetonitrilo		
Elución	Gradiente		
Programa de gradiente	t(min)	%B	%C
	0	10	40
	2	10	40
	14	10	60
	22	0	90
	28	0	100
	28	0	100
	29	10	60
	30	10	40
Temperatura	22°C		
Flujo	0.4 mL/min		
Tiempo de corrida	30 min		
Volumen de inyección	10 µL		

## 8.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software GraphPad Prism 6 (GraphPad software, San Diego, CA, USA). Para identificar diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de los hidrocarburos totales del petróleo entre los grupos de peces colectados, se realizó una prueba de Kruskal–Wallis, el valor de

significancia se fijó en  $p < 0.05$ , posteriormente se realizó una prueba *post hoc* T3 de Dunnett. Los datos son presentados como la media  $\pm$  ESM.

## 9. Resultados y Discusión

### Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos Totales

El término Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) se usa para describir una gran familia de compuestos químicos derivados del petróleo crudo, los cuales se han dividido en grupos que tienen comportamientos similares en el suelo y en el agua; a estos grupos se les llama fracción de hidrocarburos del petróleo ([ATSDR, 1998](#)).

La cuantificación de los hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) de las Lagunas de Tamiahua, Alvarado y Río Cazonés, se obtuvo por gravimetría ([US EPA, 2010](#)) usando el siguiente cálculo:

$$\text{HTPs (mg kg}^{-1} \text{ de s.s.)} = (\text{RB} - \text{RA}) * (\text{FC}) / (\text{P} * \text{FH}).$$

Donde:

HTPs (mg kg<sup>-1</sup> de s.s.) = hidrocarburos totales del petróleo en mg/kg de suelo seco.

RA= peso (mg) del recipiente vacío a peso constante.

RB = peso (mg) del recipiente con el extracto orgánico concentrado.

P = cantidad de suelo extraído (g).

FH = factor de corrección de humedad (1-(%humedad/100)).

FC = factor de corrección para transformar a kg de s.s. = 1 000.

Estos HTP pueden convertirse en un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (ATSDR, 1998). Se comparan los resultados con las otras fuentes en la tabla 8.

Tabla 8. Concentración de HTP en sedimento en diferentes localidades.

Zona de estudio	HTP (peso seco)	Referencia
Xiamen Harbour, Hong Kong	60 - 646 µg/g	Hong <i>et al.</i> , 1995
Golfo Pérsico, Arabia Saudita	11- 6900 µg/g	Readman <i>et al.</i> , 1996
Mar Caspio, Azerbaijan	28 -1820 µg/g	Tolsa <i>et al.</i> , 2004
Gran barrera de arrecifes, Australia	HTP > 500µg/g	Volkman <i>et al.</i> ,1992
Río Cazonos, México	4298 – 60299 µg/g	Dorantes-Avelino <i>et al.</i> , 2017
Golfo de México	Prom. 348.5 µg/g	Ponce-Vélez y Vázquez-Botello, 2005
Laguna de Tamiahua, México	100 -1080 µg/g	Este estudio
Río Cazonos, México	130 – 650 µg/g	Este estudio
Laguna de Alvarado, México	100 – 1120 µg/g	Este estudio

La Laguna de Tamiahua es impactada por derrames accidentales, fugas de oleoductos, que por lo general no son atendidos en tiempo. Un ejemplo de ello fue el derrame ocurrido en mayo de 2014 que duró más de dos meses y tuvo un radio de 10 Km. Esto se ubica en la zona del Canal Majahual y Zanjita, y aunque se realizaron las denuncias pertinentes, Pemex no dio respuestas en ese momento (Meras-Osorio, 2014).

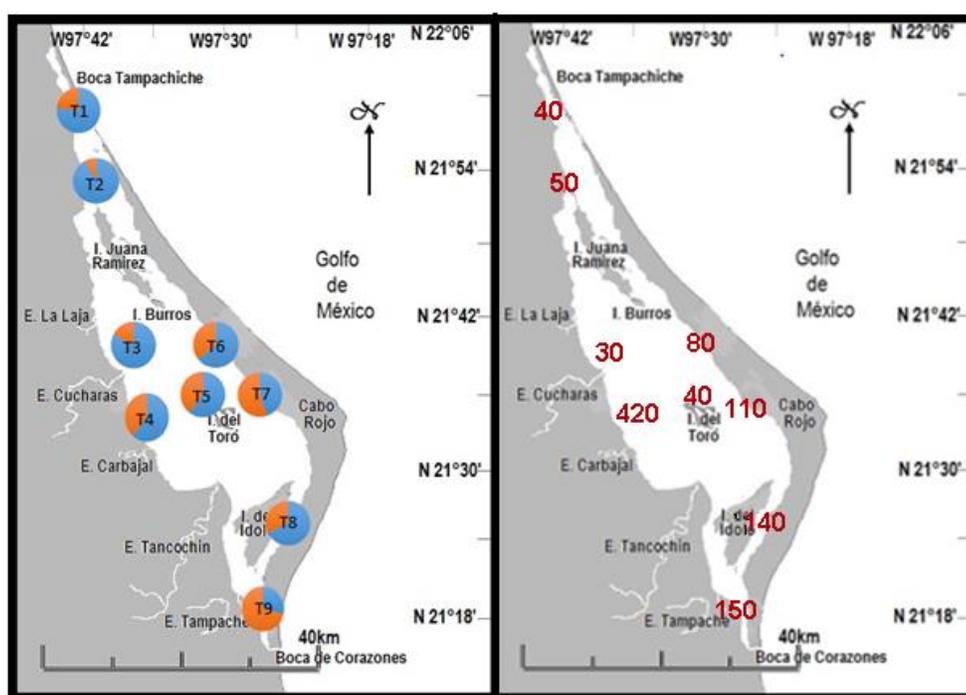


Figura 6. Izquierda: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de Tamiahua, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Derecha: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en µg/g.

En las muestras de la Laguna de Tamiahua (Fig. 6) los resultados mostraron que las estaciones de Tubo Pemex (T4), Cooperativa (T9) y el Aguacatal (T8) presentaron las concentraciones más altas en la fracción de HAPs totales, con valores de  $420 \pm 56.57 \mu\text{g/g}$  (T4),  $150 \pm 14.14 \mu\text{g/g}$  (T9) y  $140 \pm 28.28 \mu\text{g/g}$  (T8) en sedimento (Fig. 7).

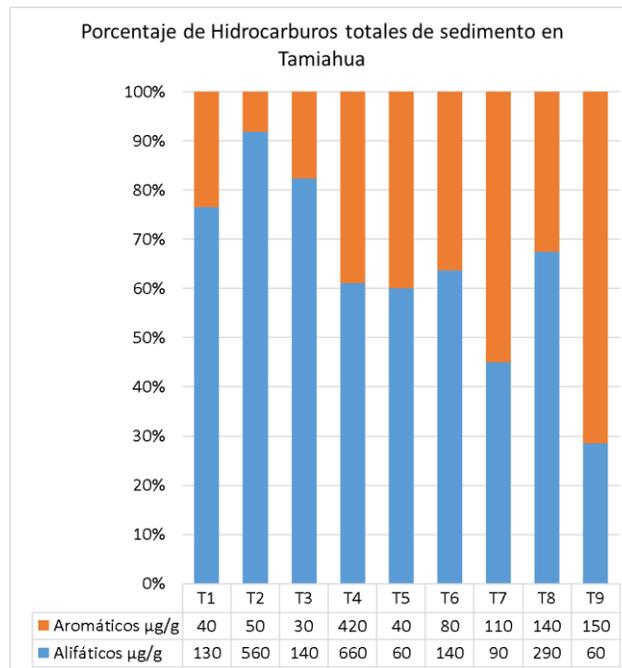


Figura 7. Porcentaje de Hidrocarburos Totales en sedimento superficial de la Laguna de Tamiahua.

La Laguna de Tamiahua se encuentra sobre la Faja de Oro terrestre, que fue descubierta en 1921 y que hasta la fecha se sigue explotando ([Industria Petrolera Mexicana, s.f.](#)). Esta zona se encuentra en la región hidrológica Tuxpan-Nautla, donde también se localiza el río Cazones.

El arroyo más impactado por la industria petrolera es Cocineros, que conecta con el río Cazones, donde se tomaron muestras de sedimento en enero de 2016. En las muestras de esta zona, los resultados de las concentraciones HTP de Dorantes-Avelino *et al.*, ([2017](#)), son hasta 60 veces más altas que las obtenidas en este estudio, y están fuera del límite máximo permisible; posiblemente se debe a que en el municipio de Coatzintla se presentaron dos derrames el 22 y 24 de octubre en el oleoducto que va de Poza Rica a Emilio Carranza. Esta situación se mantuvo por meses, quedando residuos de la contaminación que llegaron hasta el río Cazones ([Rodríguez, 2015](#)).

En la figura 8 se muestra el porcentaje de los Hidrocarburos totales del petróleo, donde se muestra el porcentaje para hidrocarburos aromáticos y alifáticos totales encontrados en sedimento superficial.

