

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Distribución espacial, identificación del origen y evaluación del riesgo ambiental de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en los sedimentos del río Coatzacoalcos

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Ambiental

P R E S E N T A

Alejandra Janice Juárez Cabrera

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hugo Fernando Olivares Rubio



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISTRIBUCION ESPACIAL, IDENTIFICACION DEL ORIGEN Y EVALUACION DEL RIESGO AMBIENTAL DE LOS HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS EN LOS SEDIMENTOS DEL RIO COATZACOALCOS. que presenté para obtener el titulo de INGENIERA AMBIENTAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ALEJANDRA JANICE JUAREZ CABRERA
Número de cuenta: 318225713



Este trabajo de tesis, *"Distribución espacial, identificación del origen y evaluación del riesgo ambiental de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en los sedimentos del río Coatzacoalcos"*, fue desarrollado en el Laboratorio de Contaminación Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la supervisión del Dr. Hugo Fernando Olivares Rubio, responsable e investigador del laboratorio.

La presente investigación se llevó a cabo en el marco del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), con el número de proyecto IA202525, titulado *"Monitoreo y riesgo ambiental de contaminantes de origen industrial en los recursos pesqueros de la cuenca baja del río Coatzacoalcos"*. Agradezco a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA-UNAM) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para la realización de este trabajo.

A mis abuelitos **Eduardo** y **Silvia** (Q.E.P.D.), con todo mi amor y admiración...

Por enseñarme, sin saberlo, a ser resiliente y a seguir mis ideales, incluso en los momentos más difíciles. Por su amor incondicional, por las historias compartidas y por acompañarme de muchas formas y colores, incluso después de su partida.

Esta tesis representa más que un trabajo académico; también es una forma de honrar sus vidas, sus valores y su legado. Gracias por ser mis raíces, mis cimientos y mi inspiración constante.

Siempre conmigo,
Chiquitina.

Agradecimientos

A toda mi familia, cuyo amor ha sido genuino. A mis padres, Alejandra Cabrera y Juan Manuel Juárez, por ser grandes guías a lo largo de mi formación académica y por alentarme a ser tan profesional como ustedes. A mi tía y madrina, Claudia Cabrera, por su calidez y apoyo.

A todos mis amigos y compañeros, por ser la familia que elegí. A mis queridas amigas Estefanía Ugarte, Ilse Hernández, Ximena Islas y Natalia Ordaz, por su auténtica amistad que ha perdurado con el tiempo. Y a mis colegas, especialmente a Sebastian Ramos, Ian El'hore y Maritza Arias: sin ustedes, la carrera no habría sido la misma. Gracias por las risas y el estrés compartidos, queridos ingenieros e ingeniera.

A la UNAM, por ser un faro de conocimiento interdisciplinario. Gracias por brindarme la invaluable oportunidad de crecer académica y humanamente. A la Facultad de Ingeniería, gracias por ser un espacio de retos, descubrimientos y aprendizajes constantes. Sin duda, tuve el honor de aprender de excelentes profesores, cuya entrega es una motivación; gracias por su exigencia.

A la Dra. Guadalupe Ponce, por la confianza que me brindó al integrarme al laboratorio desde mis primeros años de carrera. Su dedicación, sabiduría y calidad humana son cualidades que admiro profundamente y a las que aspiro algún día, con la misma pasión y compromiso que la distinguen.

Al Dr. Hugo Olivares, por su tiempo, disposición y valioso acompañamiento durante mi participación en el proyecto y en el desarrollo de esta tesis. Además, agradezco la confianza depositada al permitirme formar parte de su equipo durante la segunda campaña de muestreo.

A todo el laboratorio de Contaminación Marina, por sus enseñanzas diarias. De manera especial, a la Q. Nimbe Lazcano y a la Biól. Fernanda Lázaro por su apoyo técnico y amistad.

A las comunidades de lancheros y pescadores del río Coatzacoalcos, por su valiosa guía y colaboración. Espero sinceramente que los resultados obtenidos contribuyan a visibilizar las problemáticas que enfrentan y sumen al camino hacia la justicia socioambiental.

A la biota recolectada y a toda la vida que resiste en un ecosistema profundamente afectado por la contaminación, gracias por permitirnos conocer, con profundo respeto, los impactos que muchas veces pasan desapercibidos a través de ustedes.

Índice general

Dedicatoria 2
Agradecimientos 3
Índice de figuras 6
Índice de tablas 7
Lista de acrónimos 8
Capítulo 1. Introducción 10
1.1. Planteamiento del problema 11
1.2. Justificación 12
1.3. Objetivos 13
1.4. Hipótesis 13
Capítulo 2. Marco teórico 14
2.1. Hidrocarburos aromáticos policíclicos 14
2.1.1. Características fisicoquímicas 14
2.1.2. Fuentes de generación y emisión 17
2.1.3. Transporte y destino 18
2.1.4. Toxicidad 20
2.1.4.1. Efectos toxicológicos 22
2.2. Riesgo ambiental 23
2.2.1. Riesgo ecotoxicológico 24
2.2.2. Riesgo a la salud humana 24
Capítulo 3. Caracterización del sistema ambiental 25
3.1. Marco físico 25
3.1.1 Ubicación 25
3.1.2. Clima 25
3.1.3. Geología 26
3.1.4. Hidrología 26
3.1.5. Edafología 27
3.1.6. Usos de suelo y vegetación 27
3.2. Marco socioeconómico 28
3.2.1. Demografía 28
3.2.2. Vulnerabilidad socioeconómica 28
3.2.3. Economía y actividades productivas 29
Capítulo 4. Antecedentes 31
Capítulo 5. Métodos 34
5.1 Trabajo en campo 34
5.1.1 Estrategia de muestreo 34
5.2 Trabajo en laboratorio 37
5.2.1 Determinación de materia orgánica 37
5.2.2 Determinación de HAP 40
5.2.2.1 Aseguramiento y control de calidad (QA/QC) 43

5.2.2.2 Porcentaje de recuperación 43
5.2.2.2.1 Recuperación de blancos 44
5.2.2.2.1 Recuperación de la matriz 44
5.2.2.3 Límite de detección y cuantificación 45
5.3 Análisis de datos 45
5.3.1 Análisis geoespacial y socioambiental 45
5.3.2 Análisis estadístico 47
5.3.3 Identificación del origen 48
5.3.4 Evaluación de riesgo ambiental 49
5.3.4.1 Rangos y niveles de efecto 49
5.3.4.2 Cocientes de riesgo ecológico 50
5.3.4.3 Equivalente tóxico de benzo[a]pireno (BaP_{TEQ}) 51
Capítulo 6. Resultados y discusión 51
6.1 Aseguramiento y control de calidad (QA/QC) 51
6.2 Distribución spacial de las concentraciones de HAP 52
6.3 Contenido de materia orgánica 57
6.4 Composición y origen 59
6.5 Evaluación de riesgo ecotoxicológico 63
6.6 Análisis socioambiental 67
Capítulo 7. Conclusiones 70
Capítulo 8. Recomendaciones 71
8.1. Determinación de HAP 71
8.2. Control, tratamiento y remediación 71
8.3. Futuras líneas de investigación 72
8.4. Regulación y gestión ambiental 73
8.5. Consideraciones finales 74
Referencias 75
Apéndices 90
Apéndice A. Cartografía 90
Apéndice B. Evidencia fotográfica 93
Apéndice C. Análisis estadístico en MATLAB 95
Apéndice D. Curva de calibración cromatográfica 97
Apéndice E. Efectos TEL-PEL y ERL-ERM 99
Apéndice F. Mortalidad oncológica 102
Anexos 104
Anexo A. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) 104

Índice de figuras

Figura 1. Dinámica, transporte y destino de los HAP 18
Figura 2. Ruta metabólica y mecanismos de toxicidad sistémica de los HAP ingeridos 21
Figura 3. Distribución espacial de los sitios de muestreo en el río coatzacoalcos y sus principales fuentes de contaminación 36
Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento de muestras para la determinación de MO 38
Figura 5. Diagrama de flujo para la extracción de HAP en muestras de sedimento y su preparación para el análisis 42
Figura 6. Distribución espacial de las concentraciones totales (Σ16 HAP) en los sedimentos superficiales a lo largo del cauce 56
Figura 7. Gráfico de dispersión y correlación de spearman entre el contenido de MO y la concentración total de HAP (Σ16 HAP) 58
Figura 8. Variación espacial de la concentración y composición por peso molecular (ΣBPM y ΣAPM) de los HAP a lo largo del cauce 61
Figura 9. Distribución espacial del potencial de riesgo ecológico (M-ERM-Q) a lo largo del cauce 65
Figura 10. Distribución proporcional de la mortalidad oncológica según sitio anatómico primario y municipio de residencia, y según perfil ocupacional en el área de estudio para 2024 67
Figura 11. Panorama de mortalidad oncológica en el área de estudio en comparación con la media estatal y nacional, y según sexo y municipio de residencia para 2024 68
Figura 12. Riesgo socioambiental en el área de estudio 69
Figura A.1. Geología del río Coatzacoalcos 90
Figura A.2. Edafología del río Coatzacoalcos 91
Figura A.3. Hidrografía y calidad del agua en la subcuenca para 2024 92
Figura D.1. Cromatograma representativo de la curva de calibración de la mezcla estándar de los 16 HAP (1000 ng/ml) 99

Índice de tablas

Tabla 1. Fuentes de generación y emisión de HAP 17
Tabla 2. Población potencialmente vulnerable por municipio en el área de estudio 28
Tabla 3. Ubicación y coordenadas geográficas de los puntos de muestreo de sedimentos en el río Coatzacoalcos 35
Tabla 4. Validación del método utilizando dextrosa como estándar primario para la determinación de carbono orgánico (CO) 39
Tabla 5. Parámetros instrumentales para el análisis en GC-MS/MS de las muestras 41
Tabla 6. Criterios para las relaciones de diagnóstico de hap y umbrales para la identificación de fuentes de emisión 48
Tabla 8. Porcentajes de recuperación (%r), límites de detección y cuantificación (LD y LC), coeficiente de correlación (r) 51
Tabla 9. Concentraciones individuales y totales de HAP (ng/g) cuantificados para cada sitio de muestreo 53
Tabla 10. Porcentajes de carbono y materia orgánicos 57
Tabla 11. Relaciones de diagnóstico para la identificación del origen y fuentes de emisión de HAP en el área de estudio 59
Tabla 12. Frecuencia de excedencia de los lineamientos de guías de calidad de sedimentos (TEL-PEL y ERL-ERM) para cada HAP en los sitios de muestreo del área de estudio 63
Tabla 13. Cocientes de riesgo ecológico (M-ERM-Q y M-MPC-Q) y equivalencia tóxica (BaP_{teq}) 66
Tabla B.1. Muestreo en campo, junio 2025 93
Tabla B.2. Procesamiento de muestras para determinación de materia orgánica 93
Tabla D.1. Regresión lineal para los 16 HAP prioritarios 97
Tabla E.1. Evaluación de la excedencia de los lineamientos de guías de calidad de sedimentos TEL-PEL para los 16 HAP por sitio de muestreo 99
Tabla E.2. Evaluación de la excedencia de los lineamientos de guías de calidad de sedimentos ERL-ERM para los 16 HAP por sitio de muestreo 101
Tabla F.1. Matriz de correlación porcentual entre perfil ocupacional y sistema anatómico primario de mortalidad oncológica por municipio para 2024 102
Tabla A.1. Propiedades fisicoquímicas y clasificación de la IARC de los 16 HAP prioritarios 104
Tabla A.2. Valores de referencia para la evaluación del riesgo ecotoxicológico por HAP en sedimentos 106

Lista de acrónimos

Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
Ace	Acenafteno	**LC**	Límite de Cuantificación
Acy	Acenaftileno	**LD**	Límite de Detección
ADN	Ácido Desoxirribonucleico	**LNAPL**	Líquido en Fase No Acuosa Ligero (Light Non-Aqueous Phase Liquid)
AhR	Receptor de Hidrocarburos Arilos (Aryl Hydrocarbon Receptor)	**Log Koc**	Logaritmo del Coeficiente de Partición Carbono Orgánico-Agua
Ant	Antraceno	**Log Kow**	Logaritmo del Coeficiente de Partición Octanol-Agua
APM	Alto Peso Molecular	**LRTAP**	Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (Long-Range Transboundary Air Pollution)
ASEA	Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos	**MB**	Límite Medio (Middle Bound)
ASIPONA	Administración del Sistema Portuario Nacional	**M-ERM-Q**	Cociente Medio del Rango de Efectos Medios (Mean Effects Range Median Quotient)
BaA	Benzo[a]antraceno	**M-MPC-Q**	Cociente Medio de la Concentración Máxima Permisible (Mean Maximum Permissible Concentration Quotient)
BaP	Benzo[a]pireno	**MO**	Materia Orgánica
BaPTEQ	Equivalentes Tóxicos de Benzo[a]pireno (Benzo[a]pyrene Toxic Equivalents)	**MPC**	Concentración Máxima Permisible (Maximum Permissible Concentration)
BbF	Benzo[b]fluoranteno	**Nap**	Naftaleno
BghiP	Benzo[g,h,i]perileno	**NAPL**	Líquido en Fase No Acuosa (Non-Aqueous Phase Liquid)
BkF	Benzo[k]fluoranteno	**NC**	No Calculable
BPC	Bifenilos Policlorados	**NOAA**	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
BPDE	Benzo[a]pireno diol epóxido	**NOM**	Norma Oficial Mexicana
BPM	Bajo Peso Molecular	**ODS**	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres	**OH-HAP**	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos Hidroxilados
Chr	Criseno	**ONU**	Organización de las Naciones Unidas
CIIT	Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec	***p***	Significancia estadística
CO	Carbono Orgánico	**PEL**	Nivel de Efecto Probable (Probable Effect Level)

Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad	**PEMEX**	Petróleos Mexicanos
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	**Phe**	Fenantreno
CONAPO	Consejo Nacional de Población	**PM 2.5**	Partícula con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social	**PM 10**	Partícula con diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros
CP450	Citocromo P450	**Pyr**	Pireno
CPV	Censo de Población y Vivienda	**QA/QC**	Aseguramiento de la Calidad / Control de Calidad (Quality Assurance / Quality Control)
CYP1	Familia 1 de isoenzimas del Citocromo P450	**r**	Coeficiente de Correlación de Pearson
CYP1A1	Isoenzima 1A1 del Citocromo P450	**R2**	Coeficiente de Determinación
CYP1A2	Isoenzima 1A2 del Citocromo P450	**%R**	Porcentaje de Recuperación
CYP1B1	Isoenzima 1B1 del Citocromo P450	**RESA**	Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental
DahA	Dibenzo[a,h]antraceno	**RETC**	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	**RH**	Región Hidrológica
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas	**RME**	Residuos de Manejo Especial
DNAPL	Líquido en Fase No Acuosa Denso (Dense Non-Aqueous Phase Liquid)	**ρ**	Coeficiente de Correlación de Spearman (Rho)
DQO	Demanda Química de Oxígeno	**RSU**	Residuos Sólidos Urbanos
EFSA	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (European Food Safety Authority)	**SEMARNAT**	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ENOE	Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo	**SENER**	Secretaría de Energía
EPT	Elementos Potencialmente Tóxicos	**SGM**	Servicio Geológico Mexicano
ERL	Rango de Efectos Bajos (Effects Range Low)	**SIATL**	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
ERM	Rango de Efectos Medios (Effects Range Median)	**SIH**	Sistema de Información Hidrológica
Fl	Fluoreno	**SINA**	Sistema Nacional de Información del Agua
Fla	Fluoranteno	**SQG**	Guías de Calidad de Sedimentos (Sediment Quality Guidelines)
GC-MS/MS	Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas en Tándem	**SSA**	Secretaría de Salud
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	**TEF**	Factor de Equivalencia Tóxica (Toxic Equivalency Factor)

Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
HPLC	Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (High-Performance Liquid Chromatography)	**TEL**	Nivel Umbral de Efecto (Threshold Effect Level)
IARC	Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (International Agency for Research on Cancer)	**UB**	Límite Superior (Upper Bound)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	**US EPA**	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency)
InP	Indeno[1,2,3-cd]pireno	**USV**	Uso de Suelo y Vegetación
LB	Límite Inferior (Lower Bound)		

Capítulo 1. Introducción

La cuenca baja del río Coatzacoalcos constituye un sistema socioambiental de relevancia debido a la interacción entre ecosistemas terrestres, estuarinos y marinos, así como a la actividad industrial que se desarrolla en su entorno. Sus humedales y manglares desempeñan funciones ecológicas fundamentales, como la protección de la línea de costa [1], la regulación hidrológica a través de sus pantanos y la contribución a la filtración del agua [2], además del mantenimiento de hábitats para diversas especies [3]. Asimismo, la conexión entre el sistema fluvial y el ambiente marino contribuye a la productividad pesquera [1].

No obstante, dicha importancia ecológica también implica una elevada sensibilidad frente a la presencia de fuentes de contaminación. Los sedimentos, en particular, pueden actuar como receptores y reservorios de estos contaminantes, favoreciendo su acumulación y permanencia, condicionando sus procesos de transporte y eventual movilización dentro del sistema acuático [4–6].

Entre los contaminantes más reconocidos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), un conjunto de compuestos orgánicos asociados principalmente con procesos de combustión y con actividades relacionadas con la industria petrolera [7]. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, persistencia y potencial tóxico, los HAP pueden incorporarse a los sedimentos y permanecer en el ambiente durante periodos prolongados [6, 8], donde pueden interactuar con los organismos y participar en procesos de transferencia dentro de las redes tróficas [7, 9]; por ende, su identificación y cuantificación representan un elemento de interés para la evaluación de la calidad ambiental [6], la cual se entiende como

la determinación del nivel de impacto y del riesgo en las distintas matrices ambientales, incluyendo sus posibles efectos en la salud humana [10].

Por tal motivo, el estudio de los HAP en sedimentos de zonas sometidas a una intensa presión industrial ofrece una herramienta para comprender su comportamiento ambiental y valorar sus posibles efectos sobre los ecosistemas acuáticos.

1.1. Planteamiento del problema

En el marco del Plan Estratégico de Petróleos Mexicanos (PEMEX) 2025-2030 [11] y del Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030 [12], particularmente de sus Ejes 3 y 4, México establece como prioridades de política nacional el fortalecimiento de la soberanía energética y el impulso al desarrollo económico. Sin embargo, la continuidad y expansión de las actividades industriales y energéticas se desarrollan en un contexto caracterizado por pasivos ambientales y por la emisión continua de diversos contaminantes, entre ellos los HAP [7, 13]. La presencia y persistencia de estos compuestos en los ecosistemas representan, además, un desafío para el cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030, particularmente de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 3 (Salud y bienestar), 6 (Agua limpia y saneamiento), 12 (Producción y consumo responsables) y 14 (Vida submarina) [14].

En este contexto, la cuenca baja del río Coatzacoalcos ha estado expuesta históricamente a diversas fuentes de contaminación asociadas con actividades industriales, petroleras y urbanas [3, 5, 7]. A estas presiones se suma actualmente la transformación de la región derivada de nuevos proyectos de desarrollo, entre ellos el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT) [15]. Esta situación adquiere especial relevancia debido a la vulnerabilidad socioambiental de la región, reconocida públicamente ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) mediante su designación como Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) durante el periodo 2019–2021 [16, 17]. En respuesta a esta problemática, se han impulsado estrategias gubernamentales orientadas a la atención ambiental; en particular, los humedales del Coatzacoalcos han sido considerados sitios prioritarios dentro del Programa Nacional de Restauración Ambiental 2025-2030 [18].

Los antecedentes disponibles muestran que la contaminación por hidrocarburos en la cuenca baja del río Coatzacoalcos ha sido estudiada desde diferentes perspectivas. Si bien diversos trabajos han documentado la presencia de contaminantes y aportado evidencia sobre sus posibles fuentes y efectos toxicológicos [2, 19–22], los estudios que han

cuantificado HAP en sedimentos presentan una cobertura espacial limitada y corresponden principalmente a periodos anteriores. Los primeros antecedentes disponibles se remontan a estudios realizados entre 1982 y 1989, con estaciones localizadas entre la Laguna del Ostión, el río Calzadas y la desembocadura [5, 23]. Posteriormente, el estudio asociado al derrame de 2004 evaluó la presencia de hidrocarburos saturados y totales desde Nanchital hasta la desembocadura [3], mientras que una investigación publicada en 2016 analizó HAP en un núcleo sedimentario localizado en la zona marina frente al área de descarga del río Coatzacoalcos [19].

Pese a que estos estudios constituyen antecedentes relevantes para comprender la contaminación por hidrocarburos en la región, no proporcionan una caracterización reciente de la distribución de HAP a lo largo del sistema fluvial, desde la porción superior del sistema fluvial hasta la desembocadura, ni permiten establecer sus posibles fuentes y valorar el riesgo ambiental asociado a su presencia.

Sumado a esto, el marco normativo vigente en México presenta limitaciones para la evaluación integral de HAP en sedimentos acuáticos. En particular, la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 establece especificaciones para la caracterización y remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, pero no establece criterios específicos para evaluar la presencia y el riesgo asociado a HAP en sedimentos [24]. En consecuencia, la ausencia de un diagnóstico integral y actualizado limita la capacidad para identificar zonas prioritarias y sustentar estrategias adecuadas de vigilancia, prevención y restauración.

1.2. Justificación

La limitada actualización y cobertura espacial de los estudios sobre HAP en los sedimentos de la cuenca baja del río Coatzacoalcos dificultan conocer la condición actual de estos contaminantes a lo largo del sistema fluvial. Por ello, ante la transformación de la región y las acciones de restauración previstas, resulta pertinente generar evidencia científica que permita actualizar el conocimiento sobre la presencia y distribución de estos compuestos.

En este sentido, la evaluación de los sedimentos desde Hidalgotitlán hasta la desembocadura permitirá generar información actualizada sobre la distribución espacial de los HAP a una escala que no ha sido abordada por los estudios previos. Asimismo, la identificación de sus posibles fuentes y la evaluación del riesgo ambiental asociado permitirán complementar la caracterización de su presencia y aportar una visión integral de la problemática.

1.3. Objetivos

Evaluar el grado de contaminación por HAP y su riesgo ambiental en sedimentos del río Coatzacoalcos, considerando zonas con distintos niveles de impacto antrópico e industrial.

- Determinar la distribución espacial de las concentraciones de HAP en los sedimentos del río Coatzacoalcos a lo largo de la cuenca baja.
- Identificar y estimar las fuentes de origen (petrogénicas o pirogénicas) de la contaminación por HAP en el área de estudio.
- Calcular el riesgo ecológico asociado a la presencia y acumulación de HAP en los sedimentos evaluados.

1.4. Hipótesis

La intensa actividad industrial en el área de estudio, en conjunto con las emisiones de fuentes puntuales y móviles, la deficiente infraestructura de saneamiento y gestión de residuos, propician la retención de contaminantes en los sedimentos del río Coatzacoalcos. Entre estos destacan HAP, reconocidos por su toxicidad y persistencia ambiental. En consecuencia, se espera identificar sitios (o áreas) que confirmen la vulnerabilidad del sistema y su clasificación formal como RESA mediante estimadores de riesgo ambiental.

- Se espera que los puntos de muestreo más cercanos a las principales fuentes puntuales, como la Refinería General Lázaro Cárdenas del Río y los complejos petroquímicos de Coatzacoalcos, presenten las concentraciones de HAP más elevadas y superen los umbrales toxicológicos permisibles, lo que representaría un mayor riesgo ambiental respecto al resto del área.

- Debido a la influencia directa de la infraestructura petrolera y al historial de derrames documentados en el cauce del río, se infiere que el origen de los HAP presentes en los sedimentos será predominantemente petrogénico.

- Existe una correlación positiva y significativa entre el contenido de materia orgánica y la concentración de HAP retenidos en la matriz sedimentaria.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los HAP son una amplia familia de compuestos orgánicos formados por más de dos anillos aromáticos condensados que predominantemente contienen carbono e hidrógeno [25, 26].

Su reconocimiento como contaminantes de alto riesgo para la vida se remonta al auge industrial y a los procesos de combustión iniciados hacia finales del siglo XIX, cuando se documentó una mayor incidencia de cáncer y otros efectos adversos en trabajadores expuestos al hollín, al alquitrán y a las breas [27–29]. Sin embargo, la identificación química de los HAP ocurrió hasta 1930, cuando se logró aislar al benzo[a]pireno (BaP) como el agente cancerígeno activo en el alquitrán de hulla [30]. Posteriormente, estudios experimentales y epidemiológicos, así como evidencia molecular, consolidaron su estatus como agentes genotóxicos y carcinógenos [27, 31].

Por esa razón, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) los designó como contaminantes prioritarios de control [32]. De manera similar en el marco regulatorio europeo, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) concluyó que un compuesto individual no es un indicador adecuado, proponiendo en su lugar una suma de cuatro (BaP, benzo[a]antraceno (BaA), benzo[b]fluoranteno (BbF) y criseno (Chr)) u ocho (sumando a los anteriores el benzo[k]fluoranteno (BkF), indeno[1,2,3-cd]pireno (InP), dibenzo[a,h]antraceno (DahA) y benzo[ghi]perileno (BghiP)) HAP como indicadores tanto de su ocurrencia como de su toxicidad para proteger la salud de los consumidores [33]. Paralelamente, estos compuestos están contemplados en el *Protocolo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*, adoptado en el marco del Convenio de Ginebra sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (LRTAP, Long-Range Transboundary Air Pollution) de la Comisión Económica para Europa de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [34, 35]. Cabe destacar que, para los propósitos de los inventarios de emisiones de este protocolo, se designan únicamente cuatro HAP como compuestos indicadores por su alta persistencia: BaP, BbF, BkF e InP [34].

2.1.1. Características fisicoquímicas

Como sustancias puras a temperatura ambiente, los HAP son compuestos neutros que se presentan como sólidos incoloros, blancos o de color amarillo pálido [27]. En consecuencia, estos contaminantes presentan una amplia distribución ambiental, detectándose

frecuentemente en el aire, el suelo y los cuerpos de agua [36]; sin embargo, su estado físico depende de su peso molecular.

Los HAP se clasifican en función del número de anillos aromáticos o su peso molecular. En este contexto, la US EPA ha designado 16 HAP como prioritarios: naftaleno (Nap), acenaftileno (Acy), acenafteno (Ace), fluoreno (Fl), fenantreno (Phe), antraceno (Ant), fluoranteno (Fla), pireno (Pyr), benzo[a]antraceno (BaA), criseno (Chr), benzo[b]fluoranteno (BbF), benzo[k]fluoranteno (BkF), benzo[a]pireno (BaP), indeno[1,2,3-cd]pireno (InP), dibenzo[a,h]antraceno (DahA) y benzo[ghi]perileno (BghiP) [32]. Los de bajo peso molecular (BPM, $<228\ g \cdot mol^{-1}$) son más susceptibles a la biodegradación y la fotodegradación, encontrándose principalmente en fase gaseosa. En contraste, los de alto peso molecular (APM, $\geq 228\ g \cdot mol^{-1}$) presentan mayor persistencia y tienden a asociarse a la fase sólida [27, 37–39].

La estabilidad química de estos compuestos se debe a que los electrones de los dobles enlaces en los anillos aromáticos se deslocalizan a lo largo de la estructura, formando una nube electrónica compartida. Esta característica hace que los compuestos sean poco reactivos y presenten mayor resistencia a medida que aumenta el número de anillos o la angularidad de la molécula [27, 37].

La distribución simétrica de electrones en su estructura dificulta la interacción con el agua y explica su alta solubilidad en disolventes orgánicos [36]. En conjunto, estas características les confieren dos propiedades fundamentales: hidrofobicidad y lipofilia [36, 40], que, a su vez, favorecen su acumulación en los tejidos grasos de los organismos [9, 25].

La disposición espacial de los anillos aromáticos puede ser lineal, angular o aglomerada [36], configuraciones que influyen directamente en sus propiedades fisicoquímicas. Los HAP presentan altos puntos de fusión (80–280 °C) y de ebullición (218–536 °C), con tendencia a aumentar según el número de anillos [37]. De igual modo, son sensibles a la luz y pueden sufrir fotodegradación, especialmente en presencia de disolventes orgánicos [41].

En ese sentido, propiedades como la baja solubilidad en agua y la baja presión de vapor disminuyen conforme aumenta el peso molecular [42, 43]. Por otro lado, el logaritmo del coeficiente de partición octanol-agua (Log Kow) tiene una relación directamente proporcional con el peso molecular, lo que refleja una mayor hidrofobicidad en los HAP de mayor tamaño [40, 42]. Sumado a esto, el coeficiente de partición carbono orgánico-agua (Log Koc) indica la afinidad de un compuesto por adsorberse a la materia orgánica (MO) en

relación con su permanencia en fase acuosa. En el caso de los HAP, los valores de Log Koc suelen ser elevados [44, 45].

Además, se ha documentado una correlación positiva entre Log Koc y Log Kow, de modo que un incremento en el Log Kow se asocia con una mayor afinidad de los HAP por la fracción orgánica del sedimento [44]. Esto implica que los HAP más hidrofóbicos tienden a permanecer fuertemente adsorbidos a la MO, lo que reduce su movilidad en la fase acuosa y promueve su retención en la fase sólida [45].

Por otra parte, la dinámica y vida media de los HAP son altamente dependientes del compartimento ambiental. En la atmósfera, estos compuestos presentan vidas medias muy cortas debido a su alta afinidad por las partículas de hollín, lo cual acelera su precipitación y deposición en los cuerpos de agua costeros [46]. Sin embargo, una vez que llegan a la columna de agua y se depositan en el sedimento, la vía de atenuación más significativa pasa a ser la biodegradación, mediada por comunidades microbianas que los transforman mediante rutas enzimáticas específicas [37, 47].

En un entorno estuarino, la reducción de su persistencia ambiental no obedece a una variable única. Factores abióticos como el transporte hidrodinámico [46, 48], las variaciones de temperatura, los niveles de oxígeno disuelto y la salinidad, sumados a la estructura y peso molecular de cada HAP, determinan su permanencia [47, 49]. Como resultado, las tasas de degradación fluctúan drásticamente; por ejemplo, la vida media en sedimentos con HAP de BPM como el Phe oscila entre 16 y 126 días, mientras que los de APM, como el BaP, resultan mucho más recalcitrantes, exhibiendo vidas medias que van desde 229 hasta más de 1 400 días [47].

La eficacia de la biodegradación depende de la fracción biodisponible de los HAP: solo los compuestos realmente accesibles pueden ser metabolizados, mientras que la fuerte adsorción a partículas sólidas actúa como barrera física, convirtiendo la desorción en un paso cinético limitante [36, 37]. Con el tiempo, el proceso de envejecimiento de los HAP puede inmovilizarlos en el interior de las partículas, lo que disminuye aún más su accesibilidad y ralentiza la biodegradación [50]. Paradójicamente, esta misma característica lipofílica que limita su degradación favorece su acumulación en los tejidos de los organismos, lo que promueve la bioacumulación [46].

En el Anexo A, Tabla A.1, se presentan los 16 HAP prioritarios establecidos por la EPA junto con sus principales propiedades fisicoquímicas.

2.1.2. Fuentes de generación y emisión

La clasificación de los HAP se fundamenta en su formación y liberación al medio, ya sea por mecanismos naturales o antropogénicos [51]. En general, se distinguen cuatro tipos de fuentes: pirogénicas, originadas por la combustión incompleta de la MO a altas temperaturas bajo condiciones de oxígeno limitado o ausente [8]; petrogénicas, vinculadas con el petróleo crudo y sus derivados sin la intervención de procesos de combustión; biogénicas, generadas directamente por ciertos organismos; y diagenéticas, resultantes de transformaciones químicas y físicas de la MO en sedimentos a lo largo del tiempo, bajo condiciones anaerobias [7, 38, 51–53]. En la Tabla 1 se detalla esta clasificación:

Tabla 1. Fuentes de generación y emisión de HAP

Clasificación HAP por proceso de generación	Características principales	Fuentes		
		Móviles	Fijas / puntuales	Difusas
Pirogénicos	· Formación a altas temperaturas (≈ 350–1200 °C) [27]. · Predominio de HAP de APM [54]. · Compuestos parentales no sustituidos (sin ningún grupo funcional adicional) [55, 56].	Emisiones vehiculares derivadas de la combustión incompleta.	Plantas industriales con procesos de combustión, calefacción residencial, calderas, hornos, incineradores, descargas de aguas residuales municipales. Y, de forma natural, actividad volcánica.	Quema de residuos sólidos urbanos (RSU) y de biomasa (incendios forestales y quemas agrícolas); humo de tabaco, uso de leña, escorrentía agrícola y urbana.
Petrogénicos	· Predominio de HAP de BPM y alquilados (metilados) [27, 57, 58]. · Asociados a hidrocarburos no quemados: petróleo y sus derivados (gasolina, diésel, aceite lubricante, asfalto, entre otros) [26, 57].	Emisiones accidentales en transporte de hidrocarburos (p. ej., camiones cisterna o buques tanque).	Plantas petroquímicas y refinerías: derrames de petróleo crudo o fugas en ductos y descargas de aguas residuales industriales.	Afloramientos geológicos, evaporación en gasolineras, actividades de extracción y manejo de suelos contaminados.
Biogénicos	· Biosíntesis directa [59, 60]. · Compuestos específicos como perileno, naftalenos y fenantreno en maderas tropicales [57, 59].	—	Emisiones desde instalaciones de tratamiento biológico (p. ej., sitios de compostaje) mal gestionadas [27, 61].	Síntesis en suelos, hojarasca, fitoplancton y por microorganismos adaptados a ambientes contaminados.

Diagenéticos	· Formación a bajas temperaturas (<50 °C) a partir de precursores orgánicos [62]. · Concentraciones que aumentan con la profundidad en núcleos de sedimentos [8].	—	Formación *in situ* a partir de precursores orgánicos naturales depositados.	Procesos de envejecimiento y transformación a lo largo del tiempo en sedimentos y suelos.

Basado en [27, 52, 57]

Si bien los HAP pueden originarse a partir de las cuatro fuentes mencionadas, las pirogénicas y las petrogénicas representan la mayor carga de contaminación derivada de actividades antropogénicas. En la Figura 1 se ilustran las principales vías de emisión de estas fuentes predominantes, así como su distribución entre los compartimentos ambientales.

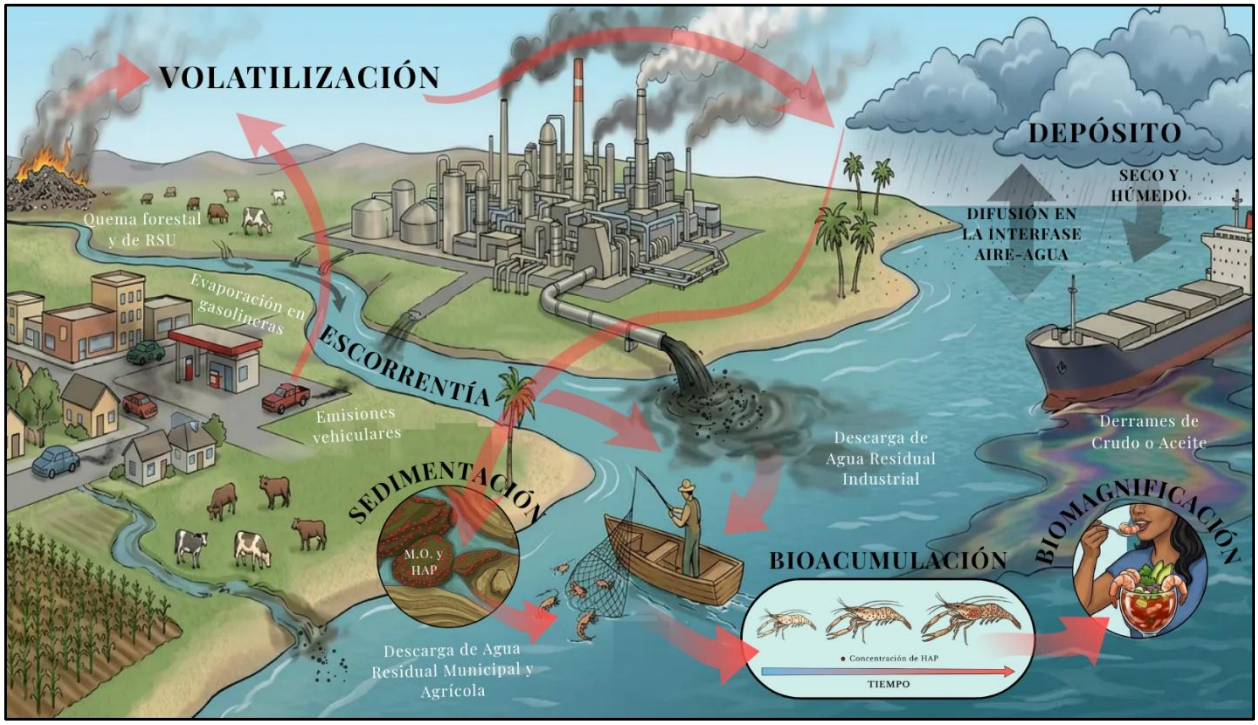


Figura 1. Dinámica, transporte y destino de los HAP. Estructura y diseño de elaboración propia creados en Canva; ilustraciones de apoyo generadas con Figure Labs.

2.1.3. Transporte y destino

La distribución atmosférica de los HAP está regida sustancialmente por la partición gas-partícula, un proceso dinámico que rara vez alcanza el equilibrio químico y depende de la afinidad del compuesto por la MO y el carbono presentes en los aerosoles [63]. Este intercambio determina tanto su transporte como su eventual depósito en superficies terrestres y acuáticas [64].

Este depósito ocurre de dos maneras: los HAP asociados a partículas se transfieren preferentemente mediante depósito seco, mientras que los más volátiles lo hacen mediante depósito húmedo [63–65]. Aunque su permanencia en la atmósfera es relativamente breve, estos compuestos pueden ser transportados a grandes distancias por revolatilización, fenómeno en el que los contaminantes depositados retornan a la atmósfera bajo condiciones favorables de temperatura, radiación solar y humedad, prolongando así su ciclo de transporte [65].

Durante este transporte atmosférico, los HAP pueden experimentar fotooxidación, proceso que altera su estructura molecular y, con ello, su toxicidad [27]. Esto se debe a que los compuestos adsorbidos a las partículas son más propensos a la fotólisis que aquellos disueltos [37, 66]; sin embargo, la eficacia del proceso disminuye con la profundidad en cuerpos de agua y suelos debido a la atenuación de la radiación y la presencia de sólidos suspendidos [36, 67, 68]. En paralelo, la biodegradación microbiana constituye otra vía de transformación, limitada en ambientes con escasa disponibilidad de oxígeno o temperaturas reducidas [37, 66].

En fase acuosa, su baja solubilidad y alta afinidad por la MO promueven la sorción a partículas y sedimentos, o su incorporación a fases inmiscibles con el agua, conocidas como líquidos de fase no acuosa (NAPL, por sus siglas en inglés Non-Aqueous Phase Liquids) [69]. Estas mezclas orgánicas, generalmente de origen petroquímico, actúan como reservorios persistentes [63, 69]. De acuerdo con su densidad relativa al agua, los NAPL se clasifican en ligeros (LNAPL), como la gasolina, y densos (DNAPL), como el combustóleo o los alquitranes.

Si bien los DNAPL representan un riesgo grave por su capacidad de infiltrarse y contaminar acuíferos profundos [69–73], en los sistemas de aguas superficiales, tienden a depositarse y acumularse en los lechos. Desde ahí, estas fases orgánicas liberan paulatinamente HAP hacia el agua intersticial, convirtiendo a los sedimentos en una fuente crónica de exposición [63, 69, 74]. Por otra parte, la Ley de Raoult evidencia que los HAP de BPM, con mayores presiones de vapor y solubilidades, se volatilizan y disuelven con mayor facilidad en LNAPL [74, 75].

Pese a los mecanismos de degradación, numerosos congéneres de HAP muestran alta recalcitrancia y capacidad de bioacumulación, especialmente en organismos con tejidos lipídicos abundantes o limitada capacidad metabólica, como los invertebrados bentónicos [7, 9, 25, 37, 52, 53, 68]. Una vez incorporados a la red trófica, los HAP o sus metabolitos

pueden transferirse a niveles superiores mediante biomagnificación, fenómeno que, aunque menos pronunciado que en otros contaminantes persistentes, puede intensificarse cuando los HAP se asocian a microplásticos u otras matrices vectores [25, 40, 52, 76].

2.1.4. Toxicidad

La naturaleza fisicoquímica de los HAP permite su incorporación a los organismos, particularmente a la biota acuática, a través de todas las vías de exposición: absorción branquial, contacto dérmico e ingesta [36, 49]. A diferencia de otros contaminantes altamente lipofílicos, como los bifenilos policlorados (BPC), los HAP presentan una biomagnificación limitada en las redes tróficas debido a su metabolismo relativamente rápido; sin embargo, esta misma capacidad metabólica genera intermediarios reactivos responsables del mayor daño celular [77, 78].

Una vez absorbidos, los HAP atraviesan las membranas celulares a través de difusión pasiva y son procesados mediante la biotransformación de xenobióticos, un mecanismo del organismo para aumentar su polaridad y facilitar su eliminación [79]. No obstante, este proceso puede producir metabolitos más tóxicos que el compuesto original. Además, los HAP se distribuyen ampliamente y pueden detectarse en diversos tejidos a las pocas horas de la exposición [80].

El metabolismo de los HAP es un proceso bifásico [52, 81]. En la fase I, las enzimas del citocromo P450 (principalmente CYP1A1, CYP1A2 y CYP1B1) catalizan la oxidación que genera epóxidos y dioles intermedios [79, 81, 82]. Este sistema enzimático es regulado por el receptor de hidrocarburos de arilo (AhR), que, al unirse a los HAP, induce la expresión de las enzimas CYP1. Paradójicamente, los productos resultantes de esta fase, aunque más hidrosolubles, suelen ser más reactivos y genotóxicos que la molécula parental [49, 83, 84].

Posteriormente, la fase II del metabolismo actúa como un mecanismo de conjugación y detoxificación. En ella intervienen enzimas como las glutatión S-transferasas (GST), UDP-glucuronil transferasas (UGT) y sulfotransferasas (SULT), que incorporan grupos polares (glutatión, glucurónido o sulfato) para incrementar la solubilidad de los metabolitos y facilitar su excreción por la orina o la bilis [81, 84]. Sin embargo, cuando este sistema resulta insuficiente, los metabolitos intermedios pueden reaccionar con macromoléculas celulares, lo que desencadena efectos citotóxicos [81, 85].

En consecuencia, los principales efectos tóxicos de los HAP derivan precisamente de los metabolitos generados en la fase I [36, 82, 86]. Un ejemplo representativo es la formación de diol-epóxidos, como el benzo[a]pireno-7,8-diol-9,10-epóxido (BPDE), derivado del BaP, que son altamente electrófilos y pueden unirse covalentemente al ADN. Esto forma aductos que inducen mutaciones y promueven procesos de carcinogénesis, especialmente en los tejidos hepáticos y pulmonares [81, 84]. De forma paralela, los metabolitos hidroxilados (OH-HAP) actúan como perturbadores endocrinos, al interactuar con los receptores estrogénicos y alterar el equilibrio hormonal según su estructura química [25].