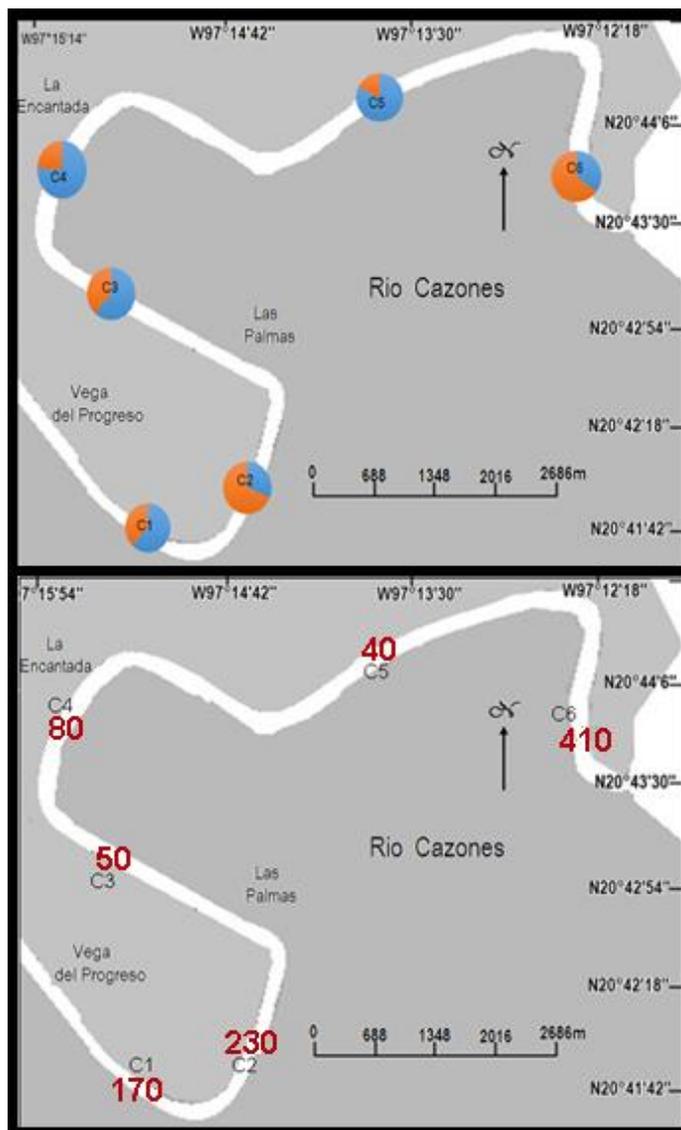


Figura 8. Superior: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de río Cazones, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Inferior: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en µg/g.

Con respecto a las concentraciones que se detectaron en el río Cazonos, se puede notar que las estaciones con mayor contenido de HAPs totales en  $\mu\text{g/g}$  son la estación C6 con  $410 \mu\text{g/g}$  de HAPs y la estación C2 con  $230 \mu\text{g/g}$  (Fig. 9).

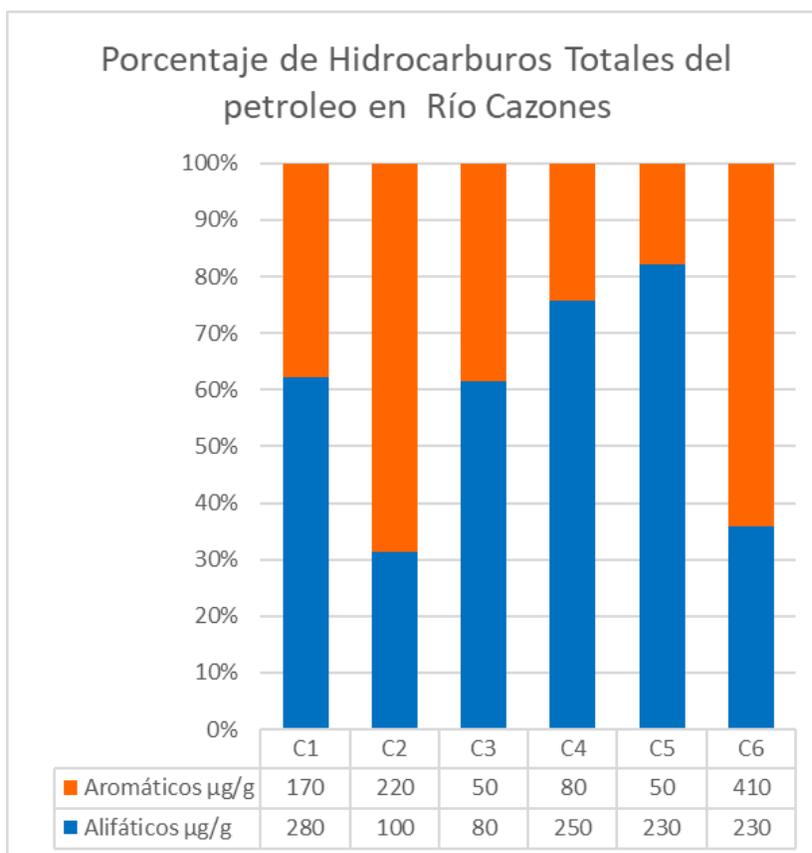


Figura 9. Porcentaje de HAPs totales en  $\mu\text{g/g}$  de sedimento de Río Cazonos.

En la Laguna de Alvarado, no se presentan tantos derrames por no estar cerca de los campos petroleros. De hecho, esta no es una zona de yacimientos importantes, como lo es la Faja de Oro Terrestre y Marina.

La Laguna de Alvarado presentó las concentraciones más altas de hidrocarburos en las estaciones de Salida Río Blanco (A2), obteniendo  $1120 \mu\text{g/g}$  de HTP en sedimento donde solo el 7% pertenece a la fracción aromática (Fig. 10).

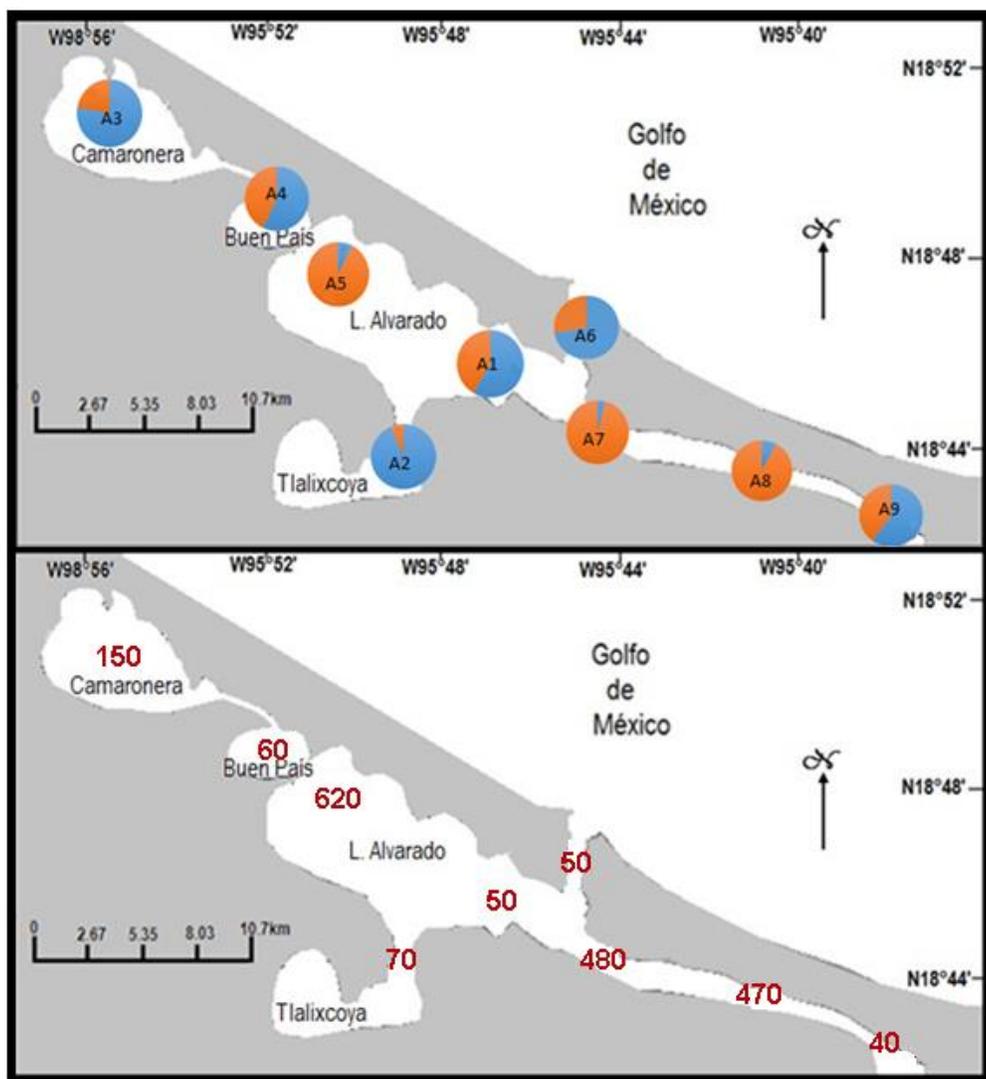


Figura 10. Superior: Porcentaje de Hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento superficial de Alvarado, en azul se representa a los Hidrocarburos Alifáticos y en naranja a los Hidrocarburos Aromáticos. Inferior: Concentraciones de la fracción aromática en sedimento superficial en µg/g.

Por su lado, la estación de A3 -Arbolillos (150 µg/g) y A5-Punta tía Pancha (620 µg/g) presentó un promedio de 445.5 µg/g en la concentración de los HTP (Fig. 11). Esto es similar a los datos registrados por Ponce-Vélez y Vázquez-Botello (2005).