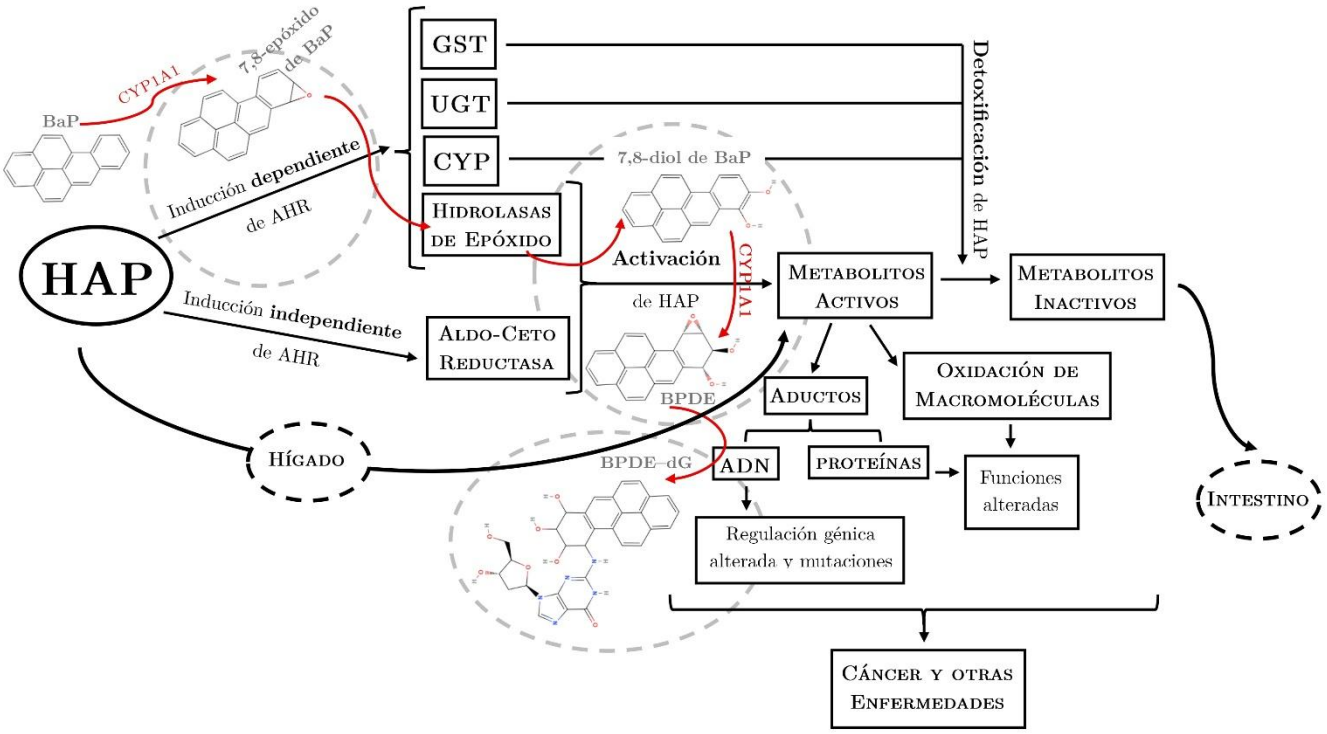


Figura 2. Ruta metabólica y mecanismos de toxicidad sistémica de los HAP ingeridos. Adaptado de [79, 81]

Nota: El diagrama muestra las principales rutas metabólicas de los HAP, particularmente del (BaP). **AhR**, receptor de hidrocarburos arílicos; **CYP**, citocromo P450; **CYP1A1**, isoforma del CYP450 (oxidación inicial del BaP); **UGT**, UDP-glucurono sil-transferasa (fase II, conjugación); **Hidrolasa de epóxido**, enzima que convierte los epóxidos en dioles; **Aldo-ceto reductasa**, enzima que participa en reacciones de reducción; **BPDE**, 7,8-diol-9,10-epóxido de BaP; **BPDE-dG**, aducto BPDE-desoxiguanosina.

Asimismo, las quinonas derivadas de los HAP participan en ciclos redox que generan especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus iniciales en inglés), lo que provoca estrés oxidativo, inflamación y daño celular, siendo las *o*-quinonas las de mayor reactividad [79,

87]. Finalmente, los HAP y sus metabolitos también interfieren con vías de señalización celular dependientes del AhR, del ácido retinoico o de la quinasa Akt, lo que contribuye a los efectos inmunotóxicos y teratogénicos descritos en diversos organismos [36, 86].

2.1.4.1. Efectos toxicológicos

Como se señaló anteriormente, la exposición a los HAP se asocia con una amplia gama de efectos tóxicos, que van desde alteraciones funcionales hasta procesos carcinogénicos. En los ecosistemas acuáticos, los organismos bentónicos, como algunos crustáceos, son particularmente vulnerables, ya que al estar en contacto directo y alimentarse de los sedimentos experimentan una exposición crónica que podría comprometer su desarrollo [9, 51].

Por su parte, entre las vías de exposición en humanos, la inhalatoria es la más relevante, ya que cerca del 95 % de los HAP atmosféricos se adsorben a partículas finas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) capaces de penetrar profundamente en los pulmones, lo que genera inflamación, reduce la función respiratoria y exacerba enfermedades como el asma [88–90].

Además, estos compuestos ejercen efectos inmunotóxicos al suprimir la actividad de los linfocitos, alterar la producción de citocinas y desregular el equilibrio inmunitario, lo que incrementa la susceptibilidad a infecciones, alergias y trastornos autoinmunes [36]. Su acción también se extiende al sistema cardiovascular: diversos estudios han vinculado la exposición crónica a HAP con aterosclerosis, hipertensión y eventos trombóticos, mediados por estrés oxidativo, disfunción endotelial y alteraciones en las vías de señalización del receptor AhR [91].

En el ámbito endocrino, los HAP actúan como perturbadores hormonales al unirse a receptores estrogénicos o androgénicos, lo que provoca alteraciones reproductivas, metabólicas y del desarrollo [90]. Estos compuestos pueden atravesar la barrera placentaria, afectando el crecimiento fetal y el neurodesarrollo, lo cual se ha asociado con menor peso y longitud al nacer, reducción del perímetro craneal y disminución del coeficiente intelectual en la infancia [49, 88, 92–94].

Entre los efectos más críticos, destaca su potencial carcinogénico. La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, International Agency for Research on Cancer) ha clasificado los HAP individuales según su potencial carcinogénico (Tabla A.1) [82, 95].

Suficiente evidencia permite sugerir que los HAP presentes en el hollín fueron la causa del cáncer de escroto documentado en 1775 en deshollinadores de Londres, y posteriormente en trabajadores expuestos al alquitrán de hulla [30]. En la actualidad, estudios epidemiológicos confirman una mayor incidencia de cáncer de pulmón, piel, vejiga, páncreas, esófago, colon y mama en poblaciones expuestas ocupacionalmente o por el consumo de alimentos contaminados [36, 81, 82, 96, 97]. En este último rubro, el consumo de productos pesqueros y crustáceos bentónicos cobra especial relevancia, ya que estos organismos tienden a bioacumular altas concentraciones de HAP presentes en los sedimentos, lo que representa una vía directa de transferencia de contaminantes desde los ecosistemas acuáticos al ser humano [9, 27].

2.2. Riesgo ambiental

En el ámbito normativo mexicano, la NOM-018-STPS-2015 define el riesgo como la probabilidad de que se presenten efectos nocivos derivados de la exposición aguda o crónica a una sustancia química peligrosa o a una mezcla [98]. Sin embargo, desde una perspectiva ambiental, este concepto trasciende la exposición humana para considerar también los posibles efectos en todas las formas de vida.

Esta perspectiva se relaciona con la ecotoxicología, término acuñado por Truhaut para describir el estudio de estos efectos en los ecosistemas [99]. A diferencia de un enfoque centrado exclusivamente en el humano, la ecotoxicología considera las consecuencias de los contaminantes en distintos niveles de organización biológica. En este contexto, el riesgo no depende únicamente de la presencia de una sustancia, sino también de la interacción entre su peligrosidad y las condiciones de exposición, incluidas su magnitud, frecuencia y duración [100]. En tal sentido, el riesgo ecotoxicológico se refiere a la probabilidad de que se produzcan efectos biológicos adversos en los organismos y procesos que conforman los ecosistemas expuestos a contaminantes [101].

En el caso de los sedimentos, la presencia de un contaminante no implica necesariamente un efecto biológico, por lo que el riesgo depende de su concentración, disponibilidad y exposición [102]. Además, la acumulación de contaminantes en esta matriz puede favorecer exposiciones prolongadas en las comunidades bentónicas y, mediante su transferencia a través de la red trófica, generar implicaciones para las poblaciones humanas que dependen de los servicios ecosistémicos del río [9, 26].

Por lo tanto, el riesgo ambiental puede entenderse como la posibilidad de que la presencia de contaminantes en el ambiente genere daños, ya sea sobre los componentes y

procesos de los ecosistemas o sobre las poblaciones humanas expuestas, de manera complementaria. En este sentido, su evaluación no busca establecer certezas absolutas, sino estimar la probabilidad de ocurrencia de efectos adversos como herramienta para la toma de decisiones ambientales [100, 101].

2.2.1. Riesgo ecotoxicológico

Históricamente, la realización de bioensayos de toxicidad para cada muestra ambiental resultaba técnica y económicamente poco viable. Para atender esta limitación, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) desarrolló las Guías de Calidad de Sedimentos (SQG) [103, 104], basadas en la recopilación de grandes bases de datos que relacionan las concentraciones de contaminantes con la incidencia de efectos biológicos nocivos en organismos bentónicos marinos y estuarinos.

A partir de esta evidencia, se establecieron parámetros estadísticos predictivos como el Nivel de Efecto Umbral (TEL, Threshold Effects Level) y el Nivel de Efecto Probable (PEL, Probable Effects Level) [103, 104], así como el Rango de Efecto Bajo (ERL, Effects Range Low) y el Rango de Efecto Medio (ERM, Effects Range Median) [105]. Estos índices establecen rangos de probabilidad de efectos ecológicos, por ejemplo, las concentraciones por debajo del TEL o ERL indican que los efectos tóxicos rara vez son esperados; los valores que superan el PEL o ERM señalan una alta probabilidad de observar efectos biológicos adversos; mientras que las concentraciones intermedias representan un intervalo asociado con una posible ocurrencia de toxicidad [103, 105, 106]. Estos valores, centralizados en las Tablas de Referencia Rápida de la NOAA [104], permiten comparar las concentraciones de contaminantes presentes en los sedimentos con niveles asociados a la ocurrencia de efectos biológicos y, mediante diferentes índices o cocientes, estimar su potencial de riesgo [6].

2.2.2. Riesgo a la salud humana

El riesgo para la salud humana constituye la otra dimensión del riesgo ambiental y se refiere a la posibilidad de que la exposición a contaminantes ambientales produzca efectos tóxicos en las poblaciones humanas [9, 100].

En el caso de los HAP, una herramienta utilizada para este propósito es el Equivalente Tóxico de Benzo[a]pireno (BaPTEQ, por sus iniciales del inglés), que expresa la toxicidad equivalente de una mezcla de compuestos con respecto al BaP [107], considerado como compuesto de referencia por estar clasificado como cancerígeno por la IARC [95].

Capítulo 3. Caracterización del sistema ambiental

3.1. Marco físico

3.1.1 Ubicación

El río Coatzacoalcos se localiza en el sureste de México y forma parte de la Región Hidrológica 29 (RH29) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), correspondiente a la vertiente del Golfo de México [108]. Su cuenca se extiende a través de los estados de Oaxaca y Veracruz y abarca un área de transición fisiográfica que incluye sierras, planicies costeras y sistemas estuarinos; alberga además la tercera mayor superficie de manglar a nivel estatal de Veracruz (10.63 %) [1].

Si bien el río nace en la Sierra Atravesada (Oaxaca) a una altitud cercana a los 2000 m.s.n.m. [109], el área de estudio se limita a la cuenca baja (Figura 3), abarcando desde Hidalgotitlán hasta su desembocadura. Específicamente, comprende los municipios veracruzanos de Hidalgotitlán, Jáltipan, Minatitlán, Cosoleacaque y Coatzacoalcos, una zona en la que el cauce principal confluye con tributarios como los ríos Coachapa, Uxpanapa, San Antonio y Calzadas.

3.1.2. Clima

De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García, el área de estudio se clasifica como tipo Am, o tropical monzónico [110, 111], caracterizado por un clima cálido-húmedo con lluvias en verano [112].

La temperatura media anual ronda los 24 °C, con una máxima diaria de entre 25 y 27 °C. La precipitación media anual es considerable, alcanzando los 2818.7 mm, con máximas diarias de entre 127 y 168 mm [112]. La mayor parte de estos volúmenes se concentra en la temporada estival, interrumpida por una breve disminución estacional durante la canícula (sequía de medio verano). Adicionalmente, entre principios de otoño e invierno, recibe precipitaciones influenciadas por los sistemas frontales denominados localmente "nortes" [109, 111], fenómeno que responde a la dinámica de la circulación atmosférica sobre el Golfo de México y el Istmo de Tehuantepec [113].

3.1.3. Geología

La cuenca, ubicada en la llanura costera del Golfo de México, se divide topográficamente en dos zonas: una porción superior que capta los escurrimientos hacia los ríos Uxpanapa y Coatzacoalcos y una planicie baja e inundable donde estos desembocan [112].

De acuerdo con su distribución espacial (Figura A.1), los márgenes del cauce principal y las llanuras de inundación están dominados por depósitos aluviales, mientras que, en la desembocadura prevalecen las zonas palustres y litorales.

Estos depósitos están compuestos predominantemente por sedimentos finos (limos y arcillas) [22, 114], cuya alta capacidad de adsorción hace que los lechos aluviales funcionen como zonas de alta retención de pasivos ambientales históricos [22, 115].

3.1.4. Hidrología

El río Coatzacoalcos recorre alrededor de 325 km y presenta una escorrentía superficial de aproximadamente 28 717 hm^3/año al Golfo de México [116]. A pesar de su magnitud, la calidad del agua en el tramo comprendido entre Hidalgotitlán y la desembocadura se encuentra bajo estrés debido a la densa red de puntos de descarga [108].

De acuerdo con la Figura A.3 y la categorización del Semáforo de Calidad del Agua de la CONAGUA, la porción sur (Hidalgotitlán-Jáltipan) presenta predominantemente contaminación de tipo física y bacteriológica (semáforo amarillo), reflejada en alteraciones de parámetros como sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y coliformes. En contraste, el tramo norte (Minatitlán-Coatzacoalcos) se cataloga como contaminación tóxica (semáforo rojo), excediendo los límites permisibles de demanda de oxígeno (DBO, DQO) y presencia de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) [22, 108].

Durante la época de lluvias, la alta hidrodinámica del río favorece la dispersión de contaminantes, lo cual aumenta el riesgo ecotoxicológico para la biota acuática y estuarina. [1, 21, 115]. En consecuencia, el cumplimiento normativo (semáforo verde) queda limitado únicamente a zonas puntuales de la desembocadura. Como se muestra en la Figura 12, las intensas aportaciones pluviales provocan el desbordamiento periódico del cauce sobre las llanuras bajas, con tirantes superiores a 1 m para un periodo de retorno de 10 años [117].

Por otra parte, el comportamiento superficial del río está estrechamente relacionado con la dinámica del acuífero. De acuerdo con los estudios técnicos disponibles [112], el flujo subterráneo presenta una dirección preferencial de sur a norte y descarga de forma natural

hacia el mar, utilizando la red fluvial como una de sus principales vías de drenaje. Esta interacción implica que el acuífero puede actuar como vía de transporte de contaminantes desde el subsuelo al sistema fluvial. En particular, dado que la carga piezométrica del acuífero es superior a la del río, este actúa como un sistema efluente [118]. Bajo dicho gradiente hidráulico, los contaminantes que logren infiltrarse pueden ser movilizados por el flujo subterráneo y, eventualmente, incorporarse al cauce a través de la zona hiporreica en el lecho del río, contribuyendo a la carga contaminante del flujo base [118, 119].

3.1.5. Edafología

En las llanuras de inundación, los bordes del río Coatzacoalcos y sus principales afluentes, predominan los Gleysoles (Figura A.2.), mientras que en las zonas de transición se distribuyen Acrisoles, Luvisoles y Cambisoles. En la franja costera, por su parte, predominan los suelos arenosos [110].

Los Gleysoles son suelos característicos de regímenes de humedad prolongada, como zonas inundables y pantanosas, reconocidos por su alta acumulación de MO en condiciones anóxicas. Estas características favorecen la retención de diversos contaminantes en el suelo y los sedimentos, por lo que pueden funcionar como un registro de la contaminación acumulada, pero también como una fuente durante eventos de inundación extrema [22, 120]. Por ello, la dinámica hidrológica y geológica del río facilita que los sedimentos de grano fino y MO actúen como los principales sumideros de contaminantes como los EPT [22].

3.1.6. Usos de Suelo y Vegetación

En las porciones sur y centro del área de estudio (Hidalgotitlán, Jáltipan y Cosoleacaque), el Uso de Suelo y Vegetación (USV) está dominado por pastizales cultivados y zonas agrícolas, con una distribución limitada de vegetación natural (Figura 3). En contraste, la zona norte, próxima al puerto de Coatzacoalcos, presenta una mayor presión debido a la expansión de los asentamientos humanos y a una alta concentración de infraestructura industrial [110].

El cambio del USV, particularmente entre 1970 y 1990, favoreció la conversión y la pérdida de la cobertura vegetal histórica de humedales, selvas y ecosistemas riparios, contribuyendo al avance de la deforestación y de la erosión hídrica [1, 121]. Asimismo, estas transformaciones incrementaron la contaminación de los suelos, con potencial para transportar contaminantes hacia el cauce del río [48]. En este contexto, los remanentes de vegetación riparia y manglar presentes en la desembocadura desempeñan una función importante como zonas de amortiguamiento ecológico, al favorecer la retención de

sedimentos y contaminantes y, en cierta medida, mitigar los impactos asociados a las actividades petroquímicas y agrícolas desarrolladas a lo largo del corredor [1].

3.2. Marco socioeconómico

3.2.1. Demografía

De acuerdo con las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) para 2024, los municipios comprendidos en el área de estudio concentran una población estimada de 639 353 habitantes [122]. La mayor población corresponde a Coatzacoalcos, seguida de Minatitlán y Cosoleacaque, mientras que Hidalgotitlán y Jáltipan presentan porcentajes menores.

Para contextualizar la posible vulnerabilidad de la población ante una exposición crónica a contaminantes, se consideró como población potencialmente vulnerable a los grupos de 0 a 14 años y de 60 años en adelante. La Tabla 2 presenta la población total, la población comprendida en estos grupos de edad y su proporción respecto de la población municipal.

Tabla 2. Población potencialmente vulnerable por municipio en el área de estudio

Municipio	Población total	Población (0-14 y >60 años)	Población vulnerable (%)
Hidalgotitlán	18013	7325	40.7
Jáltipan	37942	14544	38.3
Minatitlán	138853	52902	38.1
Cosoleacaque	133163	45666	34.3
Coatzacoalcos	311382	107689	34.6

Basado en [122]

En términos proporcionales, Hidalgotitlán presenta la mayor proporción de población en estos grupos de edad (40.7 %), mientras que Cosoleacaque presenta la menor (34.3 %). Estos datos permiten dimensionar la población potencialmente susceptible, sin que ello implique, por sí mismo, un mayor riesgo ambiental.

3.2.2. Vulnerabilidad socioeconómica

De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), en 2020 el 58.6 % de la población de Veracruz se encontraba en situación de pobreza y el 13.9 % en pobreza extrema [123].

A escala municipal, las condiciones socioeconómicas y el acceso a servicios básicos varían entre los municipios del área de estudio. Para 2020, Coatzacoalcos y Jáltipan presentan, en términos generales, menores niveles de marginación, mientras que Hidalgotitlán concentra mayores carencias en servicios básicos; particularmente, en este municipio, el 95.7% de la población no disponía de agua potable y alcantarillado, y el 55.1% carecía de electricidad en la vivienda. En Minatitlán, la marginación se concentra principalmente en la precariedad de la vivienda, caracterizada por hacinamiento y pisos de tierra, y por el bajo nivel educativo de la población adulta, ya que el 80% de los mayores de 15 años no concluyó la educación básica [124].

3.2.3. Economía y actividades productivas

A nivel estatal, de acuerdo con datos de Data México de la Secretaría de Economía basados en la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), la tasa de participación laboral en Veracruz fue de 53.3% durante el primer trimestre de 2026, mientras que la tasa de desocupación fue de 2.33% [125]. Para el mismo periodo, las ocupaciones con mayor número de trabajadores fueron las de apoyo en actividades agrícolas, las de ventas, las de despachadores y dependientes en comercios, y las de comerciantes en establecimientos [126]. Estos datos corresponden al ámbito estatal, ya que la fuente no cuenta con representatividad municipal para estos indicadores.

Como se mencionó en la sección 3.1.6, una parte importante de los USV del territorio corresponde a pastizales cultivados y áreas agrícolas [110]. Según la clasificación del INEGI, los pastizales cultivados corresponden a superficies en las que se han introducido especies herbáceas destinadas principalmente al pastoreo y a la actividad ganadera [127].

La actividad pesquera también tiene relevancia económica y alimentaria para las comunidades ribereñas. De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2024), en el área de estudio se identifican más de 90 unidades económicas relacionadas con la pesca y captura, principalmente en los municipios de Minatitlán, Coatzacoalcos y Jáltipan. Entre las actividades registradas se encuentran la captura de especies de escama, camarón, langostino y mojarra, así como la operación de diversas Sociedades Cooperativas de Producción Pesquera [128].

Mientras que en Jáltipan destaca la actividad extractiva asociada con la explotación de arena sílice, almacenamiento y manejo de coque de petróleo; en Cosoleacaque, Minatitlán y Coatzacoalcos, la economía se transforma operando más de 70 unidades de gran escala

enfocadas en petroquímica básica, refinación, fertilizantes y plásticos, apoyadas por una vasta red logística y terminales de almacenamiento [128].

El corredor industrial está anclado por la infraestructura de PEMEX Transformación Industrial, que incluye la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas, la cual cuenta con una capacidad de destilación de 285 000 barriles diarios [129], representando aproximadamente el 14% de la capacidad nacional de refinación. Asimismo, la zona alberga los complejos petroquímicos Cangrejera (2818 miles de toneladas), Cosoleacaque (4213 miles de toneladas), Morelos (2277 miles de toneladas) y Pajaritos (207 miles de toneladas) [129], que en conjunto concentran cerca del 95% de la capacidad petroquímica instalada del país. Aunque los volúmenes de producción actuales son menores a los registrados hace una década (183 000 barriles diarios procesados en la refinería y poco más de 13 millones de toneladas en la producción petroquímica nacional) [19, 129], es fundamental considerar que esta intensa actividad industrial se ha mantenido durante décadas.

A esta infraestructura federal se suman diversas instalaciones de capital privado, entre las que destacan Industria Química del Istmo, Petroquímica Mexicana de Vinilo, Tereftalatos Mexicanos e Innophos Fosfatados de México. Adicionalmente, el análisis espacial en el área de estudio identificó 28 gasolineras en las proximidades del cuerpo de agua, que constituyen fuentes difusas de escorrentía superficial [128].