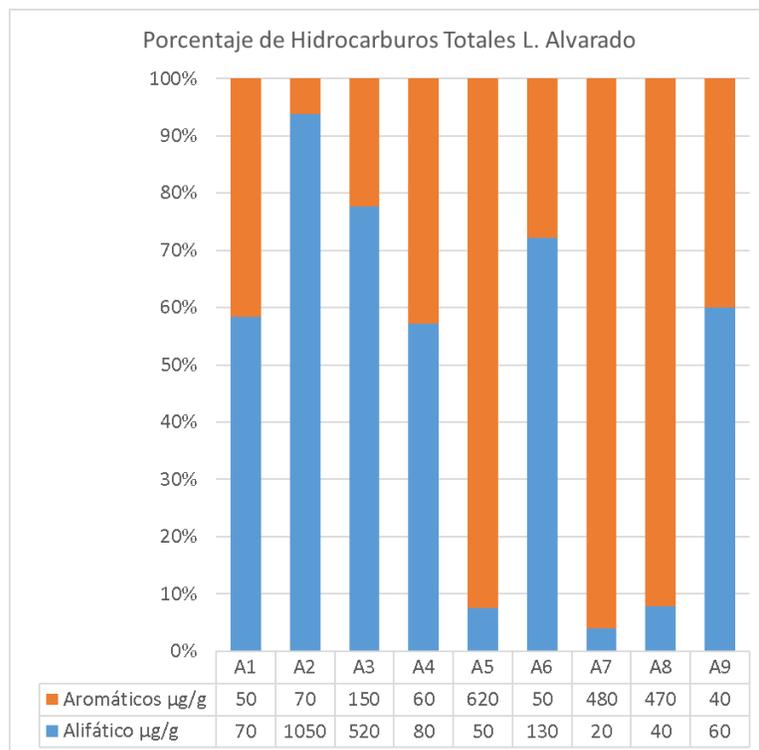


Figura 11. Cuantificación de HATs totales en  $\mu\text{g/g}$  de sedimento de la Laguna de Alvarado.

En estas tres zonas, los derrames accidentales en los pozos petroleros y fugas en los oleoductos no son atendidos e impactan a la salud del medio ambiente y a las especies de importancia comercial; por lo tanto, impactan a la salud humana.

Las concentraciones de Hidrocarburos aromáticos totales en sedimento fueron comparadas con los criterios de calidad sedimentaria establecida por Long *et al.* (1995). Estos criterios se basan en los niveles de efecto bajo (ERL) y los niveles de efecto medio (ERM), donde el primero es el intervalo de concentración menor para provocar efectos bentónicos adversos con un valor establecido de  $4.02 \mu\text{g/g}$  para la suma de HAPs y el segundo es el intervalo de niveles intermedios para impactar a los organismos bentónicos desde  $44.79 \mu\text{g/g}$  (Long y Morgan, 1990; Long *et al.*, 1995).

En la tabla 9 se muestran estos límites para cada hidrocarburo y el grupo al que corresponden en la clasificación de sustancias cancerígenas de la IARC. En el grupo 1 se incluyen los compuestos carcinógenos en humanos; en el grupo 2, los que son probablemente carcinógenos; en el grupo 2A, los que son posiblemente carcinógenos en humanos; en el grupo 2B, los que son carcinógenos en animales; y en el grupo 3, los compuestos para los que aún no hay pruebas de que puedan causar cáncer en el ser humano (IARC 2018).

Tabla 9. Características físicas de los HAPs, los niveles ERL y ERM para cada uno de estos compuestos, el grupo al que pertenecen en la IARC.

Numero de anillos	PAHs	Peso molecular (g / mol)	Punto de fusión (° C)	Punto de ebullición (° C)	Grupo IARC	ERL (ng / kg)	ERM (ng / kg)
2	Naftaleno	128	80.2	218	2B	160	2100
3	Acenaftileno	152	92.5	280	N / A	44	640
3	Acenafteno	152	93.4	279	3	16	500
3	Fluoreno	166	115	295	3	19	540
3	Fenantreno	178	99.2	340	3	240	1500
3	Antraceno	178	215	340	3	843	1100
4	Fluoranteno	202	108	384	3	600	5100
4	Pireno	202	151	404	3	665	2600
4	Benzo[a]antraceno	228	167	435	2B	261	1600
4	Criseno	228	258	448	2B	384	2800
5	Benzo[b]fluoranteno	252	168	481	2B	N / A	N / A
5	Benzo[k]fluoranteno	252	217	480	2B	N / A	N / A
5	Benzo[a]pireno	252	177	495	1	430	1600
5	Dibenzo [a,h] antraceno	278	270	524	2A	63.4	260
6	Indeno[1,2,3-cd]pireno	276	164	536	2B	N / A	N / A
6	Benzo[ghi]perileno	276	278	550	3	N / A	N / A
	$\Sigma$ PAHs					4,022	44,792

N / A: No hay registro para el compuesto

Se empleó el nivel de efecto umbral (TEL, por sus siglas en inglés) que tiene un valor de 1.6 µg/g para la suma de los HAPs y el nivel inferior del intervalo (PEL, por

sus siglas en inglés), donde a una concentración de 16.7  $\mu\text{g/g}$  se observan efectos adversos sobre la biota (Buchman, 2008).

Todas las estaciones presentan concentraciones superiores al nivel de efecto umbral (TEL) y superiores al nivel de efecto bajo en los bentos (ERL). Las estaciones de la Laguna de Tamiahua que están por debajo del ERM son Boca Tampachiche (T1), Cucharas (T3), y la estación Isla Toro (T5), con valores de 40  $\mu\text{g/g}$ , 30  $\pm$  14.1  $\mu\text{g/g}$  y 40  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente y todas las demás estaciones superan el criterio ERM, siendo las de mayor concentración la estación de Tubo Pemex (T4), Aguacatal (T8) y Cooperativa (T9), registrando valores de 420  $\pm$  56.5  $\mu\text{g/g}$ , 140  $\pm$  28.2  $\mu\text{g/g}$  y 150  $\pm$  14.1  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente (Fig. 12).

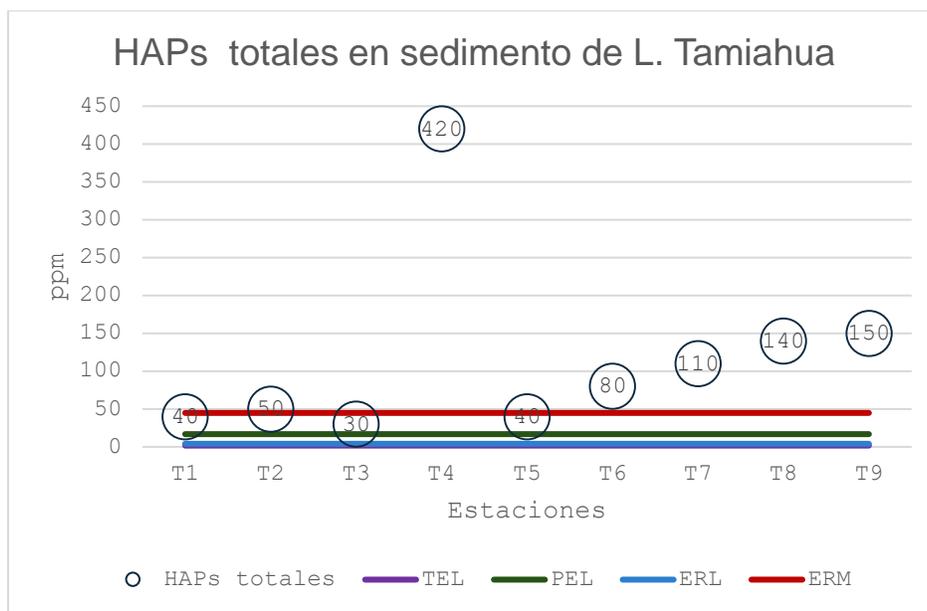


Figura 12. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales ( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de la Laguna de Tamiahua y los criterios relacionados con el daño de la fauna bentónica.

En el Río Cazones, las concentraciones de la fracción de HAPs totales fueron las estaciones Barra (C6), El torno (C2) y la estación Los Migueles (C1), registrando

los siguientes valores:  $420 \pm 84.9 \mu\text{g/g}$ ,  $220 \pm 28.3 \mu\text{g/g}$  y  $170 \pm 4.1 \mu\text{g/g}$ , respectivamente, para cada estación. Las concentraciones menores fueron para la estación de Las Palmas (C3) con  $50 \pm 42.2 \mu\text{g/g}$  y C5 =  $50 \pm 14.1 \mu\text{g/g}$ . Todas las estaciones de río Cazonos superaron los criterios de calidad TEL, PEL, ERL y ERM (Fig. 13).

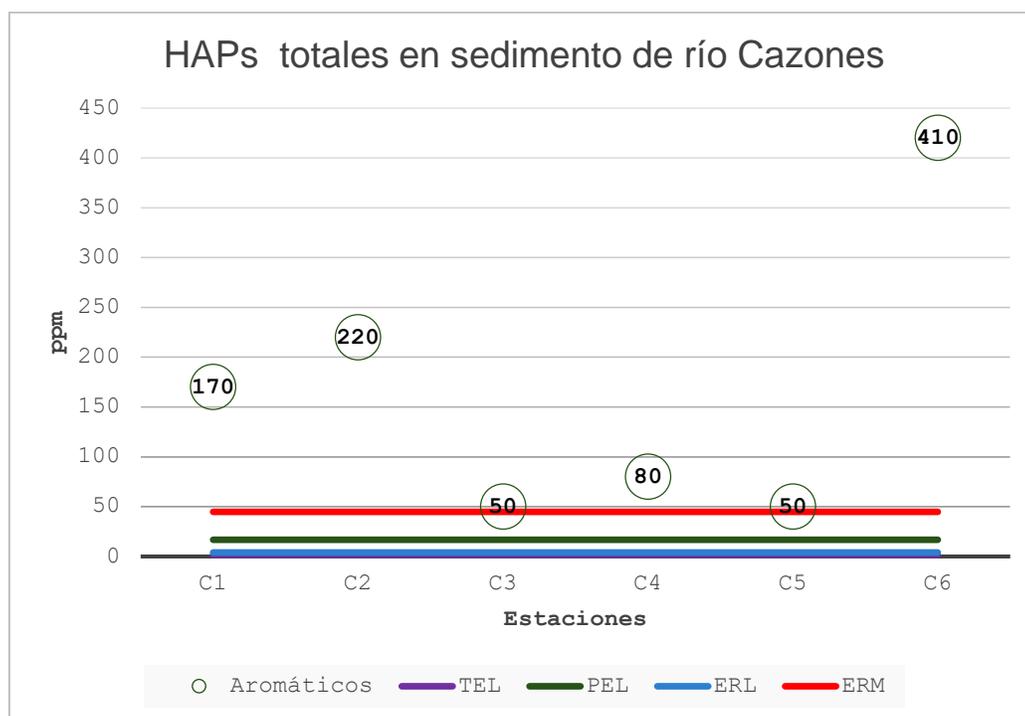


Figura 13. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales ( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de río Cazonos y los criterios de calidad relacionada con el daño de la fauna bentónica.

En la Laguna de Alvarado se encontró que, de las nueve estaciones, solo una está por debajo del criterio de calidad ERM =  $44.792 \mu\text{g/g}$ , con una concentración de A9 =  $40 \mu\text{g/g}$ . Esta estación recibe influencia del río Tlacotalpan. Las estaciones con mayor concentración son las estaciones A5 =  $620 \pm 226.27 \mu\text{g/g}$ , A7 =  $480 \pm 197.9 \mu\text{g/g}$  y A8 =  $470 \pm 98.9 \mu\text{g/g}$  (Fig.14).

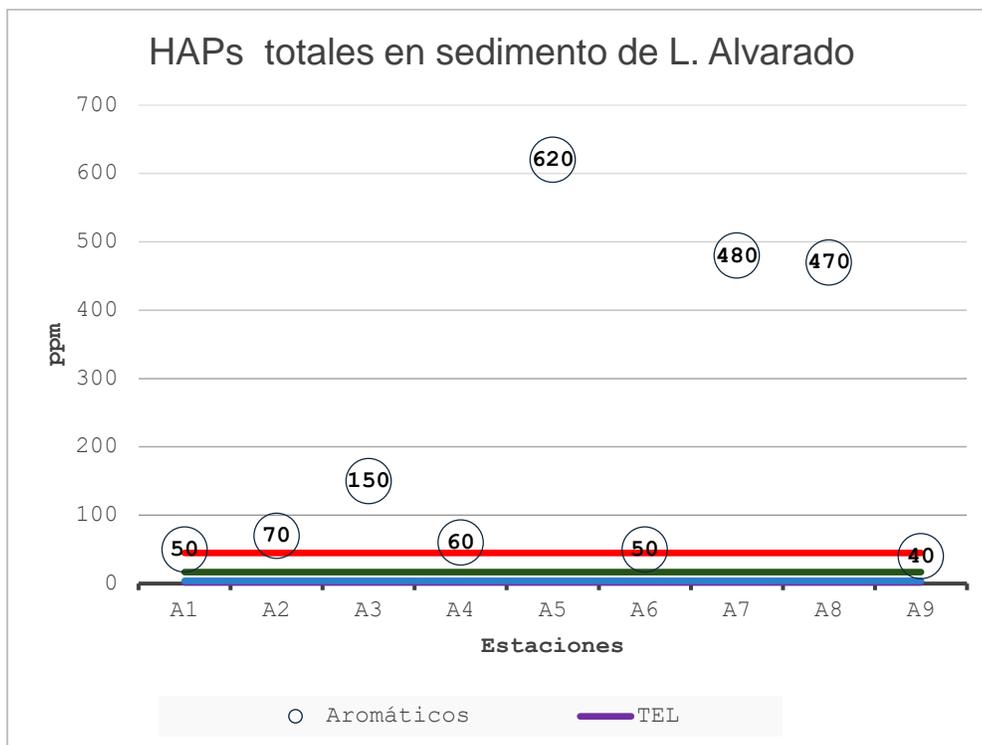


Figura 14. Concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos totales( $\mu\text{g/g}$ ) en el sedimento de la Laguna de Alvarado y los criterios de calidad relacionados con el daño de la fauna bentónica.

Para la determinación de hidrocarburos totales del petróleo en el músculo de *M. curema*, se utilizó el mismo método gravimétrico que en los sedimentos tomando en cuenta la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y la NMX-AA-146-SCFI-2008.

La cuantificación de los hidrocarburos obtenidos a partir de los ejemplares colectados en la Laguna de Tamiahua ( $630.5 \mu\text{g/g} \pm 192.1$ ), en la Laguna de Alvarado ( $475.9 \mu\text{g/g} \pm 128.5$ ) y en el Río Cazonas ( $442.9 \mu\text{g/g} \pm 85.36$ ) presentan un incremento estadísticamente significativo ( $p < 0.01$ ) con respecto al control ( $80.09 \mu\text{g/g} \pm 85.36$ ) (Fig.15).

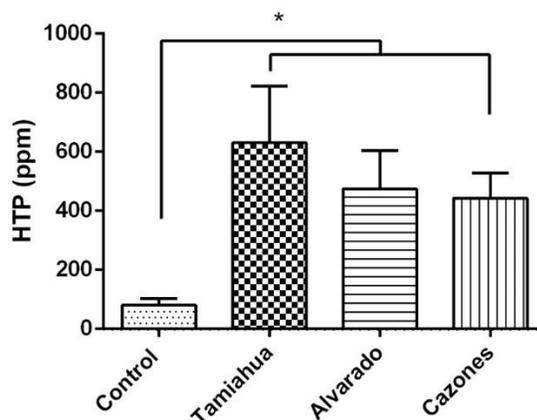


Figura 15. Comparación de entre los grupos de peces con concentraciones de HTP (ppm= $\mu\text{g/g}$ ). Los datos son representados como la media  $\pm$  ESM.

Se realizó un análisis cualitativo mediante UHPLC FLD-UV-VIS, donde estos compuestos orgánicos presentes en las muestras se separaron e identificaron por su fluorescencia. Se detectó la presencia de estos Hidrocarburos mediante la longitud de emisión que presentan. En la tabla 10 se muestran las longitudes de emisión de cada compuesto al utilizar longitudes de onda de excitación de 360 nm y 410 nm. Para identificar al Acenaftileno por UV-VIS se utilizó la longitud de onda 230 nm, ya que este compuesto no es fluorescente (Fig. 16).

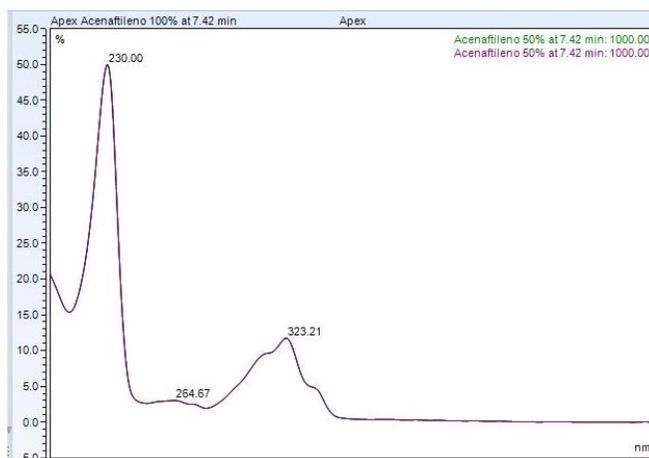


Figura 16. Identificación del espectro de UV-VIS de Acenaftileno con una  $\lambda_{\text{max}} = 230 \text{ nm}$ .

Tabla 10. Identificación de los picos de excitación y emisión para los hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados.