Esta actividad industrial se complementa con infraestructura portuaria y carretera; de acuerdo con los registros históricos hasta 2020 de la Administración del Sistema Portuario Nacional (ASIPONA), ha movilizado del orden de 4 millones de toneladas anuales de carga comercial [130]. Sin embargo, para 2023, los reportes oficiales de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante indican que, tan solo en un mes, el recinto portuario de Pajaritos movilizó más de 2.14 millones de toneladas correspondientes a tráfico de altura (operaciones internacionales de entrada y salida), mientras que cerca de 245 mil toneladas se movilizaron mediante cabotaje (tráfico nacional). Además, la terminal operó 64 buques petroleros [131]. Asimismo, las principales vías de carretera de la región registran un flujo considerable de vehículos de carga, en particular en los corredores Nuevo Teapa–Cosoleacaque, Coatzacoalcos–Villahermosa y Coatzacoalcos–Salina Cruz [132].

Capítulo 4. Antecedentes

Históricamente, la residencia en zonas próximas a actividades de extracción, refinación y procesamiento de hidrocarburos se ha asociado con una mayor exposición a contaminantes ambientales y con efectos adversos en la salud, incluidos riesgos para el desarrollo de enfermedades oncológicas [133, 134]. En el área de estudio, esta problemática resulta particularmente interesante, donde las actividades petroleras, químicas y petroquímicas se han desarrollado durante más de un siglo y actualmente comprenden alrededor de 65 instalaciones industriales [2]. De esta manera, para las poblaciones humanas aledañas, la exposición a los altos niveles de HAP presentes en los compartimentos ambientales se asocia con efectos toxicológicos que explican el incremento pronosticado de las tasas de mortalidad por cáncer en la zona [135].

Anterior a la consolidación de la industria petrolera y petroquímica, el sureste veracruzano mantenía un perfil predominantemente rural [136, 137]. Las actividades económicas primarias giraban en torno a la agricultura, la ganadería y la pesca, favorecidas por la disponibilidad y la diversidad de los recursos naturales [16]. Sin embargo, esta dinámica comenzó a modificarse a finales del siglo XIX, cuando el descubrimiento y el aprovechamiento de yacimientos de hidrocarburos impulsaron una profunda transformación económica y territorial en la región [138].

En 1894, la compañía inglesa Pearson inició la construcción del ferrocarril transístmico entre Salina Cruz y Coatzacoalcos, infraestructura que posteriormente favoreció el desarrollo de estas actividades. En 1906 se estableció una refinería en Minatitlán, a orillas del río Coatzacoalcos, lo que marcó el inicio de la consolidación de la actividad petrolera en la región [137, 139]. Durante este periodo, las inversiones se orientaron principalmente a la extracción, el procesamiento y el transporte de hidrocarburos, así como hacia la infraestructura necesaria para su comercialización. Esto favoreció el crecimiento de localidades como Minatitlán y Coatzacoalcos, pero no se acompañó de una integración equivalente con las actividades productivas preexistentes [136, 137]. Por consiguiente, la actividad petrolera se convirtió progresivamente en un componente central de la economía regional [137].

A partir de los años sesenta, se impulsó una nueva etapa de industrialización mediante la incorporación de la petroquímica básica para sustituir importaciones, construyendo en la zona los complejos de Cosoleacaque (1962) para la producción de amoníaco y de Pajaritos (1967) para la producción de clorados [137]. Posteriormente, el

auge petrolero de 1977 a 1982 intensificó esta transformación, favorecido por el descubrimiento de inmensos yacimientos en el sureste y el incremento internacional de los precios del petróleo [138, 139]. En esta etapa se construyeron los magno-complejos de La Cangrejera (1980) y Morelos (1988), atrayendo, además, a empresas privadas de la petroquímica secundaria [137].

Como consecuencia, las ciudades de la cuenca experimentaron una explosión demográfica descontrolada por la migración laboral. Entre 1970 y 1995, la población de Coatzacoalcos, Minatitlán y Cosoleacaque aumentó en 113%, 107% y 128%, respectivamente [137]. Este crecimiento acelerado ejerció presión sobre los servicios públicos y favoreció la expansión urbana hacia zonas con infraestructura limitada, al tiempo que se acumularon pasivos ambientales derivados de las actividades industriales y del manejo de residuos [16]. Un ejemplo representativo es el sitio de disposición final Las Matas, utilizado históricamente como tiradero a cielo abierto y posteriormente reconocido como uno de los principales pasivos ambientales de la región [140].

La acelerada expansión de la infraestructura durante el auge petrolero de finales de la década de 1970 y principios de la de 1980 estuvo acompañada de un elevado endeudamiento externo, sustentado en la expectativa de que los precios internacionales del petróleo continuarían aumentando [139]. La posterior caída de los precios del crudo (entre 1981 y 1986) desencadenó una profunda crisis económica que limitó la capacidad de inversión del Estado y dio paso a políticas de austeridad y a la reestructuración de PEMEX, que incluyeron cambios en la organización y la operación de la industria petroquímica [137, 139]. La crisis, por tanto, no solo modificó la dinámica económica, sino que también evidenció las limitaciones de un modelo de desarrollo altamente dependiente de una sola actividad productiva y escasamente diversificada [137].

Desde una perspectiva ambiental, esta etapa forma parte del proceso más amplio de transformación y acumulación de presiones en la cuenca; por ende, los efectos perjudiciales de la industrialización no se limitaron a emergencias o situaciones puntuales, sino que se incorporaron progresivamente al territorio a través de la interacción de múltiples fuentes de contaminación que han operado durante varias décadas, dejando pasivos ambientales hasta la actualidad [16, 137].

Paralelamente, Coatzacoalcos adquirió una función estratégica como nodo de transporte y distribución de hidrocarburos y productos petroquímicos, al articular instalaciones industriales, redes de ductos, infraestructura portuaria y el Ferrocarril del

Istmo [136, 138, 139]. Hoy en día, a pesar de los cambios económicos, institucionales y regulatorios implementados durante las últimas décadas, Coatzacoalcos mantiene su función estratégica como corredor industrial y logístico, mientras que proyectos como el Corredor CIIT, buscan fortalecer la conectividad ferroviaria entre Coatzacoalcos y Salina Cruz y promover nuevas actividades industriales mediante la creación de Polos de Desarrollo para el Bienestar [141].

Con relación al manejo de residuos, tras la clausura del sitio de disposición final Las Matas, históricamente considerado uno de los principales pasivos ambientales de la región [140, 142], la gestión de los RSU y de los residuos de manejo especial (RME) ha pasado a nuevos esquemas intermunicipales [143].

En términos de contaminación ambiental, a mediados del siglo XX se ha señalado un predominio de HAP de origen petrogénico en la región, asociado principalmente a las actividades industriales y a la deficiente regulación de las descargas [3]; un caso emblemático es el derrame ocurrido en diciembre de 2004 en la jurisdicción de Nanchital/Pajaritos, donde la fuga de más de 5000 barriles de petróleo crudo impactó negativamente el río Coatzacoalcos [3].

Hacia finales del siglo, en cambio, se documentó un mayor predominio de HAP pirogénicos, relacionados con procesos de combustión, entre ellos la incineración de residuos industriales y sólidos urbanos, la combustión de combustibles, las emisiones vehiculares y los incendios en zonas de humedales [19]. Esta evolución muestra que las emisiones potenciales de HAP en la cuenca han sido diversas y han cambiado a medida que ha avanzado el desarrollo de la región.

Conforme a la información del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC, 2024), Coatzacoalcos concentra la mayor cantidad de contaminantes reportados al medio acuático, con 1378.4 kg/año, mientras que en Minatitlán se registran 408.0 kg/año al agua y aproximadamente 26.5 millones de kg/año de emisiones al aire. Adicionalmente, en el Complejo Petroquímico Cangrejera, en Coatzacoalcos, se reportan transferencias para reúso de compuestos orgánicos como tolueno, benceno y estireno [144]. Si bien estos registros no constituyen evidencia directa de la presencia de HAP, permiten dimensionar la intensidad de las actividades industriales.

Capítulo 5. Métodos

5.1 Trabajo en campo

5.1.1 Estrategia de muestreo

Se recolectaron un total de 35 muestras de sedimentos superficiales a lo largo del río Coatzacoalcos, desde la localidad de Arroyo Blanco (municipio de Jáltipan) hasta su desembocadura. El estudio se llevó a cabo durante la temporada de lluvias mediante dos campañas de muestreo realizadas en septiembre de 2024 y en junio de 2025. Respecto al diseño del muestreo espacial los sitios de muestreo se distribuyeron de manera estratégica para lograr una cobertura representativa a lo largo del río, permitiendo así la evaluación de áreas y tramos que, bajo un criterio estrictamente enfocado en las posibles fuentes puntuales de contaminación y localidades cercanas, habrían quedado excluidos del diagnóstico.

El método de recolección de las muestras varió operativamente entre las campañas. Durante el primer muestreo se realizó un recorrido terrestre en camioneta, extrayendo los sedimentos directamente con una pala metálica de jardinería a $\approx$ 1.5 m de la orilla, hacia el interior del río. En el segundo muestreo, la recolección se realizó a bordo de una lancha utilizando una draga tipo Van Veen, de la cual se recuperó la muestra de sedimento con una pala de metal; sin embargo, las colectas también se mantuvieron a una distancia de 1.5 a 2 m de la ribera. Esta decisión de muestrear en los márgenes se fundamentó en la dinámica hidrológica del sistema, debido a que la zona central del cauce presenta mayor profundidad y velocidad de flujo, lo que dificulta el manejo adecuado de la draga. Por otra parte, las orillas actúan como zonas de baja energía que favorecen la retención de los sedimentos y sus contaminantes asociados.

En ambos casos, las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio (previamente lavados con hexano grado HPLC y estufados a 180 °C durante 8 horas) y transportadas en hieleras con refrigeración continua hasta su llegada al laboratorio.

La ubicación geográfica de los 35 sitios de muestreo, junto con sus coordenadas exactas, se detalla en la Tabla 3 y se ilustra en la Figura 3. Además, la evidencia fotográfica de las campañas de recolección de muestras se encuentra documentada en el Apéndice A.

Tabla 3. Ubicación y coordenadas geográficas de los puntos de muestreo de sedimentos en el río Coatzacoalcos

Puntos de Muestreo	Municipios	Latitud (N)	Longitud (W)	Descripción
1	**Jáltipan e Hidalgotitlán**	17°44'32.07"	94°41'2.07"	Comprende desde Arroyo Blanco y la cabecera de Hidalgotitlán, pasando por la zona de la Isla de Tacamichapan (Yancuigapan, Lajilla) y otras comunidades ribereñas como las Ánimas y El Jagüey
2		17°46'37.6''	94°38'48.4''	
3		17°48'33.2''	94°39'1.19''	
4		17°48'53.5''	94°37'53.2''	
5		17°50'34.7''	94°38'8.7''	
6		17°51'2.3''	94°38'24''	
7		17°51'38.5''	94°38'25.8''	
8		17°52'9.3''	94°42'22.2''	
9		17°52'19.6''	94°40'3.6''	
10		17°52'15.1''	94°38'42.9''	
11		17°52'51.2''	94°35'33.2''	
12		17°53'22.1''	94°33'59.2''	
13		17°55'13.1''	94°33'42.5''	
14		17°56'3''	94°33'11''	
15		17°57'53.5''	94°33'15.4''	
16	**Minatitlán**	17°58'37.6''	94°32'37.2''	Inicia en la zona de Capoacán, pasa por la zona industrial de la Refinería General Lázaro Cárdenas del Río, la confluencia con el río Uxpanapa, y llega hasta la zona del Puente Ing. Antonio Dovalí.
17		17°58'30.1''	94°32'7.9'	
18		17°58'27.40"	94°32'4.70"	
19		17°58'0.90"	94°29'13.10"	
20		17°57'27.50"	94°28'43.50"	
21		17°57'57.60"	94°28'21.60"	
22		17°58'12.9''	94°28'29.3''	
23		17°59'43.80"	94°28'38.00"	
24		18° 0'46.60"	94°27'49.30"	
25		18° 1'3.80"	94°27'4.40"	
26		18° 2'52.60"	94°27'18.90"	
27	**Nanchital y Cosoleacaque**	18° 3'20.08"	94°25'16.70"	Incluye los puntos frente a Nanchital, el Polvorín y el Estero del Pantano.
28		18° 4'18.90"	94°24'48.60"	
29		18° 4'55.20"	94°24'52.80"	
30		18° 6'21.12"	94°27'53.7"	
31	**Coatzacoalcos**	18° 6'23.00"	94°27'13.10"	Abarca desde los Puentes Calzadas y Coatzacoalcos I, hasta la zona de la Panga, justo antes de desembocar al Golfo de México.
32		18° 6'20.20"	94°26'11.80"	
33		18° 5'53.10"	94°25'46.10"	
34		18° 7'2.09"	94°24'57.60"	
35		18° 9'4.30"	94°24'26.50"	



Figura 3. Distribución espacial de los sitios de muestreo en el río Coatzacoalcos y sus principales fuentes de contaminación

5.2 Trabajo en laboratorio

El acondicionamiento de las muestras en el laboratorio, preservadas en campo, comenzó con su aclimatación a temperatura ambiente y la posterior homogeneización del material. Para eliminar la humedad contenida, los sedimentos se secaron en una estufa de secado a ≤ 40 °C alrededor de 6 días. Posteriormente, se realizó la molienda del sedimento deshidratado en un mortero de porcelana, seguida de un tamizado a 0.250 mm, cuyo propósito fue maximizar la superficie de contacto para facilitar la extracción sólido/líquido de los HAP. El producto final se almacenó en recipientes de vidrio en oscuridad a temperatura ambiente hasta el momento de su uso en este proyecto.

5.2.1 Determinación de materia orgánica

El procedimiento para la determinación de MO en las muestras de sedimento se fundamentó en el principio de oxidación del método AS-07, de Walkley y Black, descrito en el apartado 7.1.7 de la NOM-021-SEMARNAT-2000 [145]. Este fue adaptado a una escala menor para optimizar el análisis, ajustando la masa de la muestra y los volúmenes de los reactivos de manera proporcional, y utilizando sulfato ferroso amoniacal ($FeSO_4(NH_4)_2\ (SO_4)_2{\cdot}6H_2O$) como agente titulante alternativo, conforme a las observaciones de la propia norma.

El fundamento químico del método se basa en la oxidación de la MO presente en el sedimento mediante la reacción mostrada en la ecuación 1 con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$, 1.0 N) y ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Posteriormente, el exceso de $K_2Cr_2O_7$ es titulado con $FeSO_4(NH_4)_2\ (SO_4)_2{\cdot}6H_2O$, 0.5 N en presencia de ácido fosfórico al 85% (H_3PO_4) y fluoruro de sodio (NaF), utilizando difenilamina (0.5 g disueltos en 20 mL de agua tridestilada y 100 mL de H_2SO_4) como indicador. Esta reacción se muestra en la ecuación 2. Los pasos detallados de esta modificación se esquematizan en la Figura 4.

$$C_nH_{2n}+K_2Cr_2O_7^{2-}+nH^+ \rightarrow CO_2+2Cr^{3+}+K_2SO_4+nH_2O \qquad 1$$

$$Cr_2O_7^{2+}+6Fe^{2+}+14H^+ \rightarrow 2Cr^{3+}+6Fe^{3+}+7H_2O \qquad 2$$

El procedimiento de Walkley-Black está diseñado para cuantificar principalmente el CO lábil (fácilmente oxidable) [145, 146]. Cabe resaltar que, si bien los HAP forman parte de la reserva de CO, su estructura de anillos aromáticos los hace sumamente recalcitrantes, limitando su oxidación completa bajo las condiciones estándar de este método, el cual produce una oxidación incompleta del CO [147].

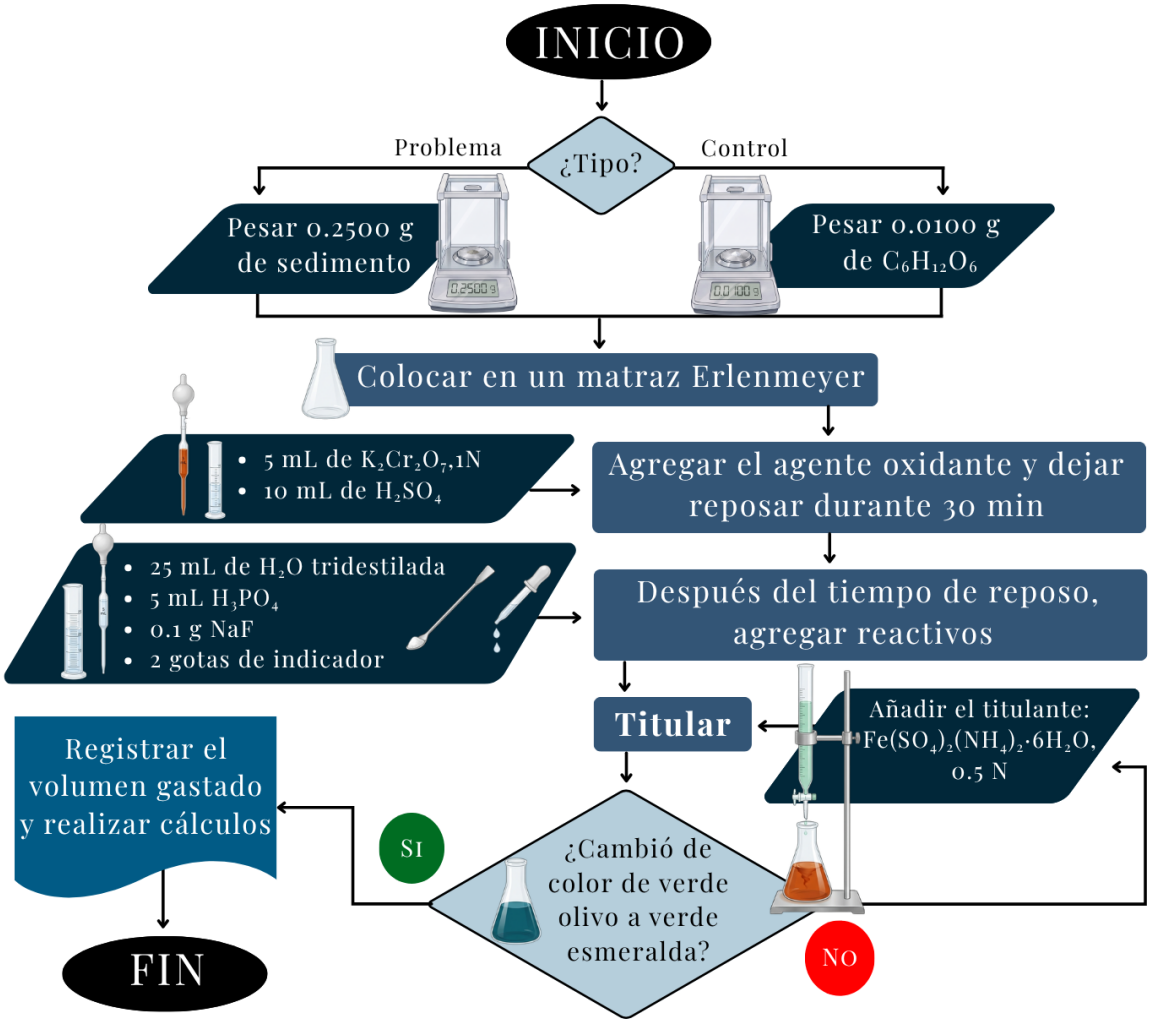


Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento de muestras para la determinación de MO. Estructura y diseño de elaboración propia creados en Canva; ilustraciones de apoyo generadas con Figure Labs.

Adicionalmente, se descartó que los HAP generaran una sobreestimación o interferencia significativa en los resultados de MO debido a la diferencia en los órdenes de magnitud. Ya que la contribución oxidativa de los HAP (presentes en orden de trazas, ng/g) resulta analíticamente despreciable frente a la MO (cuantificada a nivel porcentual, %) total del sedimento [146].

Como parte del control de calidad, el análisis se realizó por duplicado e incluyó dos blancos de referencia. Adicionalmente, el método se validó al aplicar el mismo procedimiento a 18 réplicas de un estándar primario (10 mg de dextrosa, $C_6H_{12}O_6$), tomando como

referencia su valor teórico de 40% de carbono orgánico (CO). Los resultados de esta validación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Validación del método utilizando dextrosa como estándar primario para la determinación de carbono orgánico (CO)

Valor experimental obtenido	39.52 %
Desviación Estándar	0.91
Coeficiente de Variación	2.30
Porcentaje de recuperación	98.82 %

Para esta determinación se emplearon reactivos de grado analítico, incluyendo H_2SO_4 y $FeSO_4(NH_4)_2\ (SO_4)_2{\cdot}6H_2O$ adquiridos de J.T. Baker (México y USA, respectivamente). Igualmente, la $C_6H_{12}O_6$, como estándar de control, fue utilizada de la marca J.T. Baker. El $K_2Cr_2O_7$, H_3PO_4, NaF y la difenilamina, todos de la marca MEYER (México). En cuanto al material de vidrio y al equipo, la oxidación y la titulación posterior se realizaron en matraces Erlenmeyer de 125 mL. Se emplearon espátulas de acero inoxidable para manipular las sales, así como probetas de vidrio y pipetas volumétricas de 5 mL. El volumen de titulante fue cuantificado empleando una bureta de 25 mL con una sensibilidad de 0.1 mL, y el pesaje exacto de las muestras de sedimento y el estándar se realizó en una balanza analítica digital OHAUS Explorer EX 124 con una sensibilidad de 0.0001 g.

Finalmente, a partir del volumen de titulante consumido, los porcentajes de carbono orgánico (%CO) y materia orgánica (%MO) se calcularon mediante las ecuaciones 3 y 4:

$$\%CO = 5\left(1-\frac{V_m}{V_b}\right)\left(\frac{N \cdot 0.003 \cdot 100}{w}\right) \quad (3)$$

$$\%MO = \%CO \cdot 1.73 \quad (4)$$

donde:

- **5** (mL): Volumen de $K_2Cr_2O_7$ agregado
- $\mathbf{V_m}$ (mL): Volumen de $FeSO_4(NH_4)_2\ (SO_4)_2{\cdot}6H_2O$, 0.5 N gastado en la titulación de la muestra
- $\mathbf{V_b}$ (mL): Volumen de $FeSO_4(NH_4)_2\ (SO_4)_2{\cdot}6H_2O$, 0.5 N gastado en la titulación del blanco
- **N**: Normalidad del $K_2Cr_2O_7$ = 1.0 N
- 0.003 (g/meq): Peso miliequivalente del carbono

- $\boldsymbol{w}$ (g): masa de la muestra de sedimento
- **1.73**: Factor de conversión de van Bemmelen, asumiendo que la MO contiene ≈ 58% de carbono.