Componente	UV	Ex 360		Ex 410	
	Abs Max nm	Picos de Ex	Picos de Em	Picos de Ex	Picos de Em
<b>Naftaleno</b>		219.68	332.86	219.98	333.3
		266.06	469.76	275.89	
		276.49		311.87	482.21
<b>Acenaftileno 228nm</b>	230.02				
	263.62				
	323.1				
<b>Acenafteno</b>		227.27	331.31	328.13	331.31
		254.02	338.6	351.75	338.6
		289.85		378.13	
<b>Fluoreno</b>		206.43	312.53		
		236.03			
		263.16			
<b>Fenantreno</b>		203.57	355.1	207.99	355.1
		212.79	367.07	251.81	367.07
		251.44	476.78	281.57	476.78
<b>Antraceno</b>				227.37	383.96
				251.7	403.28
				339.62	424.15
<b>Fluoranteno</b>		213.33	449.24	211.89	445.71
		236.21	460.82	236.31	456.09
		287.35		286.99	
<b>Pireno</b>		240.75	333.63	240.66	333.6
		272.87	379.66	272.83	379.65
		335.13	392.69	335.3	392.69
<b>Benzo[a]antraceno</b>		223.58	367.73	223.09	367.73
		267.92	384.15	267.9	384.15
		288.01	402.1	281.6	402.1
<b>Criseno</b>					496.28
				223.82	331.32
				278.45	391.57
<b>Benzo[b]fluoranteno</b>				287.81	411.31
				216.55	328.34
				226.44	367.02
<b>Benzo[k]fluoranteno</b>				256.35	437.17
				239.25	363.46
				296.77	412.93
<b>Benzo[a]pireno</b>				307.37	433.57
				227.87	364.12
				264.18	408.97
<b>Dibenzo[a,h]antraceno</b>				285.02	430.94
				221.66	366.1
				297	399.26
<b>Benzo[g,h,i]perileno</b>				319.38	418.96
				218.77	373.16
				250.91	413.2

Hay que tener en consideración que cada HAP individual puede tener más de una longitud de onda en la que puede excitarse, por lo tanto, la selección de la excitación y emisión debe ser cuidadosa, con el fin de obtener un alto grado de selectividad en la detección de fluorescencia y encontrar los espectros específicos para cada uno de estos HAPs.

En la Figura 17, se muestran los blancos empleados para este análisis cualitativo. En este se observa una señal intensa correspondiente a los disolventes.

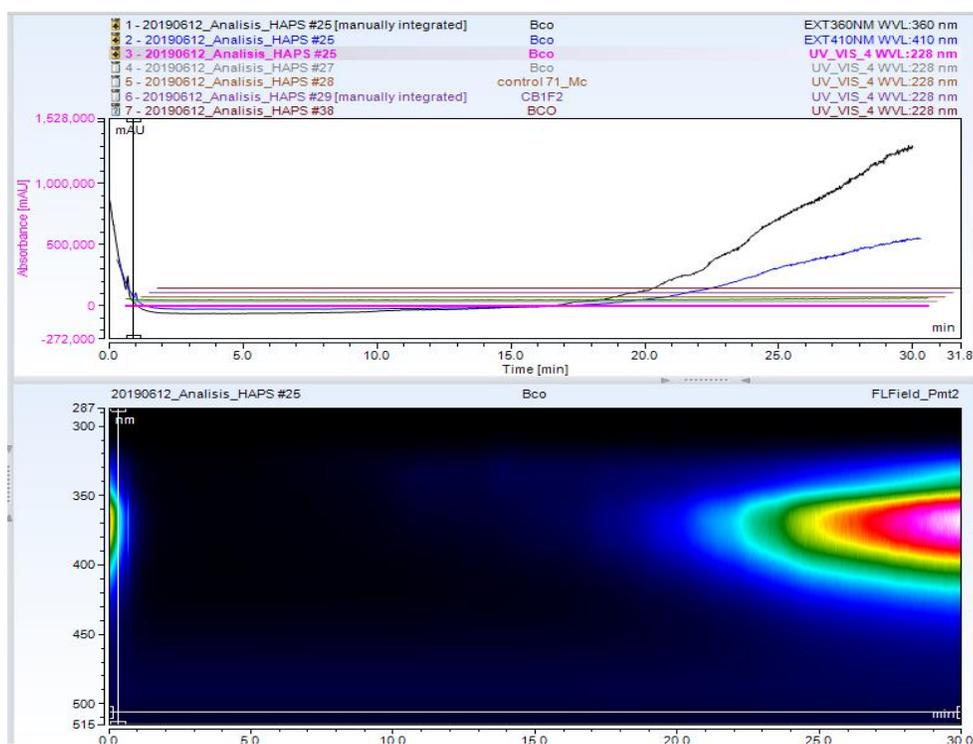


Figura 17. Corridas cromatográficas de blancos empleados para este análisis cualitativo. Imagen superior, cromatogramas de blancos sobrepuestos a distintas longitudes de onda. Imagen inferior, campo de fluorescencia con emisión de disolventes.

Se presentan los resultados cualitativos de los HAPs en sedimento de las estaciones T4, A6 y C6, estas muestras presentaron mayor concentración en la fracción aromática. En estas muestras se observan compuestos orgánicos menos

polares, que corresponden a los de mayor peso molecular, sobreponiéndose a la señal de los disolventes (Fig. 18).

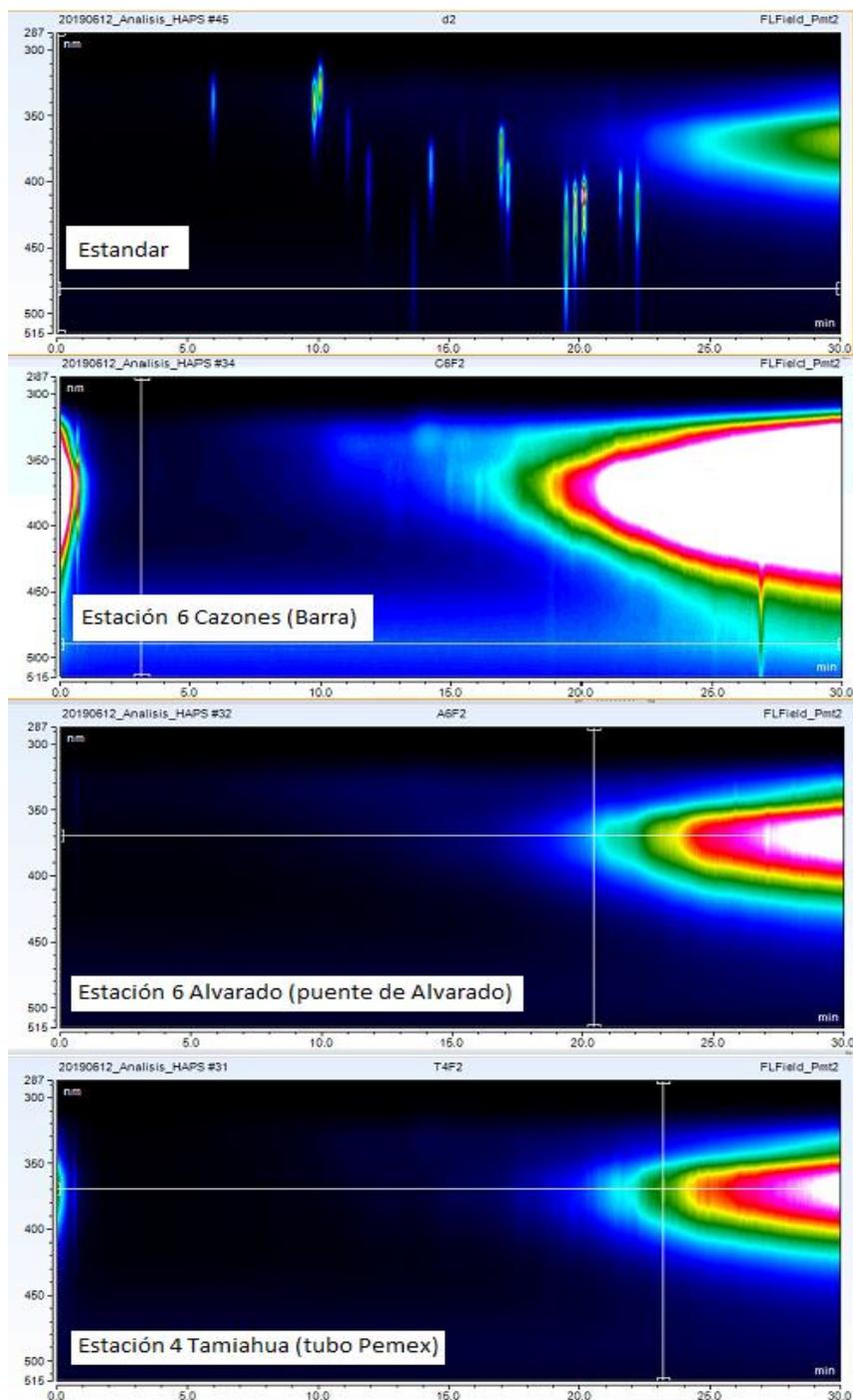


Figura 18. Comparativa de campos de fluorescencia en corridas cromatográficas de muestras de sedimentos de las estaciones Cazones 6, Alvarado 6 y Tamiahua 4.

En la figura 19, se muestra la comparación de una muestra tomada al azar de los pescados colectados de la Laguna de Tamiahua, que corresponde al número 72 comparada con un pescado control.