Debido a las modificaciones realizadas al método original, no se utilizó el factor empírico de corrección estándar (1.33). En su lugar, la exactitud del método y el factor de corrección aplicable se determinaron a partir de las pruebas de validación con el estándar primario. En ese sentido, el porcentaje de recuperación se calculó relacionando el valor experimental promedio de CO obtenido en las réplicas de $C_6H_{12}O_6$ frente a su valor teórico (40%) empleando la siguiente relación expresada en la ecuación 5:

$$\textbf{Porcentaje de recuperación } (\%) = \left(\frac{\textbf{valor experimental obtenido de CO}}{\textbf{valor teórico de CO}}\right) \cdot \textbf{100} \qquad 5$$

5.2.2 Determinación de HAP

La extracción y preparación de las muestras de sedimento para la cuantificación de analitos se llevó a cabo mediante un proceso de extracción sólido-líquido por ultrasonido. Este procedimiento es una adaptación del método 3550C de la US EPA [148]. El protocolo consta de tres etapas principales: extracción con disolventes, concentración del extracto y preparación final para su análisis instrumental. La secuencia detallada de estas operaciones, incluyendo los volúmenes de mezcla de disolventes (hexano/acetona 1:1), los tiempos de sonicación y las condiciones de operación, se describe en el diagrama de flujo de la Figura 5.

Para la cuantificación de los HAP, se preparó una curva de calibración a partir de una mezcla estándar de los 16 HAP prioritarios (100 µg/mL en metanol, Chem Service Inc., USA), véase apéndice D. Las disoluciones patrón se prepararon utilizando una mezcla de hexano/acetona (1:1, v/v), estableciendo seis niveles para abarcar un intervalo de concentración de 10 a 100 ng/mL (específicamente 10, 20, 40, 60, 80 y 100 ng/mL). Estas soluciones, junto con un blanco de disolvente, fueron inyectadas en el equipo cromatográfico operando bajo los parámetros instrumentales detallados en la Tabla 5.

Posteriormente, los datos analíticos obtenidos se procesaron mediante regresión lineal, buscando establecer un coeficiente de determinación óptimo ($R^2 \geq 0.99$) para asegurar la linealidad del modelo a lo largo de todo el rango de trabajo. Finalmente, como parte integral del control de calidad, las muestras de control y los blancos fueron fortificados con una concentración conocida de 40 ng/mL de la disolución estándar para evaluar la eficiencia del método.

Tabla 5. Parámetros Instrumentales para el análisis en GC-MS/MS de las muestras

Parámetro	Método experimental
Marca y modelo del GC-MS/MS	Agilent Technologies. Cromatógrafo de gases (8890) e inyector automático acoplado a un espectrómetro de masas (7000D). Software: Mass Hunter
Columna cromatográfica capilar	HP-5 MS de 30 m x 0.25 mm x 0.25 µm
Volumen de inyección	1 µL
Modo de inyección	Splitless (5 mL/min al 1 min)
Temperatura del puerto de inyección	300 °C
Flujo del gas acarreador	1 mL/min (He)
Flujo de purga del septum	3mL/min
Programa de temperatura y tiempo de retención	40 °C (1 min), 10 °C/min hasta 310 °C, 310 °C (5 min)
Tiempo total de cada corrida	33 min
Temperatura de la línea de transferencia	300 °C
Temperatura de la fuente	300 °C
Modo de detección	Monitoreo Dinámico de Reacciones Múltiples (dMRM)

Para el desarrollo del método, todos los disolventes empleados (hexano, metanol y acetona) fueron de grado HPLC (marcas Honeywell y Tedia, USA). Se utilizó una ampolleta de estándar de mezcla de los 16 HAP prioritarios con una concentración de 100 µg/mL en metanol, adquirida a través de Chem Service Inc., USA.

La cristalería y el material utilizado incluyeron tubos de politetrafluoroetileno etileno-propileno fluorado (Teflón-FEP) de 30 mL marca Thermo Scientific Nalgene Oak Ridge, matraces bola de fondo plano de 50 mL, espátulas de acero inoxidable, pipetas Pasteur, probetas de vidrio, vasos de precipitados y viales cromatográficos Agilent de 2 mL.

En cuanto a la instrumentación, se empleó una balanza analítica digital OHAUS Explorer EX 124, un agitador vórtex Thermo Scientific Digital 88882009, un baño ultrasónico BRANSON 3800, una ultracentrífuga HERMLE Z446 y un rotaevaporador Heidolph LABORTA 4010 para la concentración de los extractos.

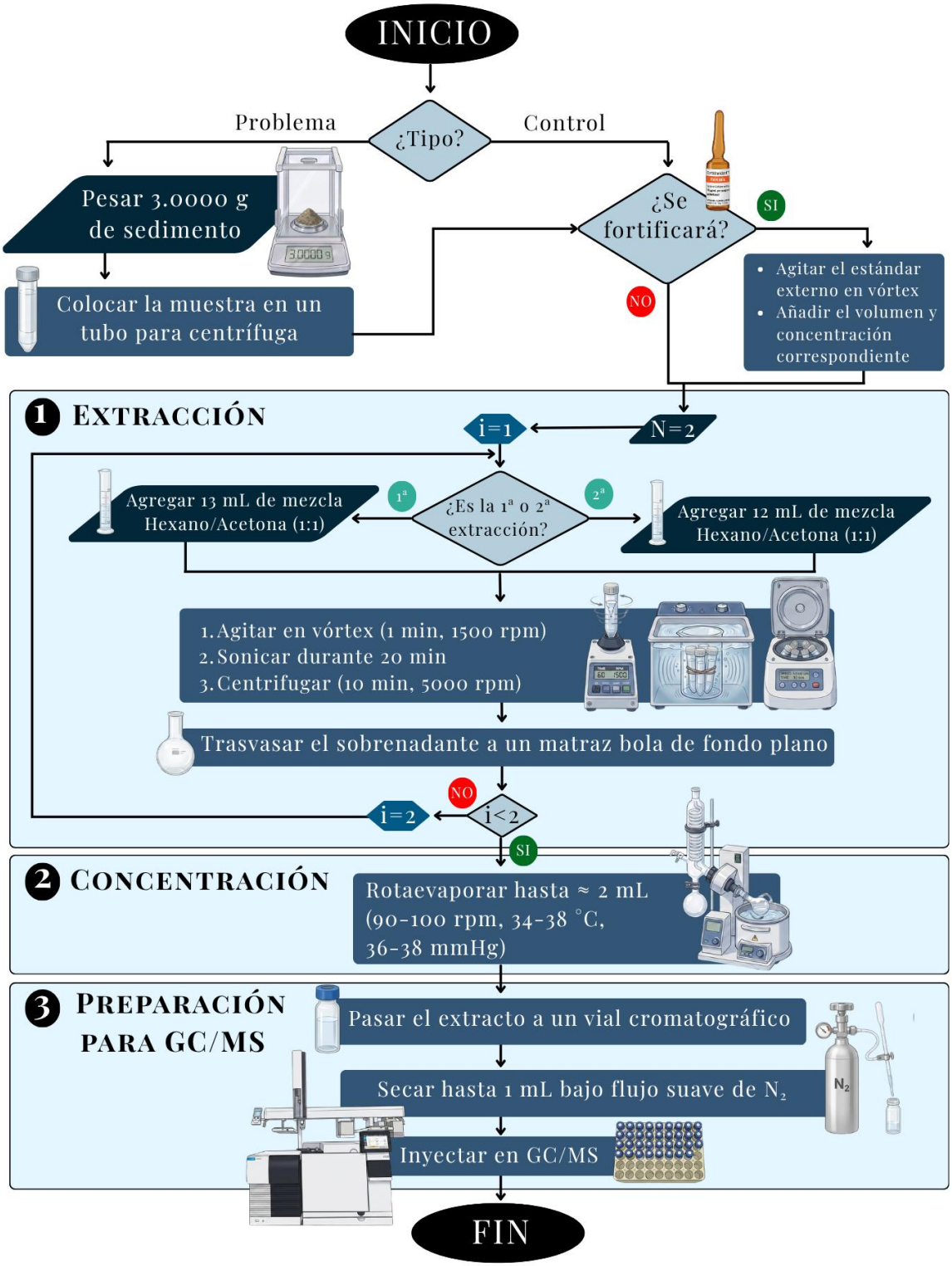


Figura 5. Diagrama de flujo para la extracción de HAP en muestras de sedimento y su preparación para el análisis. Estructura y diseño de elaboración propia creados en Canva; ilustraciones de apoyo generadas con Figure Labs.

Nota: **i** representa el contador de la extracción en curso y **N** el número total de extracciones consecutivas.

5.2.2.1 Aseguramiento y control de calidad (QA/QC)

Con el propósito de prevenir la contaminación cruzada y garantizar la confiabilidad de los resultados analíticos, se implementó un riguroso protocolo de limpieza de todo el material empleado, acompañado del uso sistemático de blancos de control a lo largo del procedimiento.

Inicialmente, el material se lavó con agua y jabón sin espuma (HYCLIN, HYCEL, México). Posteriormente, se sometió a un tren de lavado por triplicado, empleando disolventes orgánicos con un gradiente de polaridad (hexano, acetona y metanol), y se repitió el proceso en orden inverso. Finalmente, con el fin de asegurar la eliminación completa de trazas, el material de acero inoxidable y el vidrio no volumétrico se secaron en una estufa (Thermo Scientific Heratherm) a 180 °C durante 8 horas.

Adicionalmente, se incorporaron tres tipos de blancos durante el desarrollo experimental. En primer lugar, se utilizó un blanco de método, cuya función principal es identificar y cuantificar posibles aportes externos de HAP procedentes de los reactivos, del material o del ambiente del laboratorio, lo que permite corregir los resultados finales de cada lote analítico. En segundo lugar, se implementó un blanco fortificado, que consiste en la adición de 1 mL de la solución estándar, ya sea a un blanco de método o a una muestra problema; su propósito es evaluar el porcentaje de recuperación y determinar la eficiencia del método de extracción, tanto en un medio libre de interferencias como directamente en la matriz de estudio. Finalmente, se analizó un blanco de matriz, correspondiente a la muestra problema sin fortificar, con el fin de determinar la concentración basal de HAP presentes y así establecer la concentración real del analito.

5.2.2.2 Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación (% R) representa una herramienta fundamental para evaluar la veracidad de un método analítico, la cual se define como la proximidad entre el valor promedio obtenido de una serie de mediciones y el valor aceptado como verdadero. También, este parámetro permite estimar el sesgo, entendido como la diferencia sistemática entre el valor cuantificado y el valor de referencia; una estrategia particularmente útil cuando no se dispone de materiales de referencia certificados (MRC). Metodológicamente, su evaluación consiste en analizar una muestra fortificada con la adición de un analito a una concentración conocida. Al contrastar la respuesta experimental obtenida con la cantidad

teórica añadida, es posible determinar con precisión la capacidad del método para recuperar y cuantificar los analitos de interés [149].

5.2.2.2.1 Recuperación de blancos

Para evaluar la veracidad del método, se calculó la respuesta corregida del blanco fortificado (RCF) restando la señal obtenida en el blanco de método, de acuerdo con la ecuación 6.

$$\mathbf{RCF = R_{bf} - R_{bm}} \quad 6$$

donde:

- **RCF**: Respuesta corregida del blanco fortificado
- $\mathbf{R_{bf}}$: Respuesta instrumental del blanco fortificado
- $\mathbf{R_{bm}}$: Respuesta instrumental del blanco de método

Posteriormente, el %R se determinó como la relación entre la respuesta corregida y la respuesta teórica del estándar utilizado para la fortificación (40 ng/mL), según la ecuación 7.

$$\mathbf{\%R = \frac{RCF \cdot 100}{R_{std}}} \quad 7$$

donde:

- $\mathbf{R_{std}}$: Respuesta instrumental de la solución estándar a 40 ng/mL

5.2.2.2.1 Recuperación de la matriz

Para el análisis de las muestras experimentales, se aplicó una corrección previa para restar la concentración basal del analito. La respuesta corregida de la matriz (RCM) se obtuvo de acuerdo con la ecuación 8.

$$\mathbf{RCM = R_{exp} - R_{matriz}} \quad 8$$

donde:

- RCM: Respuesta corregida de la matriz
- R_{exp}: Respuesta experimental de la muestra fortificada
- R_{matriz}: Respuesta instrumental del blanco de matriz (muestra sin fortificar)

Finalmente, la eficiencia del método, considerando el efecto de la matriz, se evaluó mediante la ecuación 9.

$$\mathbf{\%R_{matriz} = \frac{RCM \cdot 100}{R_{std}}} \quad 9$$

5.2.2.3 Límite de Detección y Cuantificación

Para evaluar la sensibilidad del método analítico, se determinaron el límite de detección (LD) y el límite de cuantificación (LC). El LD se define como la concentración mínima de analito que puede detectarse de manera confiable, mientras que el LC representa la concentración mínima que puede cuantificarse con un nivel aceptable de precisión y veracidad [149].

Para su determinación, primeramente, se calculó la desviación estándar ajustada (s'_0) a partir de las respuestas analíticas, tomando en consideración tanto el número de réplicas de la muestra como las réplicas del blanco, de acuerdo con la ecuación 10 [149]:

$$\mathbf{s'_0 = s_0 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n_b}}} \qquad 10$$

donde:

- $\mathbf{s'_0}$: Desviación estándar ajustada para el cálculo de los límites (LD o LC)
- $\mathbf{s_0}$: Desviación estándar de las respuestas obtenidas
- $\mathbf{n}$: Número de réplicas de medición (inyecciones)
- $\mathbf{n_b}$: Número de réplicas del blanco

Consecutivamente, los límites se calcularon relacionando esta desviación estándar ajustada con la sensibilidad del instrumento, representada por la pendiente de la curva de calibración, lo que permite expresar los resultados directamente en unidades de concentración. Se aplicaron las ecuaciones 11 y 12 para obtener el LD y LC, respectivamente [149].

$$\mathbf{LD = \frac{3 \cdot s'_0}{m}} \qquad 11$$

$$\mathbf{LC = \frac{10 \cdot s'_0}{m}} \qquad 12$$

donde:

- $\mathbf{m}$: Pendiente de la curva de calibración

5.3 Análisis de datos

5.3.1 Análisis geoespacial y socioambiental

La ubicación de los sitios de muestreo se determinó inicialmente en Google Earth Pro; posteriormente, las coordenadas se convirtieron a grados decimales y se exportaron al

software de Sistemas de Información Geográfica QGIS (versión 3.40.13 Bratislava) para su representación cartográfica.

Para la caracterización del sistema ambiental, cuya cartografía resultante se integra en el Apéndice A, se utilizaron capas vectoriales y ráster provenientes de diversas fuentes gubernamentales. Ese procesamiento geoespacial consistió en la superposición de las distintas capas para identificar la proximidad y la distribución de las fuentes contaminantes a nivel municipal.

Respecto al medio físico, la división política, el uso de suelo, la vegetación, la edafología y los cuerpos de agua se obtuvieron del Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, datos 2026) [110]. La geomorfología (Modelo Digital de Elevación Continuo Mexicano), curvas de nivel y topoformas se descargaron del Marco Geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, con datos de 2024 y 2025) [150]. Las unidades litológicas se extrajeron del portal GeoInfoMex del Servicio Geológico Mexicano (SGM) [151].

La red hidrográfica se obtuvo del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL versión 4.0) del INEGI [152]. Los datos de calidad del agua (2024) se recopilaron del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA versión 3.0) de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) [108], mientras que el peligro por inundación se consultó en el Atlas Nacional de Riesgos del Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) [117].

Las fuentes de contaminación e infraestructura se identificaron utilizando el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2025) del INEGI [153], el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC, 2024) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [144], el Sistema de Información de Hidrocarburos (SIH) de la Secretaría de Energía (SENER, 2026) [154] y el Inventario de Sitios Contaminados y Remediados de la SEMARNAT (2025) [13].

Las estadísticas sociales se fundamentaron en el Censo de Población y Vivienda (CPV, 2020) del INEGI [155] y en las proyecciones poblacionales para 2024 del Consejo Nacional de Población (CONAPO) [13].

Finalmente, para complementar la evaluación de riesgo desde una perspectiva de salud pública, se integraron los registros de las tasas de mortalidad por cáncer en la región de estudio. Estos datos estadísticos se obtuvieron de la base de datos de defunciones del INEGI

(2024) [135]. Mediante el uso de las claves oficiales, la información se filtró según la presencia de tumores malignos, el sexo y la edad; posteriormente, la población se estratificó en seis grupos ocupacionales y los casos se clasificaron en cinco grupos según el sistema anatómico afectado. Dado que la normatividad exige confidencialidad médica, la información epidemiológica se abordó a escala municipal en lugar de emplear una georreferenciación puntual. Para visualizar esta dinámica, se construyó una matriz de contingencia en Microsoft Excel (versión 2016), que asocia el sector ocupacional con el sitio anatómico del tumor maligno primario en los cinco municipios del área de estudio.

5.3.2 Análisis estadístico

El tratamiento de los datos experimentales se realizó mediante dos herramientas computacionales. Inicialmente, el análisis de estadística descriptiva se llevó a cabo utilizando el software Microsoft Excel (versión 2016), el cual se empleó para el cálculo de medidas de tendencia central y de dispersión (como el promedio y la desviación estándar), así como para la estructuración de la base de datos y la generación de gráficos.

Para el tratamiento de los datos no detectados y cuantificados, o por debajo de los límites de detección y cuantificación ($<$ LD y $<$ LC), se emplearon dos enfoques. Para el cálculo de la concentración total (Σ_{16} HAP) la identificación del origen y el análisis de correlación con la MO, se aplicó el criterio de límite inferior (LB, Lower Bound) o de sustitución simple, asignando el valor de cero a dichos datos [156]. Esta aproximación permite evitar asignar concentraciones hipotéticas a resultados no detectados o no cuantificados, ya que el propósito de estos análisis fue describir las concentraciones observadas y evaluar las asociaciones estadísticas entre las variables, lo que minimiza la sobreestimación de las concentraciones totales.

En contraste, para los cálculos correspondientes a la evaluación de riesgo, se aplicó el criterio de límite medio (MB, Middle Bound), sustituyendo los datos censurados por LD/2 o LC/2, conforme a las aproximaciones descritas por la EFSA [156] y aceptadas por la US EPA [157] para el tratamiento de datos cercanos al LD y a LC en evaluaciones de riesgo, en apego al principio de precaución [158]. Por ello, el enfoque MB proporciona una estimación intermedia que reduce la probabilidad de subestimar el riesgo sin asumir el escenario más conservador representado por el criterio del límite superior (UB, Upper Bound).

Posteriormente, el análisis estadístico inferencial y de correlación se realizó en el entorno de programación MATLAB R2024b. Ahí se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución de los datos obtenidos. A partir de los resultados de la prueba de

normalidad, se determinó el uso de estadística no paramétrica, aplicando el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar la asociación entre el porcentaje de materia orgánica (%MO) y la suma total de HAP (Σ_{16} HAP), y para explorar la relación individual entre el %MO y la concentración de BaP. Para todas las pruebas estadísticas se estableció un nivel de significancia del 5% ($p < 0.05$) [158]. El código computacional implementado y su respectiva salida de resultados se detallan en el Apéndice C.

5.3.3 Identificación del origen

La determinación del origen de los HAP presentes en los sedimentos (petrogénico o pirogénico) se realizó mediante índices de diagnóstico o de procedencia, que se fundamentan en las diferencias de estabilidad termodinámica entre pares de isómeros con la misma masa molecular. Los procesos de combustión favorecen la formación de isómeros menos estables y de APM; en cambio, los procesos de formación de petróleo, desarrollados a temperaturas relativamente bajas, preservan los isómeros termodinámicamente más estables y de BPM [159–161].

En una primera etapa de discriminación, se evaluó la relación entre la Σ_{16} HAP de BPM y los de APM, conforme al criterio anterior [159]. Posteriormente, para mejorar la resolución en la identificación de fuentes específicas (como la combustión de biomasa, las emisiones vehiculares y los procesos industriales), se calcularon relaciones isoméricas de diagnóstico complementarias. En todos los índices de origen se aplicó el criterio de límite inferior descrito en la sección 5.3.2. Cuando no se detectaron los compuestos necesarios para calcular una relación isomérica, el índice se reportó como "No Calculable" (NC). Los índices evaluados y sus respectivos umbrales de interpretación se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios para las relaciones de diagnóstico de HAP y umbrales para la identificación de fuentes de emisión.

Índice de diagnóstico	Origen	
	Petrogénico	Pirogénico
ΣBPM/ΣAPM	> 1	< 1
Σ COMB/ Σ_{16} HAP	-	~ 1
A0/A0+P0	< 0.1	> 0.1
BaP/BaP+ghi	< 0.6 (No emisiones de tráfico)	> 0.6 (Emisiones de tráfico)

Basado en [57, 159]

Nota: **ΣBPM** es la suma de los HAP de bajo peso molecular; **ΣAPM** es la suma de los HAP de alto peso molecular; **Σ_{16} HAP** es la suma total de los 16 HAP prioritarios; **ΣCOMB** se refiere a la suma de fluoranteno, pireno, benzo[a]antraceno, benzo[b]fluoranteno,

benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno, indeno[1,2,3-cd]pireno y benzo[ghi]perileno. A0 corresponde al antraceno, P0 al fenantreno, BaP al benzo[a]pireno y ghi al benzo[ghi]perileno.

Cabe destacar que, si bien se han reportado múltiples índices diagnósticos, el análisis de las fuentes de emisión se limitó exclusivamente a las relaciones presentadas en la Tabla 6. Esta selección se justificó por las particularidades de los resultados analíticos obtenidos, específicamente la incidencia de concentraciones por debajo de LD y LC, dichas muestras arrojaron resultados matemáticamente indeterminados. Estos casos se reportaron como "No Calculables" (NC).

5.3.4 Evaluación de riesgo ambiental

5.3.4.1 Rangos y niveles de efecto

Las concentraciones individuales de HAP se compararon con los criterios de protección para ecosistemas bentónicos establecidos en las Guías de Calidad de Sedimentos (SQGs, por sus siglas en inglés, presentes en los SQuiRTs, Screening Quick Reference Tables) de la NOAA.

Por un lado, se empleó el Rango de Efecto Bajo (ERL) y el Rango de Efecto Medio (ERM). Las concentraciones por debajo del ERL indican que los efectos biológicos adversos se esperan rara vez, mientras que niveles superiores al ERM señalan que los efectos adversos son probables [104].