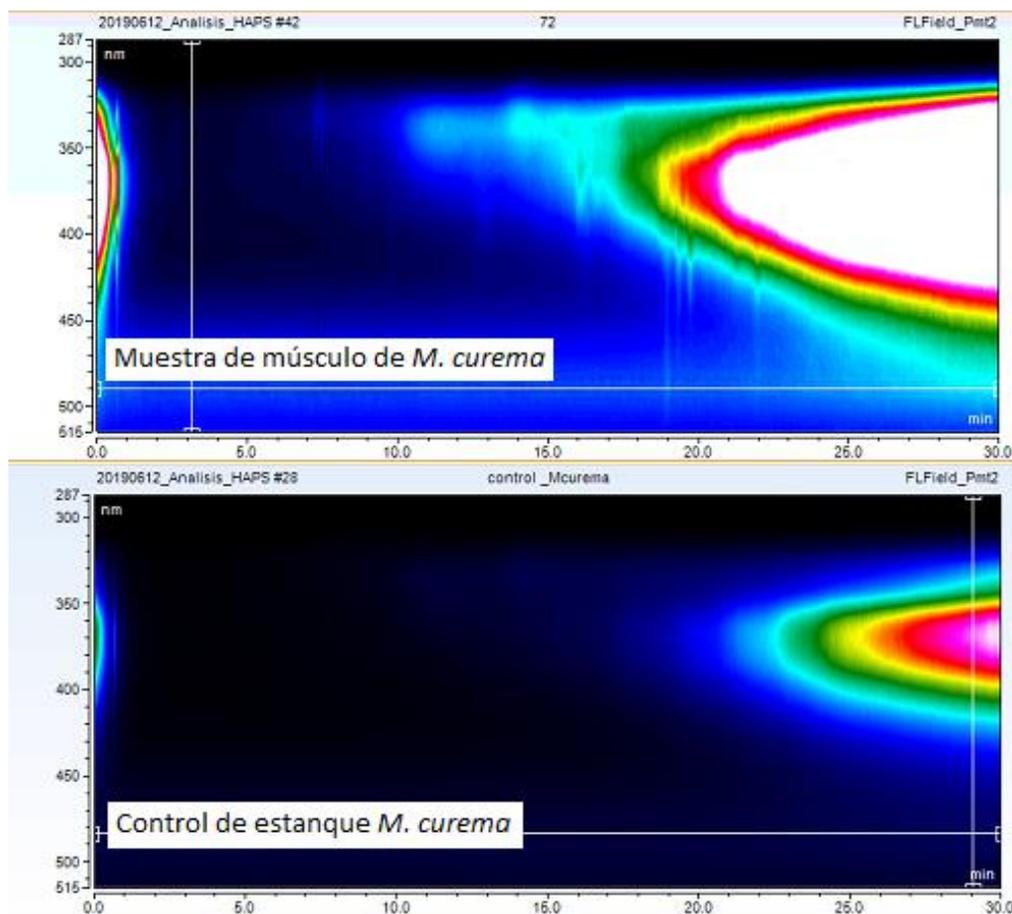


Figura 19. Comparativa de campos de fluorescencia en la corrida cromatográfica de muestra de peces de Veracruz 72.

Esta muestra solo contenía la presencia de Fluoranteno, la cual se pudo comprobar con la comparación de las longitudes de emisión, que son específicas para este compuesto (Fig. 20).

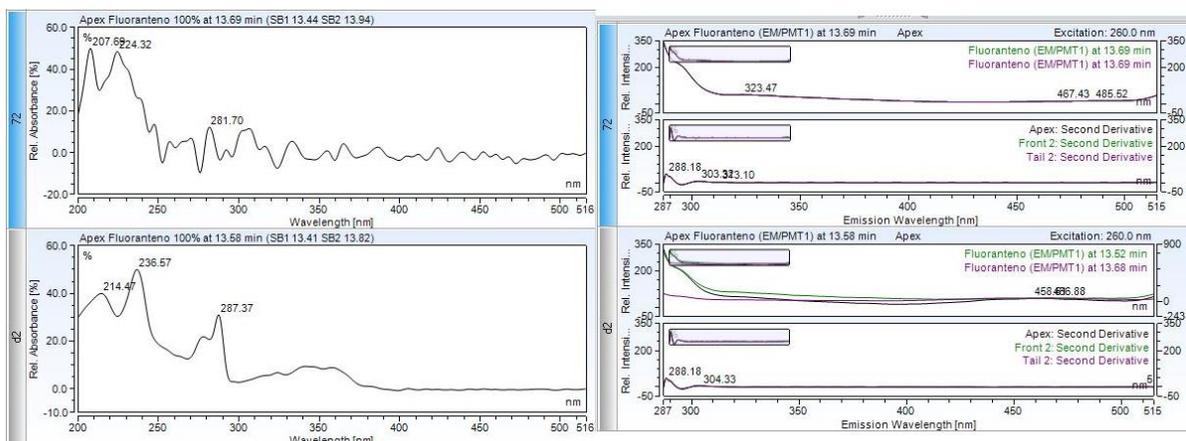


Figura 20. Presencia de Fluoranteno en muestra 72 de tejido de peces (panel superior) al ser comparada con las longitudes de excitación y de emisión de estándar de Fluoranteno (panel inferior).

Las siguientes longitudes de onda detectadas por el equipo no corresponden a las longitudes de onda registradas en la librería de HAPs del instrumento. Esto evidencia la presencia de otros compuestos orgánicos pertenecientes a la familia de los aromáticos.

Para la extracción de estas muestras se empleó hexano, lo que obliga a su evaporación a sequedad, para ser diluida subsecuentemente con acetonitrilo, que es la fase móvil (polar) más usada en la cromatografía de líquidos. En este sentido, Gonzalez-Amigo (1999) menciona que el Antraceno se degrada y disminuye su concentración al ser evaporado.

Gadzala y Buszewski (1995) mencionan que las reacciones químicas de los HAPs que tienen lugar en el medio ambiente se dividen en dos grupos, reacciones de sustitución y reacciones de adición, en las que se destruyen los enlaces insaturados.

Considerando estas transformaciones ambientales de los HAPs, la de mayor importancia es la fotooxidación, además de las reacciones que tienen lugar en la

atmosfera, por ejemplo, con el dióxido de azufre para la formación de aerosoles (Castaño-Vinyals, *et al.* 2004).

Esto puede hacer que las longitudes de onda varíen y no se puedan identificar los HAP insaturados. Debido a esto, la presencia de los otros compuestos orgánicos detectados en las muestras pueden ser el resultado de las transformaciones que experimentan los HAPs en el ambiente.

La identificación de HAPs en sedimento y músculo de pescado se realizó solo en algunas muestras, que fueron almacenadas desde el 2016 hasta su procesamiento en 2019.

El tiempo que recomiendan las normas para los análisis por cromatografía (CG-FID o HPLC-FL) es de máximo 40 días después de la colecta. Por lo tanto, es posible que el tiempo y las condiciones en las que las muestras estuvieron expuestas, hace que sea más difícil realizar una correcta detección de estos hidrocarburos. Los valores de las señales de las muestras analizadas están por debajo del límite de detección, lo que imposibilita su detección cuantitativa.

Los datos sobre las mezclas y concentraciones de contaminantes en sedimento, por sí solos, no proporcionan una base efectiva para estimar el efecto adverso para los recursos vivos (Long *et al.*, 1995)

## 10. Conclusiones

Mediante los resultados obtenidos de las muestras de sedimento por gravimetría, se concluye que la fracción aromática supera los niveles de criterios de calidad sedimentaria establecida por Long y col. (1995) en todas las muestras de sedimento de Tamiahua, río Cazonas y en la Laguna de Alvarado la única estación que está por debajo del criterio de calidad ERM es la estación A9 que recibe influencia del río Tlacotalpan.

Se comprobó la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos de 4 o más anillos en una muestra de músculo de los tres cuerpos de agua estudiados. Dentro de ellos, se identificó el Fluoranteno (4 anillos) por su espectro de emisión, aunque no se logró cuantificar por estar debajo del límite de detección del equipo.

Se logró comprobar la presencia de HAPs en una muestra de tejido. Se sugiere que es debido a sus hábitos alimenticios, ya que es un pez que se alimenta del sedimento, estando expuestos al consumo y bioacumulación de estos contaminantes, incorporándolo en su cuerpo.

No se lograron comparar los resultados con los límites máximos permisibles. Se recomienda hacer estudios donde el análisis de las muestras se lleve a cabo dentro de los 40 días recomendados, esto con el objetivo de obtener resultados cuantificables.

## 11. Perspectivas

En las últimas décadas no solo se ha estudiado la contaminación del ambiente y la calidad del sedimento para tener la certeza de que los organismos que interactúan con el sedimento están expuestos a los HAPs.

Considerando los avances tecnológicos y el uso de organismos para la detección de contaminación en ambientes acuáticos, los esfuerzos se podrían centrar en la salud humana, ya que como se ha mencionado con anterioridad, la lebrancha es un pez de importancia comercial que puede convertirse en una vía más que afecte a la salud humana, ya que los hidrocarburos, en especial en la fracción aromática están dentro de la clasificación de sustancias cancerígenas, del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC).

Al favorecer la disminución de las emisiones de estos compuestos tóxicos se podría ver la ausencia de compuestos en los peces de importancia comercial, y, por tanto, disminuir las vías de entrada en el humano.

## 12. Bibliografía

- Agency for Toxic Substances and The Registry of diseases. (ATSDR). 1998. Toxicological Review of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Atlanta GA: Department of Health and Human Services U.S., Public Health Service.
- Aguirre-Gómez R. 2004. La observación de impactos en el Golfo de México mediante imágenes de satélite. En: Caso M, Pisanty I. y Ezcurra E. (Comps) Diagnóstico ambiental del Golfo de México Vol. II. pp.637–1047 México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología, A.C. Harte Reserch Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Arencibia-Carballo G, Sanchez-Alvarez F. y Seisdedo Losa M. 2014. Determinación de hidrocarburos aromáticos en sedimentos superficiales de la zona costera del golfo de Guacanayabo, Cuba. Boletin Científico CIOH 32, 17-25.
- Boström C.E., Gerde P., Hanberg A., Jernstrom B., Johansson C., Kyrklund T., Rannug A., Tornqvist M., Victorin K., Westerholm R., 2002. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambiarent air. Environ. Health Perspect. 110 (Suppl. 3), 451e488
- Botello, A. V., & B., L. G. Calva. 1998. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Pueblo Viejo, Tamiahua, and Tampamachoco Lagoons in the Southern Gulf of Mexico. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 60(1), 96–103. doi:10.1007/s001289900596
- Buchman, M. F. 2008. NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA., Office of Response and Restoration Division, National oceanic and Atmospheric Administration 34p.
- Calderer R. A. 1993. Cultivo de mugílidos. 415-424p. En: Castelló-Orvay (coord.). Acuicultura marina: fundamentos biológicos y tecnología de la producción. Vol 4 de Ciències experimentals i matemàtiques. Edicions Universitat Barcelona.

- Calva-Benítez, L.G. y Torres-Alvarado R. 2007. Contaminantes prioritarios en el agua, sedimento y organismos. Pp 634-675. En: (Eds.) Limnología de presas mexicanas: aspectos teóricos y prácticos. AGT S.A., México, D.F. 899pp.
- CARIPOL. 1986. Manual para el análisis de hidrocarburos del petróleo en sedimentos y organismos marinos. Subcomisión IOCARIBE/COL. Cartagena, Colombia.
- Castañeda L.O. y F.E. Contreras. 2001. Serie: Bibliografía Comentada sobre ecosistemas costeros mexicanos 2001. Centro de Documentacion Ecosistemas Litorales Mexicanos. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Division C.B.S. Depto. De Hidrologia. Publicacion electrónica (CD). ISBN: 970-654-912-9 México, D.F. [www.gulfbase.org/bay/view](http://www.gulfbase.org/bay/view)
- Castaño-Vinyals, G. Errico, A. Malats, N. Kogevinas, M. 2004. Biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental air pollution. Occupational and Environmental Medicine. 61:e12
- Castaño Vinyals G., D'Errico A., Malats N. y Kogevinas M. 2004. Biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental air pollution. Occup. Environ. Med. 61:e 12 <http://oem.bmj.com/content/61/4/e12>
- Chao, L., Jelks, H., Espinosa-Perez, H., Vega-Cendejas, M. y J. Tolan. 2015. *Mugiliza*. The IUCN Red List of Threatened Species 2015: e.T190409A69522812. Downloaded on 01 June 2018
- CONAPESCA. 2017. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2017. Recuperado de: [https://www.conapesca.gob.mx/work/sites/cona/dgppe/2017/ANUARIO\\_ESTADISTICO\\_2017.pdf](https://www.conapesca.gob.mx/work/sites/cona/dgppe/2017/ANUARIO_ESTADISTICO_2017.pdf)
- Contreras, E. F. 1993. Ecosistemas costeros mexicanos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. 415pp.

Dixon, D.R., A.M. Pruski, R.J.L Dixon y N.A. Jha. 2002. Marine invertebrate ecogenotoxicology: a methodological overview. *Mutagenesis*. 17 (6):495-507.

Diario Oficial de la Federación (DOF).2014. Plan de Manejo Pesquero de lisa (*Mugil cephalus*) y lebrancha (*Mugil curema*), en las costas de Tamaulipas y Veracruz. [www.dof.gob.mx](http://www.dof.gob.mx)

Diario Oficial de la Unión Europea. L364. Reglamento (CE) no° 1881/2006 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios disponible en: EUR-Lex - 02006R1881-20201014 - ES - EUR-Lex (europa.eu)

Dorantes Avelino, R. Alvarado Pérez A., Solís García G., y J.J. Ahumada Abraham. 2017. Evaluación regional del impacto antrópico sobre el agua y suelo en la cuenca del Rio Cazones. Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica. 70-78 CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO DE LAS INGENIERÍAS. <http://sutitspr.com.mx/sindicato/publicaciones/libro2.pdf> ISBN 978-607-97461-1-7.

Franco L. y Bashirullah K. M. B. 1992. Alimentación de la lisa (*Mugil curema*) del golfo de Cariaco – Estado Sucre, Venezuela. FONAIAP. Estación Experimental Falcón. Campo Experimental Las Piedras, estado Falcón. Instituto Oceanográfico-UDO. Cumaná, estado Sucre. Zootecnia Tropical. Vol. 10(2):219-238.

Franz H y V. Jendreizik. 2015. Fluorescence Method Development Handbook. Thermo Fisher Scientific, Germering, Germany. 15p

Gadzala R. M. y Buszewski B. 1995. Properties and determination of Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using chromatographic methods. Polish J. Environ. Studies, 4 (1), 5-15.

- García Alonso S. y Pérez Pastor R. M. 2012. Aplicaciones de la Cromatografía líquida con Detector de Diodos y Fluorescencia al Análisis de Contaminantes Medioambientales. Informes Técnicos Ciemat 1247.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. UNAM. México. 217 pp.
- Gary D. Christian. 2009. Química analítica. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. (Sergio Sarmiento Ortega y Virgilio González y Pozo, Trad.) 6ta edición. 831p. ISBN: 978-970-10-7234-9
- Gogou, A., I. Bouloubassi, y E.G. Stephanou. 2000. Marine organic geochemistry of the Eastern Mediterranean: 1. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in Cretan Sea surficial sediments. *Mar. Chem.* 68: 256-282.
- Gold-Bouchot, G. 2004. Hidrocarburos en el sur del Golfo de México. Pp 655-678. En: Caso, M., Pisanty, I. y Escurra, E. (Eds.) Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Vol.2. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología, A.C., Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Gonzalez-Amigo S. 1999. Estudio de niveles de Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos (PAHs) en aves rapaces y sus implicaciones en el ecosistema. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 112pp.
- Gremm, T.J y F.H Frimmel. 1994. Application of liquid chromatography-particle beam mass spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry for the identification of metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons. *chromatography* 38: 781-788
- Herrera, M. J. y M. C. V. Chaves. 2012. Validación de un método de análisis para la determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por cromatografía líquida de alta eficiencia en partículas PM10 y PM2,5. Tecnología en Marcha. Vol. 25, N°3, Julio-Septiembre. 39-49p.

- IARC, 1987. International Agency for Research on Cancer. Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Overall Evaluation of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monograph Vol. 1 to 42. Suppl. 7. 440p disponible en: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/index.php> última consulta 14/05/2019
- IARC, 2018. International Agency for Research on Cancer. Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-129. Última actualización 29 de junio de 2021. Recuperado de: <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>
- Ibáñez, A. L., & Montero, D. Y. (2018). Observation of the presence of crypsis in white mullet *Mugil curema* (Pisces: Mugilidae) juveniles under artificial rearing conditions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1–5. doi:10.1017/s0025315417001990
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal), Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Veracruz, Cazones de Herrera. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30033a.html> Última consulta 10/09/2015
- INEEC. 2018. Evaluación de Contaminantes Atmosféricos en San Luis Potosí, San Luis Potosí. Documento Ejecutivo. Coordinación General de Contaminación de Salud Ambiental Dirección de Laboratorios del INECC. 32p
- Juhasz, A.L., y R. Naidu. 2000. Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of Benzo(a)Pyrene. *Science Direct*.
- Long E. R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., Clader, F.D. 1995. Incidence of adverse effects within ranges of chemical concentration in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19(1), 81-97

- Long E. R., y Morgan L.G. 1990. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Tech. Memo. NOS OMA 52. US National Oceanic and Atmospheric Administration, Saettle, Washington, 175pp.
- Masrat, R., Maswal, M., y Dar, A. A. 2012. Competitive solubilizacion of naphthalene and pyrene in varios micellar systems. *Journal of Hazardous Materials*, 244-245, 662-670.
- McGlashan DJ, Hughies JM .2001 Genetic evidence for historical continuity between populations of the Australian freshwater fish *Craterocephalus stercusmuscarum* (Atherinidae) east and west of the Great Diving Range. *J Fish Biol* 59:55–67
- Meraz-Osorio, S., 2015. Otra derrama de petróleo. *El Heraldo de Tuxpan*, [online] p.1. Disponible en: <https://elheraldodetuxpan.com.mx/estado/tamiahua/10508-otra-derrama-de-petroleo.html> [Accessed 11 July 2021].
- Montory M., Chisng G., Fuentes-Rios, D., Palma-Fleming H., y Barra R. 2008. Binenilos Policlorados (PBCs) e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en el sedimento del Mar interior de Chiloé, Resultado del Crucero CIMAR 10. *Revista Ciencia y Tecnologia del Mar*. Vol 31(1)
- Morales- Gordillo G. y Paredes- Cruz L. 2005. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Consejo Estatal de Protección al Ambiente y Gobierno del Estado de Veracruz.
- Moreno-Alcántara J., Díaz-Godoy R. V., Castellanos-Monguel M.J., Núñez M.T., Sierra-Vargas M.P y D.M. Estrada-Ovando.2017. Determinación de material particulado PM<sub>2,5</sub> asociado a hidrocarburos aromáticos policíclicos en la zona metropolitana del Valle de Toluca. CA-019, *Memorias de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales*. *Rev. Int. Contam.Ambie*. Vol. 34