Y por otra parte, se utilizó el Nivel de Efecto Umbral (TEL), el cual representa la concentración por debajo de la cual no se prevén efectos tóxicos, y el Nivel de Efecto Probable (PEL), que marca el límite sobre el cual los efectos adversos ocurren con frecuencia [105].

A partir de estas comparaciones, la probabilidad de observar efectos biológicos adversos en los organismos bentónicos se clasifica en tres rangos [103–105]:

- **Raramente:** Cuando las concentraciones son $<$ ERL o $<$ TEL.
- **Ocasionalmente:** Si las concentraciones se ubican entre el ERL y el ERM, o entre el TEL y el PEL.
- **Frecuentemente:** Cuando las concentraciones son $\geq$ ERM o $\geq$ PEL.

Además, otro de los criterios empleados fueron las concentraciones máximas permisibles (MPC, por sus siglas en inglés), definidas como límites ecológicos determinados matemáticamente. Estos valores establecen la concentración máxima de un contaminante que no debe superarse para proteger al menos al 95 % de las especies de una comunidad

biológica ante exposiciones crónicas [162]. Los valores de referencia se presentan en la Tabla A.2 de los anexos.

5.3.4.2 Cocientes de riesgo ecológico

Los índices compuestos calculados fueron el Cociente Medio del ERM (M-ERM-Q) y el Cociente Medio de la Concentración Máxima Permisible (M-MPC-Q). Normalizan la concentración de cada contaminante respecto a su límite correspondiente (ERM o MPC, respectivamente) y promedian la suma de estos valores entre el número total de compuestos analizados [4].

La aplicación conjunta de ambos coeficientes garantiza una evaluación integral del riesgo; en particular, el M-MPC-Q actúa como un complemento del M-ERM-Q, lo que permite contrastar los niveles de contaminación bajo diferentes criterios ecotoxicológicos. Este enfoque comparativo reduce la incertidumbre en la estimación de la toxicidad y brinda una mayor robustez al diagnóstico [4, 6, 163]. Las ecuaciones empleadas son las siguientes:

$$\mathbf{M\text{-}ERM\text{-}Q} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{ERM_i} \qquad 13$$

$$\mathbf{M\text{-}MPC\text{-}Q} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{MPC_i} \qquad 14$$

donde:

- $\mathbf{C_i}$: Concentración del HAP_i cuantificada en la muestra de sedimento
- ERM_i y MPC_i: Valores de referencia correspondientes para cada HAP (Tabla A.2.)
- $\mathbf{n}$: Número total de compuestos evaluados.

Aunque la probabilidad de efectos biológicos adversos puede variar ligeramente entre literatura, los umbrales de los índices M-ERM-Q y M-MPC-Q se aplican de manera generalizada [6, 164]. Las cuatro categorías de riesgo y sus respectivos rangos de probabilidad se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorías de riesgo ecológico y probabilidad de toxicidad según los índices M-ERM-Q y M-MPC-Q

Rango del Índice	Categoría de Riesgo	Probabilidad de Toxicidad
≤ 0.1	Baja	$< 9\%$
$0.11 - 0.5$	Moderada	$\sim 21\%$ - 30%
$0.51 - 1.5$	Alta	$\sim 49\%$ - 50%
> 1.5	Muy alta	$\geq 75\%$

Basado en [6, 163]

5.3.4.3 Equivalente Tóxico de Benzo[a]pireno (BaP_{TEQ})

Para evaluar el potencial carcinogénico de la mezcla de HAP, se calculó el Equivalente Tóxico basado en el Benzo[a]pireno (BaP_{TEQ}). Este cálculo se realizó sumando el producto de la concentración de cada HAP individual por su respectivo factor de equivalencia utilizando la siguiente ecuación [107, 163, 164]:

$$\mathbf{BaP_{TEQ}} = \sum(\mathbf{C_i} \times \mathbf{TEF_i}) \qquad 15$$

donde:

- $\mathbf{C_i}$: Concentración del HAP_i cuantificada en la muestra de sedimento
- $\mathbf{TEF_i}$: Factor de Equivalencia Tóxica

Los valores de TEF utilizados (véase la Tabla A.2) corresponden a los estándares internacionales establecidos para estimar la toxicidad de cada isómero respecto al BaP, al que se le asigna el valor de referencia de 1.0. Resulta pertinente destacar la ponderación del DahA, al cual se le asignó un TEF de 5.0; esta ponderación se fundamenta en que, aunque en dosis masivas su letalidad es equiparable a la del BaP, en escenarios reales de exposición ambiental crónica ha evidenciado un potencial toxicológico significativamente mayor [107].

Capítulo 6. Resultados y discusión

6.1 Aseguramiento y control de calidad (QA/QC)

Los parámetros de control de calidad evaluados para garantizar la confiabilidad de las concentraciones de los 16 HAP prioritarios en las 35 muestras de sedimento se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Porcentajes de Recuperación (%R), Límites de Detección y Cuantificación (LD y LC), Coeficiente de Correlación (r)

HAP	Recuperación (% R)		Límites (ng/g)		r
	Blancos	Matriz	LD	LC	
Nap	56.68	60.85	14.09	46.98	0.998
Acy	56.67	68.05	0.05	0.17	0.999
Ace	65.18	73.57	0.06	0.21	0.999
Fl	67.73	84.52	0.44	1.47	0.997
Phe	66.28	86.79	1.93	6.44	0.999
Ant	55.34	83.45	2.40	8.01	0.999
Fla	60.47	82.57	0.89	2.96	0.999

HAP	Recuperación (% R)		Límites (ng/g)		r
	Blancos	Matriz	LD	LC	
Pyr	58.53	82.57	2.92	9.74	0.999
BaA	20.86	74.43	37.86	126.21	0.997
Chr	28.52	68.71	19.40	64.65	0.997
BbF	11.26	75.53	16.09	53.64	0.962
BkF	6.93	67.27	10.57	35.25	0.997
BaP	18.14	75.76	6.33	21.11	0.999
InP	44.07	97.64	2.49	8.31	0.998
DahA	59.05	81.97	3.75	12.50	0.996
BghiP	38.70	104.14	6.21	20.71	0.998

Los coeficientes de correlación (r) obtenidos en las curvas de calibración demostraron una linealidad instrumental superior a 0.99 para la mayoría de los compuestos (como se detalla en el Apéndice D.1). La única excepción fue el BbF, que presentó un valor de $r = 0.962$. Esta variación en la respuesta del equipo está contemplada y documentada en el Método 8270E de la US EPA (Sección 11.6.1.4) [165], de manera que puede atribuirse a la complejidad analítica para resolver completamente la señal cromatográfica del BbF frente a la de su isómero estructural, el BkF.

Por su parte, los porcentajes de recuperación en la matriz oscilaron entre 60.85% y 104.14%, confirmando una eficiencia de extracción óptima para esta matriz ambiental. Si bien en los blancos de método se observaron recuperaciones menores, particularmente en los de APM, como el BkF (6.93%), este comportamiento es posiblemente atribuible a la adsorción de dichos compuestos lipofílicos en las paredes del material de vidrio al no contar con una matriz sólida. No obstante, las altas recuperaciones obtenidas en la matriz adicionada corroboran el correcto desempeño y la aplicabilidad del método empleado.

6.2 Distribución espacial de las concentraciones de HAP

La Tabla 9 condensa los resultados de las concentraciones individuales, así como la suma total de los compuestos (Σ_{16} HAP) para cada punto de muestreo, expresados en ng/g de peso seco. De manera preliminar, la carga de HAP presenta fluctuaciones significativas, que abarcan desde sitios con valores por debajo del LD y del LC hasta puntos de acumulación extrema.

Este patrón de alta variabilidad espacial concuerda con la dinámica reportada previamente para otros contaminantes orgánicos e inorgánicos en el área de estudio [22,

166–168]. En particular, la distribución y acumulación de compuestos orgánicos persistentes en esta región fluctúa severamente e incluso ha mostrado tendencias de incremento a través del tiempo; estos picos de concentración y reubicación espacial se atribuyen a la resuspensión de sedimentos provocada por el dragado continuo del río para el tránsito de buques, así como a los eventos meteorológicos extremos (inundaciones) que remueven constantemente el lecho.

Tabla 9. Concentraciones individuales y totales de HAP (ng/g) cuantificados para cada sitio de muestreo

S	Nap	Acy	Ace	Fl	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	InP	DahA	BghiP	Σ16 HAP
1	ND	ND	ND	ND	6.70	<LC	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.70
2	ND	ND	ND	ND	6.48	<LC	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	6.48
3	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	43.41	ND	ND	ND	43.41
4	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	133.92	ND	ND	ND	133.92
5	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	120.59	ND	ND	ND	120.59
6	ND	ND	ND	<LC	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.00
7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	62.21	ND	ND	ND	62.21
8	ND	ND	ND	<LC	9.87	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	69.71	ND	ND	ND	79.58
9	ND	ND	ND	2.46	15.79	14.60	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	32.85
10	ND	ND	ND	1.66	9.72	<LC	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	51.12	ND	ND	ND	62.50
11	ND	0.25	ND	7.57	43.87	47.28	24.68	19.40	ND	ND	<LC	ND	448.16	<LC	<LC	<LC	591.22
12	ND	ND	ND	<LC	7.75	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	132.34	ND	ND	ND	140.09
13	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	198.03	ND	ND	ND	198.03
14	ND	ND	ND	<LC	10.25	<LC	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	134.25	ND	ND	ND	144.50
15	ND	ND	ND	7.36	38.80	41.44	14.28	19.10	ND	ND	57.48	ND	1283.56	<LC	17.00	<LC	1479.01
16	ND	ND	ND	2.05	13.97	<LC	6.29	<LC	ND	ND	ND	ND	169.31	ND	<LC	ND	191.62
17	ND	49.96	ND	4.93	29.60	35.24	6.29	<LC	ND	ND	<LC	ND	750.66	17.12	35.91	30.37	960.08
18	ND	1.29	<LC	5.37	7.06	ND	3.69	15.84	<LC	ND	<LC	ND	287.15	ND	<LC	<LC	320.39
19	ND	ND	ND	<LC	<LC	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	1297.06	ND	ND	<LC	1297.06
20	ND	ND	ND	<LC	ND	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	605.71	ND	ND	ND	605.71
21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	518.59	ND	ND	ND	518.59
22	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	273.26	ND	ND	ND	273.26
23	ND	2.89	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	674.73	ND	ND	ND	677.62
24	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	38.56	ND	ND	ND	38.56
25	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	178.44	ND	ND	ND	178.44
26	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	248.78	ND	ND	ND	248.78
27	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	66.30	ND	ND	ND	66.30
28	ND	7.47	0.78	<LC	ND	ND	41.19	41.65	ND	ND	190.37	ND	1864.71	ND	74.88	48.00	2269.05
29	ND	5.82	ND	ND	ND	ND	3.59	ND	ND	ND	<LC	ND	413.06	ND	<LC	ND	422.47
30	ND	ND	0.31	2.21	ND	ND	7.55	ND	ND	ND	<LC	ND	388.06	ND	ND	ND	398.12
31	ND	2.15	ND	<LC	ND	ND	61.67	49.34	ND	ND	239.46	ND	49.63	48.90	23.27	36.41	510.82
32	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.00
33	ND	3.42	ND	<LC	ND	ND	4.95	ND	ND	ND	<LC	ND	272.94	ND	ND	ND	281.31
34	<LC	1448.20	41.93	51.75	578.43	732.97	674.41	1097.75	1774.62	1042.33	4813.52	1358.11	1421.14	1299.92	443.77	1777.14	18555.98
35	ND	ND	ND	ND	ND	<LC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.00

Nota: **S** (Sitio de Muestreo), **ND** (No Detectado o por debajo del límite de detección, <LD), **<LC** (por debajo del límite de cuantificación). Para el cálculo de Σ_{16} HAP se aplicó el criterio de límite inferior (LB), véase sección 5.3.2.

A partir de los resultados obtenidos, la concentración total (Σ_{16} HAP) presenta una amplia variabilidad, con valores que oscilan desde concentraciones no detectables (ND) en los sitios 6, 32 y 35, hasta un valor máximo de 18 555.98 ng/g en el sitio 34 (Puente

Coatzacoalcos I - Pajaritos). Debido a que las concentraciones de los 16 HAP presentan una distribución no paramétrica, y dado que la magnitud de valores extremos introduce un sesgo en la media aritmética, se empleó la mediana (191.62 ng/g) como la medida de tendencia central más robusta y estadísticamente adecuada para representar el comportamiento general en el área de estudio.

En cuanto a la contribución individual de los HAP, se destaca la predominancia del BaP en la mayoría de los sitios analizados (representando el 80 %), siendo el principal contribuyente a la carga total en los sitios con los niveles de contaminación más altos, particularmente en los sitios 15 (Jagüey), 19 (tramo hacia la Boca de Uxpanapa) y 28 (Nanchital). Una excepción a este patrón corresponde al sitio 34 (Puente Coatzacoalcos I - Pajaritos), que se perfila como crítico debido a la presencia simultánea de concentraciones elevadas de compuestos tanto de APM como de BPM, con predominio de BbF y Nap.

Como se muestra en la Figura 3, en los alrededores del sitio 34 (Puente Coatzacoalcos I – Pajaritos) convergen el cauce principal y un segmento de la red hídrica que mantiene una conexión directa con el Complejo Petroquímico Pajaritos. Asimismo, en la zona circundante, operan al menos cuatro industrias pertenecientes a los sectores petroquímico, químico y de gas, además de una densa red de infraestructura que incluye poliductos, gasoductos y oleoductos. Aunado a esto, de acuerdo con el Inventario de Sitios Contaminados y Remediados 2025 de la SEMARNAT [13], en esta área se han identificado dos pasivos ambientales y una emergencia ambiental vinculada a un derrame de hidrocarburos proveniente de un oleoducto. Por consiguiente, estas características y factores sugieren que los niveles elevados de HAP en este punto podrían estar asociados a la influencia de fuentes antrópicas puntuales y a aportes históricos de contaminantes, más que exclusivamente a la dinámica fisicoquímica natural del sistema.

Por otra parte, como se observa en la Figura 6, la hidrodinámica desempeña un papel importante en la distribución espacial de los HAP. Los sitios ubicados aguas arriba del río (sitios 1-14) que comprende el tramo de Arroyo Blanco a la Boca de Coachapa (pasando por Las Ánimas y Los Pinos), presentan bajas concentraciones; sin embargo, este patrón cambia al ingresar a la zona industrial de Minatitlán (Figura 3). Inicialmente, se esperaba que los sitios 16 (Mina Capoacán) y 17 (Refinería) presentaran las concentraciones más elevadas debido a su proximidad a la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas del Río. No obstante, los niveles más altos registrados en este tramo corresponden a los sitios 15 (Jagüey) y 19 (tramo hacia la Boca de Uxpanapa), ubicados aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, de ese sitio. Este comportamiento podría indicar que las corrientes del río

no favorecen una sedimentación estática y directa de las partículas suspendidas portadoras de HAP frente a las fuentes puntuales.

Como se ha documentado previamente en la región para otros contaminantes asociados a sedimentos, la alta hidrodinámica fluvial y las condiciones de la época de lluvias promueven la resuspensión, el transporte y la dispersión diferencial a lo largo del estuario, regulando la acumulación espacial de los compuestos hacia zonas de menor energía [22, 36, 169].

Un caso de particular interés es el sitio 15 (Jagüey), cuya elevada concentración (1479.01 ng/g) responde a una combinación de factores antropogénicos, geomorfológicos e hidrodinámicos. Por un lado, en este sitio se localiza una descarga de aguas residuales, y por otro lado, converge con una zona de acumulación natural favorecida por la presencia de un meandro que disipa la energía cinética del flujo, aunado a la dinámica estuarina de la cuenca baja, donde la interacción con las mareas y la intrusión salina actúan como una barrera hidráulica que frena el transporte de sedimentos finos [169].

Esta condición se exacerba durante las pleamares y ante la incidencia de fenómenos meteorológicos como la temporada de "nortes", cuyos fuertes vientos favorecen la mezcla vertical y modifican la circulación costera, empujando las masas de agua hacia el sur y contra la línea de costa [170, 171]. La consecuente desaceleración de las corrientes favorece la sedimentación de partículas en suspensión y, con ello, la retención de HAP en este tramo [45].

De manera similar, las condiciones hidrodinámicas pueden contribuir a explicar el comportamiento observado en el sitio 19 (tramo hacia la Boca de Uxpanapa). La concentración de la Σ_{16} HAP en los sitios 17 y 18 (Refinería) puede ser transportada por la corriente principal y posteriormente depositarse cercano al sitio 19, donde la mayor amplitud del cauce favorece el asentamiento de sedimentos y, en consecuencia, la retención de los HAP asociados a ellos.

Finalmente, destaca el comportamiento del sitio 35 (estuario del río Coatzacoalcos), ubicado en la desembocadura, donde no se detectaron HAP. Sin embargo, esta ausencia no implica necesariamente la desaparición de la carga contaminante. En esta zona estuarina, la dinámica de las corrientes y la interacción constante con el oleaje marino pueden limitar la deposición de sedimentos finos ricos en MO. Por consiguiente, los HAP asociados a estas partículas [45] podrían permanecer en suspensión y ser transportados hacia el Golfo de México, quedando fuera del alcance espacial del presente estudio.

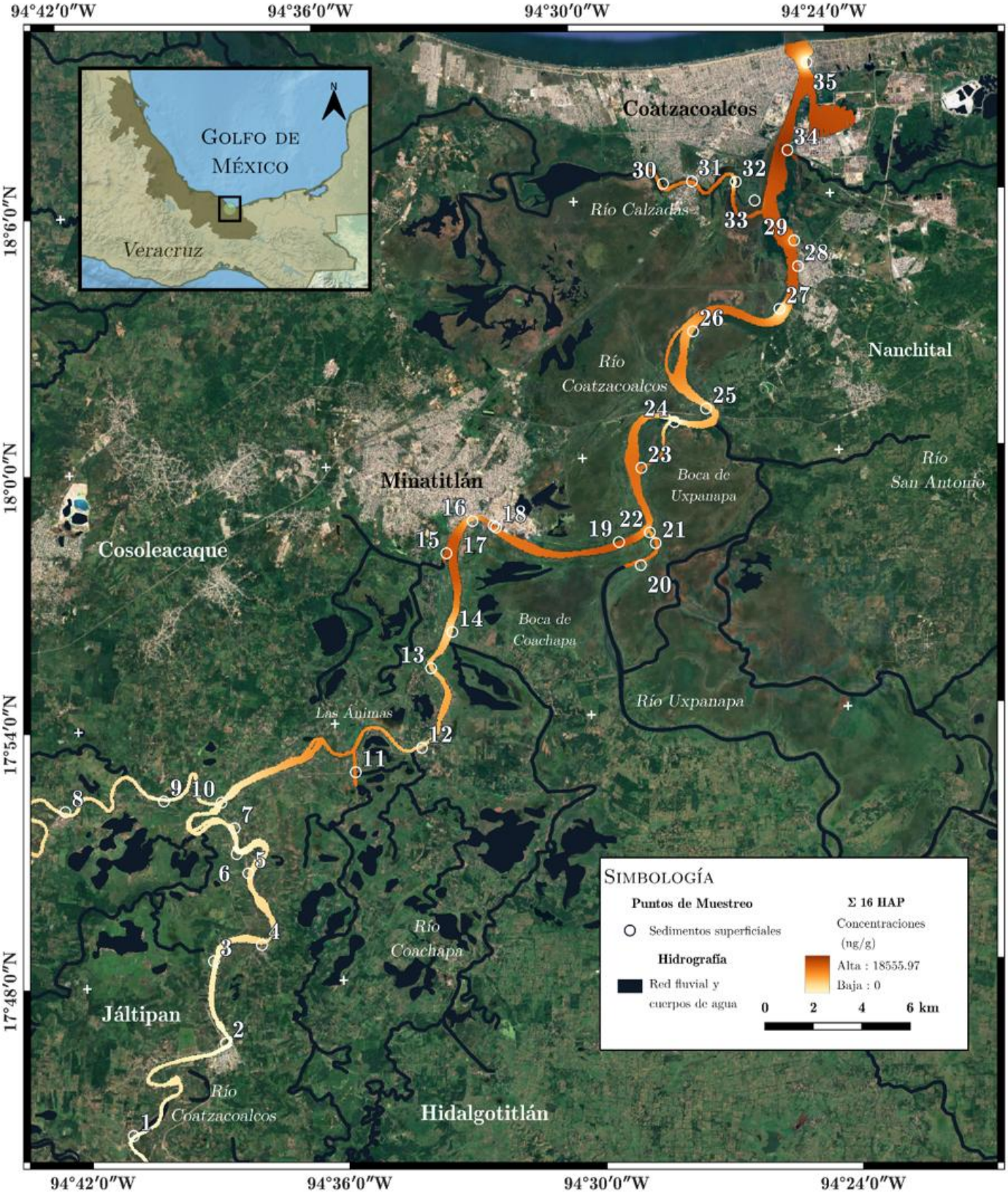


Figura 6. Distribución espacial de las concentraciones totales (Σ_{16} HAP) en los sedimentos superficiales a lo largo del cauce del río Coatzacoalcos.

6.3 Contenido de materia orgánica

La abundancia de MO a lo largo del cauce del río Coatzacoalcos se encontró en el intervalo comprendido entre 0.0% y 10.76%, con una mediana de 2.57% en las 35 muestras. En la Tabla 10 se presentan todos los resultados obtenidos para %CO y %MO.