- Muñoz F., Barriga R., Cabrera M., Vera E., y López C. 2010. Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en peces y sedimentos en la zona de Shushufindi, Scumbios, Ecuador.
- Nair, D., Fernández-Acero, F.J., García-Luque, E., Riba, I. y Del Valle, T.A. 2008. Isolation and characterization of naphthalene-degrading bacteria from sediments of Cadiz ares (SW Spain). *Environ. Toxicol.* 23:576-582 En: Zambrano, M., Casanova, R., Prada J., Arencibia, G., Vidal, A., Capetillo, N. 2012. Bioacumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en *Anduviera tuberculosa* (Sowerby, 1833) (arcoidea: arcidae). *Revista Gayana (Concepc.)* 76 (1):1-9
- NMX-146-SCFI-2008. Suelos-Hidrocarburos Aromaticos Policíclicos (HAP) por Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (CG/EM) o Cromatografía de Líquidos de alta resolución con detectores de Fluorescencia y Ultravioleta visible (UV-VIS) Método de Prueba.
- NMX-AA-146-SCFI-2008. 2009. Suelos – Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAP) por cromatografía de Gases/Espectrometría de masas (CG/EM) o cromatografía de líquidos de alta resolución con detector de Fluorescencia y Ultravioleta Visible (UV-VIS) – Método de Prueba. Publicada la declaración de vigencia en el Diario de la Federación el 26 de marzo de 2009.
- NOM-035-SEMARNAT-1993. Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Diario Oficial de la Federación.
- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. 2013. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelo y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificación para la remediación. Diario Oficial de la Federación. 16p
- Noreña-Barroso, E., O. Zapata-Pérez; V. Ceja-Moreno y G. Gold-Bouchot 1998. Hydrocarbons and Organochloride Compounds in Sediments from Bay of

- Chetumal, Mexico. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 61(1): 80-87.
- Partida-Gutiérrez, D.; Villaescusa-Celaya, J.; Macías-Zamora, J. y Castellón, F. 2003. Contaminantes orgánicos persistentes en núcleos de sedimentos de la región sur de la Cuenca de las Californias. Ciencias Marinas, 29 (4): 521-534
- Penner, M. 1998. Ultraviolet, Visible, and Fluorescence Spectroscopy. Chapter 26. In "Food Analysis" 2 Ed. Aspen Publication, Maryland, EUA. Edt. Suzanne Nielsen. pp. 397- 412. Citado en: Valls Puig, Jaime. (2004). Validación de metodologías de cromatografía líquida de alta resolución en alimentos. 10.13140/RG.2.2.26411.85289.
- PMDC. 2014. Plan Municipal de Desarrollo Cazonas, Veracruz 2014-2017. Gobierno del Estado de Veracruz. [www.orfis.gob.mx](http://www.orfis.gob.mx)
- Ponce-Veléz, G. y A. Vázquez-Botello. 2005. Niveles de hidrocarburos en el Golfo de México, p. 269-298. In: A. Vázquez-Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnostico y Tendencias, 2da Ed. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Auto. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696p
- Portilla-Ochoa E. 2003. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Instituto de Investigaciones Biológicas y Universidad Veracruzana.
- Rakoff H. y Rose N. C. 1975. Química Orgánica Fundamental. Ed. Limusa. México. 890p.
- Reséndez, A. & A. Kobelkowsky. 1991. Ictiofauna de los sistemas lagunares costeros del Golfo de México, México. Universidad y Ciencia 8: 91-110.
- Reséndez, M. A., 1973. Estudio de los peces de la Laguna de Alvarado, Veracruz, México. Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. 34: 183-281

- Rodríguez, J. 2015. Derrame de petróleo llega al Río Cazonos de Veracruz. Noreste. <https://www.noroeste.com.mx/nacional/derrame-de-petroleo-llega-al-rio-cazones-de-veracruz-AJNO915270> [Accessed 11 July 2021].
- Sánchez- Rueda P., González Mar I., Ibáñez Aguirre A. L. y A. Márquez García. 1997. Sedimento en el contenido estomacal de *Mugil cephalus* y *Mugil curema* (Mugiliformes: Mugilidae) en la Laguna de Tamiahua, México. Rev. Biol. Trop. 45(3) 1163-1166
- SEDEMA. 2011. Gobierno de Veracruz. Ordenamiento Ecológico del Territorio Estatal. <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/ordenamiento-ecologico-del-territorio-estatal/> Última consulta: 08/09/2015
- SEFIPLAN, Gobierno de Veracruz, 2015. Sistema de Información Municipal. Cuadernillos Municipales. Cazonos de Herrera. <http://www.veracruz.gob.mx/finanzas/files/2015/05/Cazonos-de-Herrera.pdf> Última consulta 09/09/2015
- Sepúlveda G. E., Loyala S. R., Neira H. J., Neira G. F. 2013. Contenido, distribución y origen de hidrocarburos en sedimento en tres lagunas urbanas de Concepción-Chile. Quim. Nova. 36 (5): 669-674.
- Sobrino-Figueroa A., A. V. Botello, y S. Villanueva-Fragoso. 2005. Efectos de compuestos genotóxicos de tres sistemas costeros de Veracruz, p. 141-156. En: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnostico y Tendencias. 2da Edición. Univ. Autón. De Campeche, Univ. Nal. Autón de México, instituto Nacional de Ecología. 696p.
- Story, S., Parker, S.H., Hayasaka S.S., Riley M. B. y Kline E. L. 2001. Convergent and divergent points in catabolic pathways involved in utilization of fluoranthene, naphthalene, anthracene, and phenanthrene by *Sphingomonas paucimobilis* var. EPA505. Journal of industrial microbiology & biotechnology. 26. 369-82. 10.1038/sj.jim.7000149.

Triola, M. F. 2009. Estadística. Décima edición. PEARSON EDUCACIÓN, México.  
ISBN: 978-970-26-1287-2

UNAM.2007. Facultad de química, Técnicas Cromatográficas recuperado de:  
[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/M.Cromatograficos\\_6700.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/M.Cromatograficos_6700.pdf)

UNEP (United Nations Environment Programme). 1992. The composition and distribution of saturated and Aromatic Hydrocarbons in Nearshore Sediments, River Sediments, and Coastal Peat of the Alaskan Beaufort Sea: Implications for Detecting Anthropogenic Hydrocarbon Inputs. *Mar. Environ. Res.* 33(4): 223-253.

UNEP/FAO/IOC/IAEA. 1993. Guidelines for Monitoring Chemical Contaminants in the Sea using Marine Organisms. Reference method for marine pollution studies No. 6. United Nations Experts Pollution (UNEP).

USEPA. 2010. Method 1664: N-Hexane Extractable Material (HEM) and Silica Gel Treated N-Hexane Extractable Material (SGT-HEM) by Extraction and Gravimetry (Oil and Grease and Total Petroleum Hydrocarbons).

Van Metre, P. C. y B. J. Mahler. 2005. Trends in hydrophobic organic contaminants in urban and reference lake sediments across the United States. *Environ. Sci. Technol.* 39: 5567-5574.

Wade T.L., D.J. Velinsky., J. Rainharz. 1994. Tidal river sediments in the Washington D.C. area. II. Distribution and sources of organic contaminants. *Estuaries* 17(2): 321-333.

Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Vingarzan, R., Mitchell, R.H., Goyette, D., Sylvestre, S. (2002). PAHs in the Fraser river basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 33: 489-515

Zambrano, M., Casanova, R., Prada J., Arencibia, G., Vidal, A., Capetillo, N. 2012. Bioacumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en *Anduviera tuberculosa* (Sowerby, 1833) (arcoidea: arcidae). *Revista Gayana (Concepc.)* 76

(1): 1-9 disponible en:  
[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S071765382012000200001](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071765382012000200001)



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

# ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00206

Matrícula: 2153805300

Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en sedimento y músculo de *Mugil curema* utilizando cromatografía de líquidos de ultra-alta eficacia (UHPLC) acoplada a un detector de Fluorescencia.

Con base en la Legislación de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México se presentaron a las 10:00 horas del día 15 del mes de febrero del año 2022 POR VÍA REMOTA ELECTRÓNICA, los suscritos miembros del jurado designado por la Comisión del Posgrado.:

DR. ALEJANDRO ISLAS JACOME  
M. EN B.E. SERGIO HUMBERTO ALVAREZ HERNANDEZ  
DR. LEOBARDO MANUEL GOMEZ OLIVAN  
DRA. ALMA SOCORRO SOBRINO FIGUEROA




DIANA YESSICA MONTERO DELGADILLO  
ALUMNA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN BIOLOGIA

DE: DIANA YESSICA MONTERO DELGADILLO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

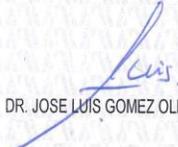
REVISÓ



MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ  
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBS



DR. JOSE LUIS GOMEZ OLIVARES

PRESIDENTE



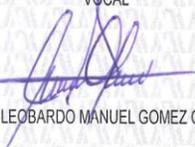
DR. ALEJANDRO ISLAS JACOME

VOCAL



M. EN B.E. SERGIO HUMBERTO ALVAREZ HERNANDEZ

VOCAL



DR. LEOBARDO MANUEL GOMEZ OLIVAN

SECRETARIA



DRA. ALMA SOCORRO SOBRINO FIGUEROA