Tabla 10. Porcentajes de carbono y materia orgánicos

Sitio de Muestreo	%CO	%MO	Sitio de Muestreo	%CO	%MO
1	1.5 ± 0.06	2.5 ± 0.11	**19**	2.3 ± 0.00	4.0 ± 0.00
2	1.8 ± 0.00	3.1 ± 0.00	**20**	2.4 ± 0.17	4.2 ± 0.29
3	2.6 ± 0.04	4.6 ± 0.07	**21**	1.6 ± 0.04	2.7 ± 0.07
4	1.5 ± 0.00	2.6 ± 0.00	**22**	1.4 ± 0.04	2.4 ± 0.07
5	2.5 ± 0.04	4.3 ± 0.07	**23**	2.9 ± 0.00	5.0 ± 0.00
6	1.1 ± 0.00	1.8 ± 0.00	**24**	0.7 ± 0.00	1.1 ± 0.00
7	1.1 ± 0.08	2.0 ± 0.14	**25**	0.8 ± 0.00	1.4 ± 0.00
8	2.2 ± 0.08	3.8 ± 0.14	**26**	0.8 ± 0.00	1.4 ± 0.00
9	1.5 ± 0.08	2.6 ± 0.14	**27**	0.7 ± 0.04	1.2 ± 0.07
10	2.8 ± 0.16	4.8 ± 0.29	**28**	1.2 ± 0.00	2.1 ± 0.00
11	6.2 ± 0.32	10.8 ± 0.56	**29**	1.0 ± 0.13	1.8 ± 0.23
12	2.2 ± 0.04	3.9 ± 0.07	**30**	4.5 ± 0.00	7.8 ± 0.00
13	0.8 ± 0.04	1.4 ± 0.07	**31**	1.2 ± 0.00	2.2 ± 0.00
14	1.1 ± 0.00	1.9 ± 0.00	**32**	1.2 ± 0.04	2.1 ± 0.04
15	3.1 ± 0.00	5.3 ± 0.00	**33**	1.7 ± 0.04	2.9 ± 0.07
16	1.0 ± 0.33	1.8 ± 0.56	**34**	2.0 ± 0.00	3.5 ± 0.00
17	1.4 ± 0.00	2.3 ± 0.00	**35**	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00
18	1.6 ± 0.03	2.7 ± 0.05			

Nota: La obtención de datos crudos para este análisis se realizó en colaboración con el Q. Acosta [172].

La distribución espacial del contenido de MO a lo largo del cauce no muestra un gradiente longitudinal definido entre aguas arriba (sitio 1, Arroyo Blanco) y la desembocadura en el Golfo de México (sitio 35, estuario del río Coatzacoalcos). En cambio, la variabilidad observada refleja la heterogeneidad ambiental del sistema, asociada a las características geológicas y edafológicas propias de la zona (Figuras A.1 y A.2).

Los valores más altos se registraron en sitios con condiciones favorables para la retención de carbono, destacando los sitios 11 (Ixhuatepec, 10.8% MO) y 30 (Estero del Pantano, 7.8% MO). El sitio 30 (Estero del Pantano) se ubica sobre un depósito palustre con suelo tipo Gleysol, el cual se caracteriza por una saturación prolongada que genera condiciones reductoras y ralentiza la degradación microbiana de los detritos vegetales [120]. Por su parte, aunque los Cambisoles del sitio 11 suelen presentar un mejor drenaje, la

presencia de un horizonte gléico evidencia periodos temporales de anoxia [120, 173]; esta condición, sumada a su capacidad física para retener sedimentos, los convierte en una trampa eficiente para la acumulación de MO.

En lo que respecta a los puntos distribuidos sobre depósitos aluviales, la hidrodinámica del río condiciona el contenido de MO, favoreciendo su retención en zonas de baja energía donde se acumulan limos y arcillas, debido a su alta superficie específica [174]. Contrariamente, en la zona de transición marina del sitio 35 (estuario del río Coatzacoalcos) se registró un contenido nulo (0.0% MO), lo cual es consistente con la naturaleza arenosa de los depósitos litorales, cuyo oleaje y transporte continuo impiden el asentamiento de partículas finas [175].

En la Figura 7 se observa que el coeficiente de correlación de Spearman ($r = 0.3402$, $p < 0.05$) confirma una correlación positiva entre la MO y los HAP en las muestras. Sin embargo, al analizar la dispersión de los datos, se identifican algunos sitios que no se ajustan a esta tendencia. Tal es el caso del sitio 34 (Puente Coatzacoalcos I – Pajaritos), que presenta la concentración máxima total (Σ_{16} HAP = 18 555.98 ng/g) a pesar de tener un contenido de MO promedio (3.49%).

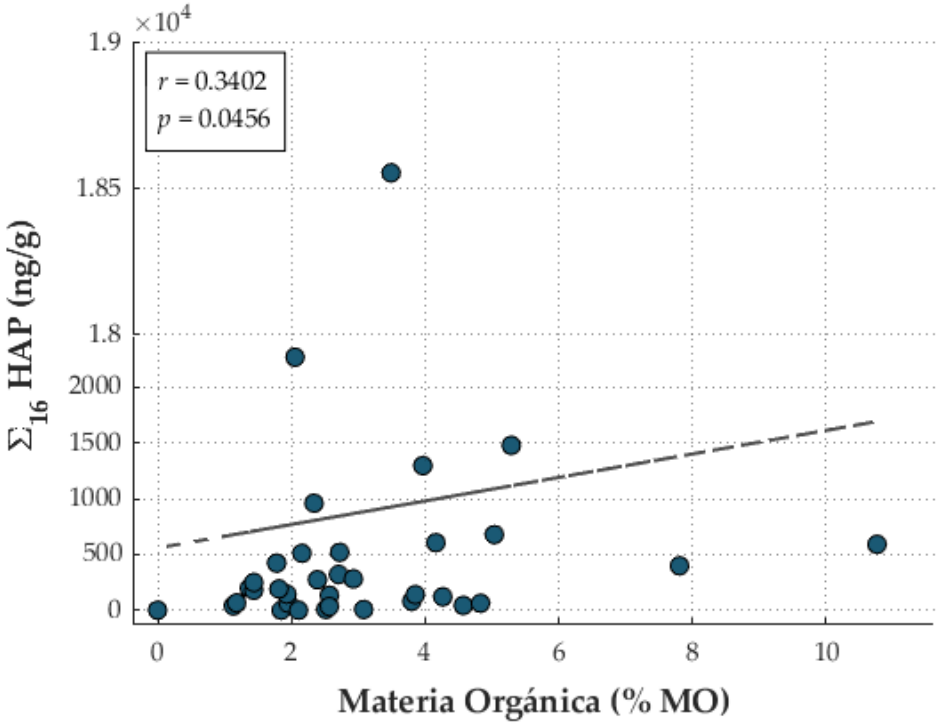


Figura 7. Gráfico de dispersión y correlación de Spearman entre el contenido de MO y la concentración total de HAP (Σ_{16} HAP)

Finalmente, las fluctuaciones observadas a lo largo del cauce pueden estar relacionadas con la diversidad de fuentes de aporte, entre ellas las descargas de aguas residuales urbanas e industriales, los escurrimientos agrícolas y los aportes naturales de la vegetación ribereña y de los ecosistemas de manglar.

6.4 Composición y origen

El análisis de las relaciones de diagnóstico, presentado en la Tabla 11, junto con la distribución espacial de la proporción de HAP de APM y BPM en la Figura 8, permite aproximarse al posible origen y a las fuentes de emisión de estos compuestos, lo que evidencia una clara sectorización.

Tabla 11. Relaciones de diagnóstico para la identificación del origen y fuentes de emisión de HAP en el área de estudio

S	ΣBPM/ΣAPM	ΣCOMB/Σ_{16} HAP	BaP/(BaP+ghi)	Ant/(Ant+Phe)
1	Petrogénico	Petrogénico	NC	Petrogénico
2	Petrogénico	Petrogénico	NC	Petrogénico
3	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
4	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
5	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
6	Petrogénico	NC	NC	NC
7	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
8	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
9	Petrogénico	Petrogénico	NC	Pirogénico
10	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
11	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Pirogénico
12	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
13	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
14	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
15	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Pirogénico
16	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
17	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Pirogénico
18	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	Petrogénico
19	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
20	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
21	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
22	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
23	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
24	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
25	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
26	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
27	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC

S	ΣBPM/ΣAPM	ΣCOMB/Σ_{16} HAP	BaP/(BaP+ghi)	Ant/(Ant+Phe)
28	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
29	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
30	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
31	Pirogénico	Pirogénico	No Tráfico	NC
32	Petrogénico	NC	NC	NC
33	Pirogénico	Pirogénico	Emisiones de Tráfico	NC
34	Pirogénico	Pirogénico	No Tráfico	Pirogénico
35	Petrogénico	NC	NC	NC

Nota: **S** (Sitio de Muestreo), **ΣBPM** = Suma de HAP de bajo peso molecular; **ΣAPM** = Suma de HAP de alto peso molecular; **ΣCOMB** = Suma de HAP originados por combustión (Fla + Pyr + BaA + BbF + BkF + BaP + InP + BghiP). **NC** indica No Calculable, debido a que las concentraciones de uno o ambos compuestos implicados eran igual a cero. Para los cálculos se aplicó el criterio de límite inferior (LB), véase sección 5.3.2. Los valores de referencia utilizados se encuentran en la Tabla A.2. de los anexos.

En general, el área de estudio presenta una preponderancia de HAP de APM, lo que confiere una huella pirogénica [57]. De acuerdo con el índice BaP/(BaP+BghiP), la mayor parte de los sitios de muestreo están asociados a procesos de combustión derivados del tráfico vehicular y de la actividad industrial [159]. La quema de energéticos y los procesos de combustión industrial generan una mezcla compleja de HAP pirogénicos de mayor peso molecular; por otro lado, las emisiones vehiculares por la combustión incompleta en motores también aportan una huella pirogénica caracterizada por compuestos de rango intermedio y alto [160], diferenciándose claramente de los aportes petrogénicos directos, los cuales se concentran en las fracciones de BPM [176].

En contraste con la zona industrial y portuaria, los puntos de muestreo ubicados aguas arriba (1: Arroyo Blanco, 2: cabecera de Hidalgotitlán y 9: Lajilla) presentan un comportamiento distinto. En estos sitios, la mezcla está dominada casi por completo por HAP de BPM, lo que revela orígenes petrogénicos. Además, al presentar las concentraciones totales más bajas del estudio, su perfil sugiere aportes puntuales y de menor magnitud de hidrocarburos no quemados, posiblemente asociados a escurrimientos o descargas de embarcaciones menores. En particular, la proximidad del sitio 2 (cabecera de Hidalgotitlán) a una estación de servicio constituye un posible origen de escurrimientos de combustibles expuestos al intemperismo, hipótesis consistente con la detección exclusiva de Phe [36, 160, 177].

No obstante, la identificación de fuentes en las zonas sometidas a mayor presión industrial resulta compleja, debido a la posible superposición de aportes. Por ejemplo,

aunque el tramo correspondiente a los puntos 16 al 18 presenta un origen pirogénico, índices diagnósticos específicos, como la relación Ant/(Ant+Phe), evidencian la coexistencia de fuentes petrogénicas, particularmente en el punto 18. Lo cual es consistente con la influencia de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas del Río, donde pueden converger el depósito asociado a procesos de combustión y los aportes de crudo derivados de operaciones industriales.

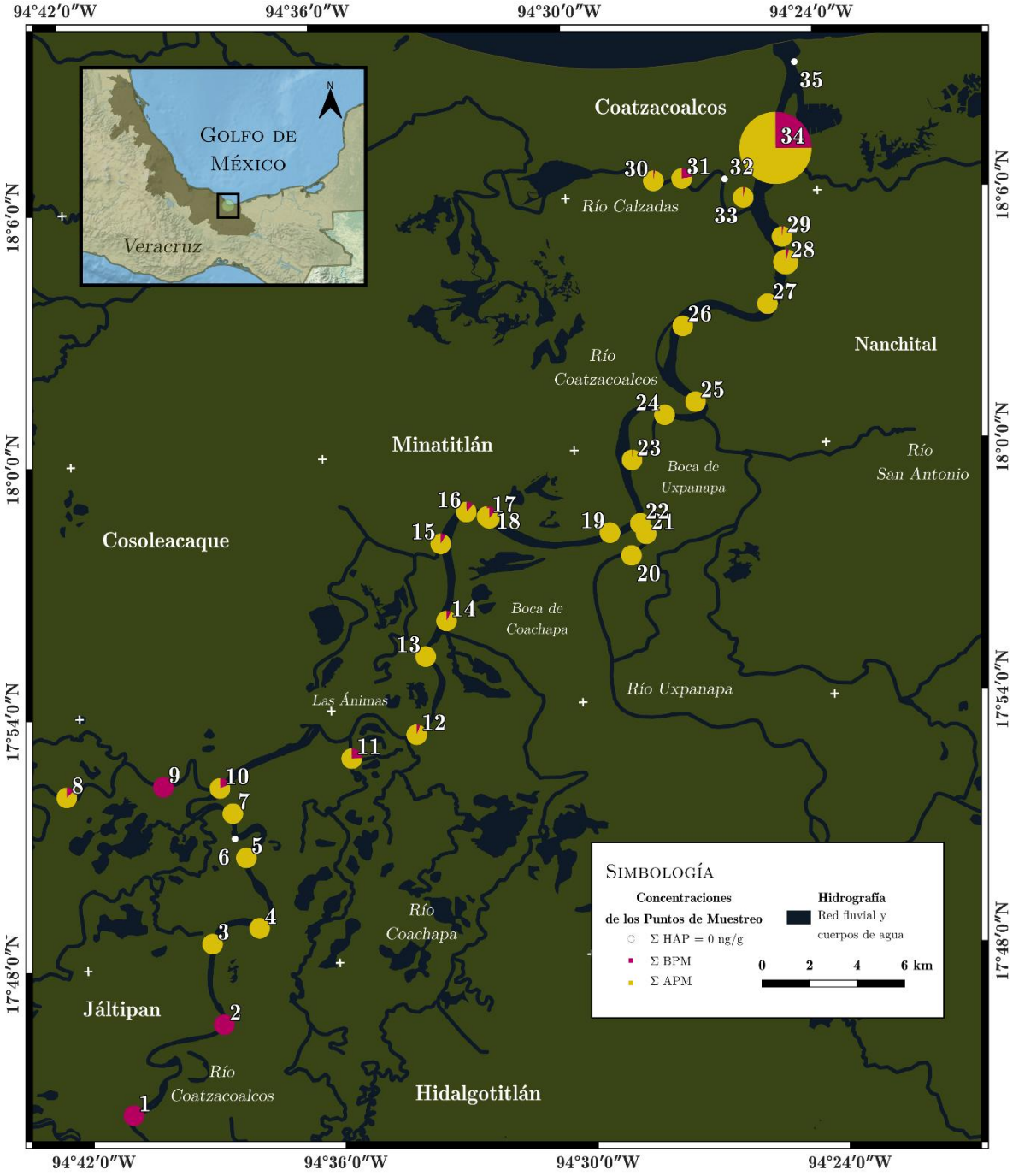


Figura 8. Variación espacial de la concentración y composición por peso molecular (ΣBPM y ΣAPM) de los HAP a lo largo del cauce del río Coatzacoalcos.

Es importante señalar que el derrame identificado en la cartografía histórica de 2012 (sección 6.2) constituye únicamente un antecedente dentro de un contexto de contaminación crónica. Como antecedente de contingencias masivas en la cuenca baja, se encuentra el derrame del ducto en Nanchital ocurrido el 22 de diciembre de 2004 [3], el cual aportó considerables volúmenes de petróleo crudo directamente al lecho del río Coatzacoalcos.

En este sentido, la elevada concentración de HAP determinada en el tramo estuarino inferior (en particular en el sitio 19, hacia la confluencia con el río Uxpanapa) podría obedecer tanto a pasivos ambientales históricos como a las descargas continuas provenientes de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas del Río y áreas de maniobra. En este sector, la curvatura del meandro disminuye la energía del caudal, propiciando la sedimentación y permanencia de los contaminantes previo a su transporte estuarino hacia el Golfo de México.

Finalmente, el sitio 34 (Puente Coatzacoalcos I - Pajaritos) representa uno de los casos de mayor presión antropogénica del área de estudio. Aunque los índices diagnósticos indican un predominio pirogénico, las elevadas concentraciones de HAP de BPM evidencian también un origen petrogénico importante, dando lugar a un perfil mixto. Este comportamiento es consistente con la intensa actividad de la Terminal Logística Pajaritos y del puerto de Coatzacoalcos (sección 3.2.3.).

A este tráfico marítimo, terrestre y a las maniobras de transferencia, se suma la recurrencia de fugas y contingencias operativas documentadas continuamente en reportes ambientales y de prensa regional a lo largo del río entre Minatitlán y Coatzacoalcos. Entre los eventos suscitados, se encuentran la explosión e incendio registrados en el complejo petroquímico Pajaritos en abril de 2016 [178] y 2021 [179, 180], los cuales aportaron partículas y compuestos derivados de la combustión no controlada, complementados por derrames de hidrocarburos reportados de forma recurrente en el cauce entre 2023 y 2025 [181–188], evidenciando impactos sobre la fauna acuática y la pesca ribereña [189–191], e intervenciones de dependencias como la ASEA y CONAGUA [181, 192]. La confluencia de estas descargas crónicas con los pasivos ambientales inventariados por la SEMARNAT ratifica al sector de Pajaritos como un núcleo prioritario de persistencia de HAP en los sedimentos [13].

Análisis paralelos realizados en las mismas muestras evidenciaron que la acumulación de EPT se rige por la granulometría, el porcentaje de carbonatos y de materia orgánica, los cuales favorecen la retención geoquímica de estos elementos. Sin embargo, aunque en varios

sitios de muestreo se obtuvieron concentraciones de EPT superiores a los valores de fondo (Cr, Cu, Pb y Zn), se concluyó que los enriquecimientos estaban asociados predominantemente a fuentes naturales y litogénicas [22], mientras que los resultados de HAP de este trabajo exhiben una clara y dominante huella antropogénica vinculada a la petroquímica y a los procesos de combustión de la zona.

6.5 Evaluación de riesgo ecotoxicológico

Como se indicó en la sección 5.3.4., la evaluación de riesgo permite interpretar las concentraciones de Σ_{16} HAP en función de la probabilidad real de inducir efectos biológicos adversos en el ecosistema. A continuación, se presentan las frecuencias de excedencia de las SQGs, así como el resto de los resultados obtenidos para cada punto de muestreo en la cuenca baja del río Coatzacoalcos.

Tabla 12. Frecuencia de excedencia de los lineamientos de Guías de Calidad de Sedimentos (TEL-PEL y ERL-ERM) para cada HAP en los sitios de muestreo del área de estudio

HAP	Efectos Ocasionales		Efectos Frecuentes	
	(TEL - PEL)	(ERL - ERM)	(> PEL)	(> ERM)
Nap	0 sitios	0 sitios	0 sitios	0 sitios
Acy	2 sitios (5.7%)	0 sitios	0 sitios	1 sitio (2.9%)
Ace	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitios	0 sitios
Fl	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitios	0 sitios
Phe	0 sitios	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitio
Ant	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitios
Fla	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitios	0 sitios
Pyr	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitio	0 sitios
BaA	0 sitios	0 sitios	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)
Chr	0 sitios	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	0 sitios
BaP	18 sitios (51.4%)	8 sitios (22.9%)	4 sitios (11.4%)	1 sitios (2.9%)
DahA	9 sitios (25.7%)	1 sitio (2.9%)	1 sitio (2.9%)	1 sitios (2.9%)

El análisis de las frecuencias de excedencia revela que el BaP es el principal detonante del riesgo en el área. Este compuesto de APM superó el umbral de efectos ocasionales (TEL) en poco más de la mitad de los sitios de muestreo (51.4%) y rebasó los niveles de efectos biológicos frecuentes (>PEL y >ERM) en las zonas más impactadas.

Para comprender la distribución geográfica de esta condición, los resultados se integraron espacialmente mediante el índice M-ERM-Q (Figura 9). La evolución espacial de este índice, junto con la del M-MPC-Q, confirma que, mientras la cuenca alta del área de estudio permanece sin riesgo significativo, el corredor industrial y estuarino se encuentra bajo un claro estrés ambiental.

Destaca la presencia de un nivel de riesgo catalogado como Moderado en sitios clave (11: Ixhuatepec, 15: Jagüey, 17: Refinería, 19: tramo hacia la Boca de Uxpanapa, 23: Yeguero y 28: Nanchital) y como Muy Alto en el sitio 34 (Puente Coatzacoalcos I – Pajaritos), lo que coincide con la clasificación de Potencial Riesgo Carcinogénico (BaPTEQ). Los resultados de estos cocientes se visualizan en la Tabla 13.

Considerando que los sedimentos constituyen el hábitat y una fuente de alimentación para la fauna bentónica, incluidos crustáceos, bivalvos y otros invertebrados [9, 45]; la presencia de niveles elevados de toxicidad no constituye un problema estático [25].

A diferencia de los peces, los invertebrados bentónicos presentan una menor capacidad metabólica de excreción, lo que favorece una mayor bioacumulación de estos compuestos en sus tejidos [9, 51]. La exposición crónica a estos contaminantes y a sus metabolitos, puede desencadenar diversos mecanismos de toxicidad, entre ellos la perturbación endocrina, estrés oxidativo, genotoxicidad y alteraciones en el desarrollo embrionario [25]. En consecuencia, la inacción ante estos puntos críticos de contaminación puede facilitar la bioacumulación y la biomagnificación de los HAP a través de la red trófica [25].

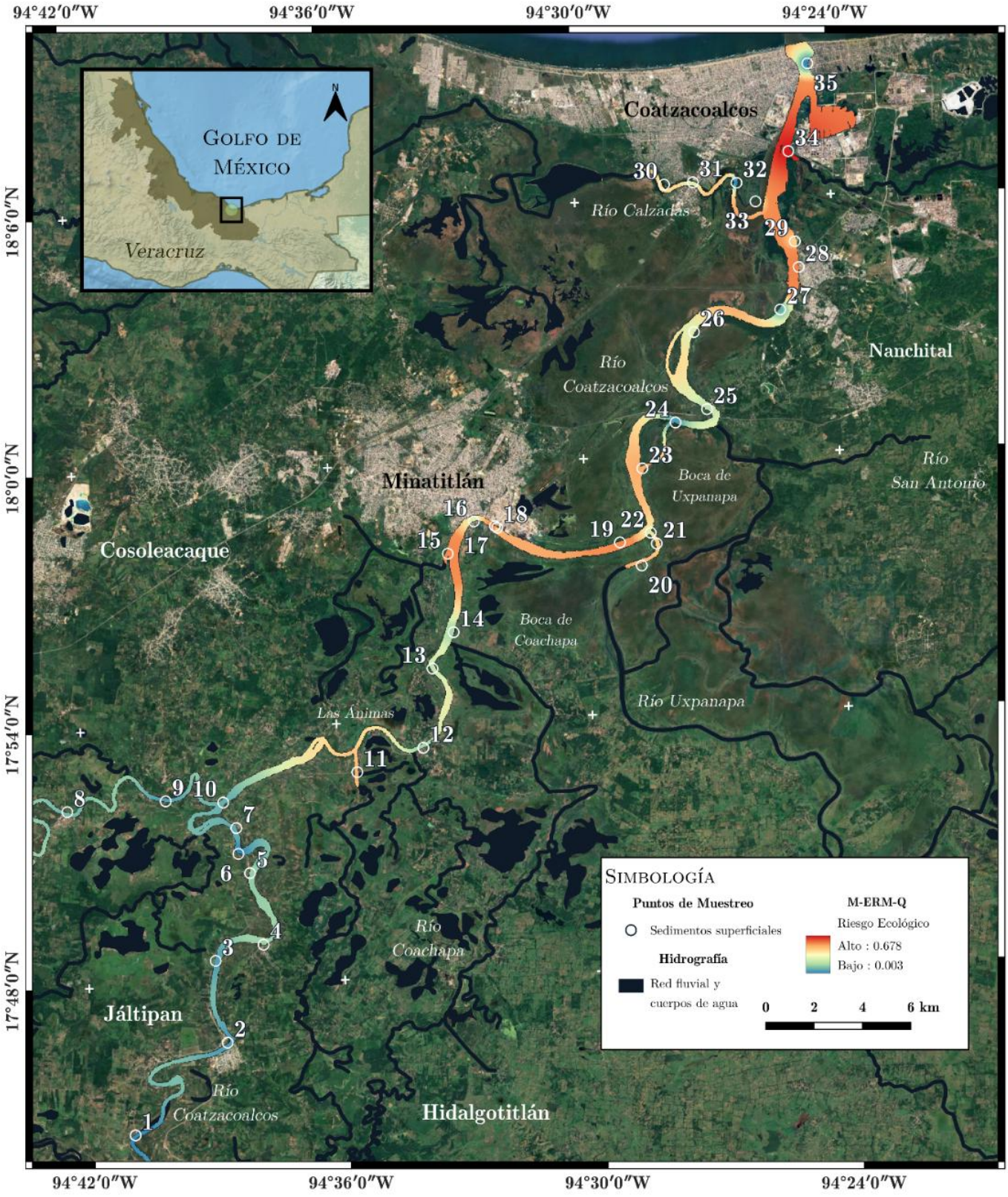


Figura 9. Distribución espacial del potencial de riesgo ecológico (M-ERM-Q) a lo largo del cauce del río Coatzacoalcos

Tabla 13. Cocientes de riesgo ecológico (M-ERM-Q y M-MPC-Q) y equivalencia tóxica (BaPTEQ)

Sitio de Muestreo	M-ERM-Q	Potencial Ecotoxicológico	M-MPC-Q	Nivel de Riesgo Ecológico	BaPTEQ (ng/g)	Clasificación
1	0.003	Baja	0.018	Baja	16.074	Sin Riesgo Significativo
2	0.004	Baja	0.020	Baja	37.941	Sin Riesgo Significativo
3	0.005	Baja	0.020	Baja	56.286	Sin Riesgo Significativo
4	0.010	Baja	0.031	Baja	146.792	Sin Riesgo Significativo
5	0.009	Baja	0.030	Baja	133.468	Sin Riesgo Significativo
6	0.003	Baja	0.015	Baja	16.042	Sin Riesgo Significativo
7	0.006	Baja	0.022	Baja	75.083	Sin Riesgo Significativo
8	0.007	Baja	0.024	Baja	82.589	Sin Riesgo Significativo
9	0.005	Baja	0.033	Baja	16.191	Sin Riesgo Significativo
10	0.006	Baja	0.025	Baja	64.029	Sin Riesgo Significativo
11	0.035	Baja	0.147	Moderada	485.699	Sin Riesgo Significativo
12	0.010	Baja	0.032	Baja	145.221	Sin Riesgo Significativo
13	0.013	Baja	0.039	Baja	210.903	Sin Riesgo Significativo
14	0.010	Baja	0.035	Baja	147.160	Sin Riesgo Significativo
15	0.081	Baja	0.251	Moderada	1377.828	Potencial Riesgo Carcinogénico
16	0.014	Baja	0.042	Baja	204.099	Sin Riesgo Significativo
17	0.064	Baja	0.224	Moderada	937.882	Potencial Riesgo Carcinogénico
18	0.023	Baja	0.073	Baja	328.283	Sin Riesgo Significativo
19	0.070	Baja	0.189	Moderada	1310.007	Potencial Riesgo Carcinogénico
20	0.034	Baja	0.091	Baja	618.583	Potencial Riesgo Carcinogénico
21	0.029	Baja	0.080	Baja	531.463	Sin Riesgo Significativo
22	0.017	Baja	0.049	Baja	286.139	Sin Riesgo Significativo
23	0.038	Baja	0.101	Moderada	687.605	Potencial Riesgo Carcinogénico
24	0.004	Baja	0.019	Baja	51.428	Sin Riesgo Significativo
25	0.012	Baja	0.037	Baja	191.316	Sin Riesgo Significativo
26	0.015	Baja	0.046	Baja	261.650	Sin Riesgo Significativo
27	0.006	Baja	0.023	Baja	79.169	Sin Riesgo Significativo
28	0.126	Moderada	0.354	Moderada	2261.368	Potencial Riesgo Carcinogénico
29	0.026	Baja	0.072	Baja	449.690	Sin Riesgo Significativo
30	0.023	Baja	0.065	Baja	402.817	Sin Riesgo Significativo
31	0.015	Baja	0.100	Baja	197.841	Sin Riesgo Significativo
32	0.003	Baja	0.014	Baja	16.039	Sin Riesgo Significativo
33	0.017	Baja	0.052	Baja	287.701	Sin Riesgo Significativo
34	0.678	Alta	5.223	Muy alta	4604.059	Potencial Riesgo Carcinogénico
35	0.003	Baja	0.018	Baja	16.067	Sin Riesgo Significativo

6.6 Análisis socioambiental

Tras establecer el nivel de riesgo ecotoxicológico, resulta imperativo analizar sus implicaciones para la población expuesta. Para abordar esta dimensión acorde a la información disponible del área de estudio, el análisis se enfocó en integrar la exposición física potencial, la vulnerabilidad demográfica de las comunidades ribereñas y el panorama epidemiológico.

Se identificó que en la totalidad de los municipios considerados en el área de estudio los tumores de los sistemas digestivo, hepático y oral constituyen la principal causa de defunción (35.2 - 52.9%). Este patrón alcanza su punto crítico en Hidalgotitlán (52.94%) (Figura 10), coincidiendo con el municipio que presenta la mayor vulnerabilidad demográfica de la región, con un 40.7% de su población en rangos de edad biológicamente susceptibles (Tabla 2).

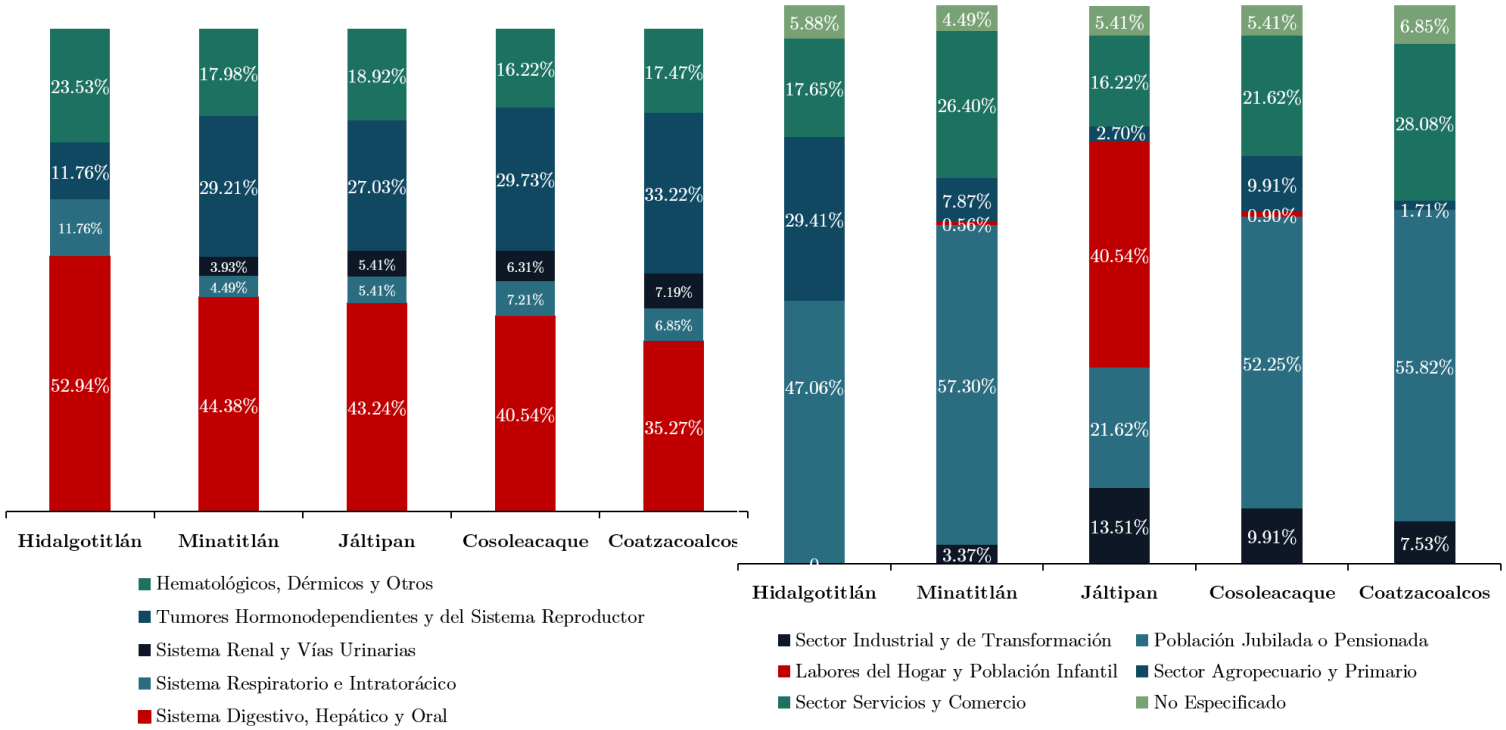


Figura 10. Distribución proporcional de la mortalidad oncológica según sitio anatómico primario y municipio de Residencia, y según el perfil Ocupacional en el área de estudio para 2024

Por otra parte, en los municipios de Coatzacoalcos y Minatitlán, la mortalidad se concentra en los grupos de mayor edad, ya que, entre el 55.82% y el 57.30% de las defunciones corresponden a población jubilada o pensionada. Dada la larga latencia de las

neoplasias, estos porcentajes sugieren una exposición crónica que se manifiesta décadas después del contacto inicial; si bien no establecen un origen estrictamente ocupacional, evidencian la necesidad de considerar los efectos acumulativos de vivir y laborar en un entorno altamente industrializado.

Esta situación es particularmente alarmante en Minatitlán, donde la tasa de mortalidad oncológica en hombres (estandarizada por cada 100 mil habitantes) alcanza un valor de 128.2, superando significativamente la media estatal (81.6) y la nacional (72.1) (Figura 11). Además, los tumores del sistema respiratorio representan la segunda causa de muerte oncológica en Coatzacoalcos (33.2%) y en Minatitlán (29.2%). Este comportamiento es congruente con la huella pirogénica identificada en los sedimentos, lo que sugiere que la exposición crónica a emisiones atmosféricas actúa como un agravante de la salud respiratoria, aunque esta correspondencia deba interpretarse como una asociación contextual y no como causalidad directa.

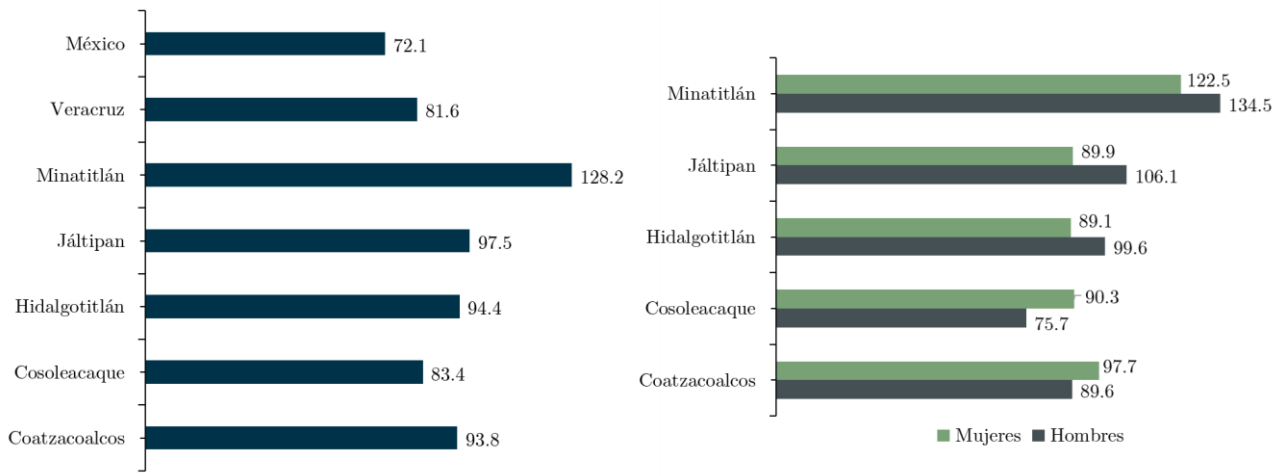


Figura 11. Panorama de mortalidad oncológica en el área de estudio en comparación con la media Estatal y Nacional, y según Sexo y Municipio de Residencia para 2024

En términos de seguridad alimentaria, estudios recientes sobre ecosistemas costeros del Golfo de México estiman que las familias que dependen de la pesca artesanal pueden consumir hasta 57.6 kg de recursos pesqueros al año, casi cinco veces el promedio nacional de 12 kg per cápita [193]. En ese sentido, la contaminación por HAP representa una posible vía de exposición humana a través de la ingesta de mariscos contaminados.

Además, al analizar la superposición entre los asentamientos que carecen de servicios básicos o de viviendas consolidadas, las llanuras de inundación y la red fluvial (Figura 12),

se evidencia un escenario de alto riesgo socioambiental. Ante el desbordamiento de los cuerpos de agua provocado por eventos hidrometeorológicos, estas comunidades marginadas quedan directamente expuestas a la dispersión y contacto con sedimentos contaminados por HAP. La carencia de infraestructura y servicios disminuye drásticamente la capacidad de resiliencia de la población, haciéndola altamente vulnerable frente a las amenazas tóxicas y ecológicas de su entorno.

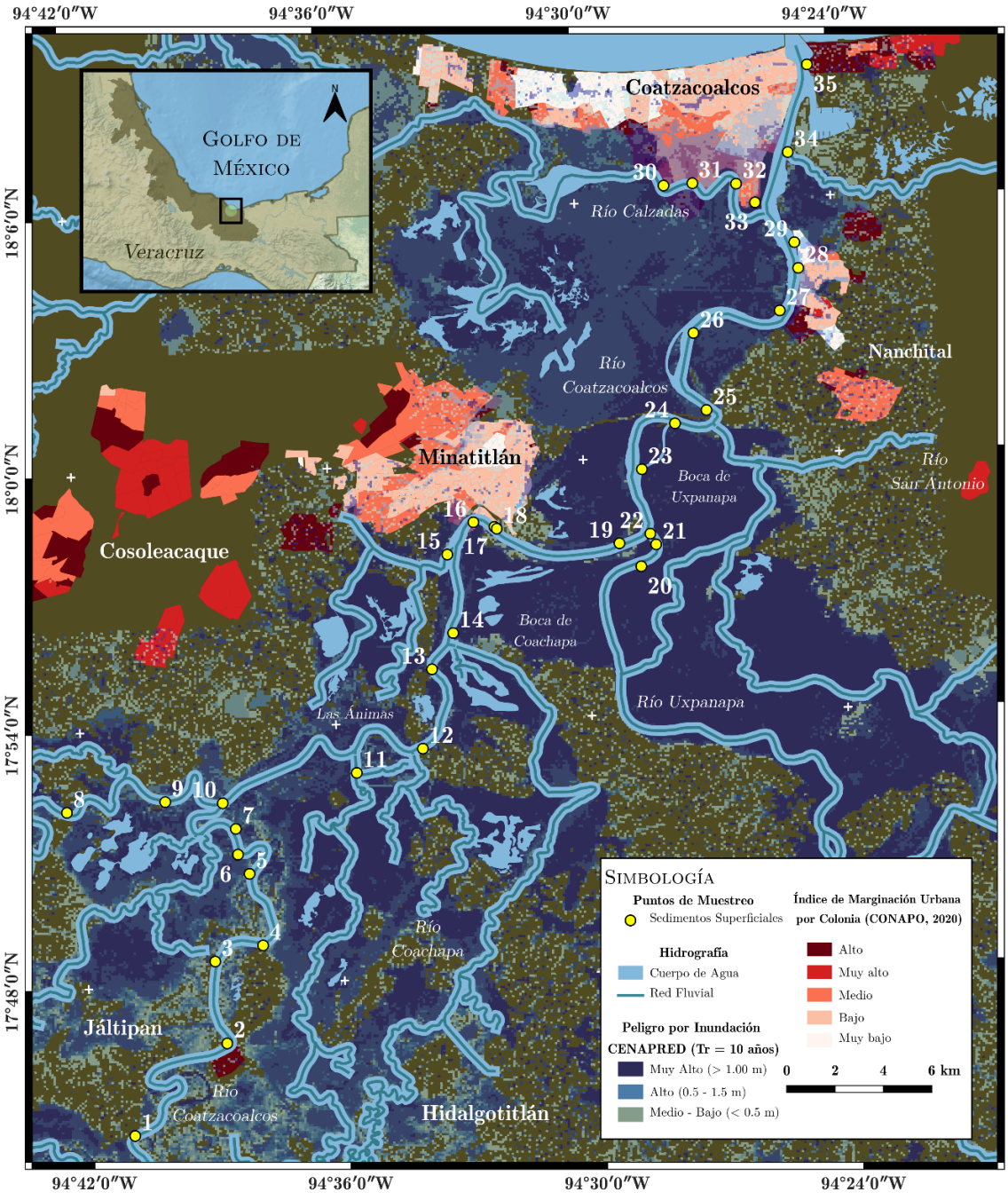


Figura 12. Riesgo socioambiental en el área de estudio

Nota: El peligro por inundación corresponde a la modelación del CENAPRED **[117]** para un periodo de retorno (T_r) de 10 años, clasificado según el tirante máximo o la profundidad de la columna de agua que se alcanzaría sobre el terreno: Muy Alto (> 1.00 m), Alto (0.5 a 1.00 m) y Medio-Bajo (< 0.5 m). El Índice de Marginación Urbana (IMU) por colonia de CONAPO [124] representa el grado de carencias socioeconómicas de la población expuesta y se clasifica en cinco estratos, desde Muy Bajo hasta Muy Alto.

Capítulo 7. Conclusiones

I. Los resultados demuestran que el ecosistema béntico-costero de la cuenca baja del río Coatzacoalcos presenta distintos niveles de vulnerabilidad socioambiental ante la presencia de HAP, lo que permite aceptar parcialmente la hipótesis inicial. Si bien el riesgo ecológico fue predominantemente de bajo a moderado, se identificaron puntos críticos con niveles de riesgo Alto y Muy Alto, particularmente en el sitio de muestreo más cercano al complejo petroquímico de Pajaritos, donde se obtuvieron índices M-ERM-Q de 0.678 y M-MPC-Q de 5.223, respectivamente. De igual manera, el cálculo del BaPTEQ evidenció un potencial riesgo carcinogénico en siete sitios de muestreo (15: Jagüey, 17: Refinería, 19: tramo hacia la Boca de Uxpanapa, 20: Río Uxpanapa, 23: Yeguero, 28: Nanchital y 34: Puente Coatzacoalcos I - Pajaritos). La identificación de estos sitios de mayor riesgo resalta la necesidad de priorizar su evaluación y vigilancia en el marco del esquema de RESA.

II. El análisis espacial corrobora la distribución heterogénea de los HAP a lo largo del cauce y su vinculación con zonas sometidas a una mayor presión industrial y urbana; puesto que las concentraciones totales no se distribuyeron uniformemente, sino que se observaron incrementos particularmente elevados en sectores próximos a fuentes potenciales de contaminación. El sitio de muestreo 34, adyacente al Complejo Petroquímico Pajaritos, presentó la concentración máxima de Σ_{16} HAP, con 18 555.98 ng/g, constituyéndose como el sitio de mayor relevancia del área evaluada.

III. En contraste con la hipótesis planteada, el análisis de las relaciones isoméricas de diagnóstico evidenció una predominancia de HAP de origen pirogénico en la mayoría de los sitios de muestreo. En consecuencia, la presencia de HAP en los sedimentos no puede atribuirse exclusivamente a aportes petrogénicos, como los derrames de crudo registrados hasta junio de 2025, sino que responde a una mezcla de fuentes de contaminación que deben considerarse en las futuras estrategias de gestión ambiental.

IV. Se identificó una correlación positiva y estadísticamente significativa entre el %MO de los sedimentos y la concentración de Σ_{16} HAP ($r = 0.3402$; $p = 0.0456$), aunque de magnitud baja a moderada. Este resultado sugiere que la MO puede favorecer la acumulación o retención de HAP en los sedimentos, pero su asociación limitada indica que otros factores fisicoquímicos, ambientales y de emisión también intervienen en su distribución y acumulación.

Capítulo 8. Recomendaciones

8.1. Determinación de HAP

A pesar de haber obtenido un porcentaje de recuperación entre 60.85% y 104.14% para el método de extracción y preparación de HAP en la matriz, se sugiere implementar medidas adicionales para evitar la contaminación por trazas en los blancos y, con ello, prevenir pérdidas o sobreestimaciones durante la cuantificación. Asimismo, es recomendable incorporar una etapa formal de purificación [194].

Durante el desarrollo experimental de esta investigación, se evaluó preliminarmente el uso de columnas cromatográficas empaquetadas con C18 en esta etapa; sin embargo, la secuencia de eluciones no arrojó resultados favorables, por lo que se obtuvieron mejores porcentajes de recuperación al omitirla. No obstante, la extracción en fase sólida (SPE) continúa siendo una alternativa útil para aislar los analitos de interés y proteger el equipo de análisis de alta resolución, como el GC-MS/MS de triple cuadrupolo [165, 195].

8.2. Control, tratamiento y remediación

Los resultados de este estudio señalan un comportamiento de contaminación heterogénea; por lo tanto, se recomienda establecer esquemas de monitoreo y un plan estratégico de remediación focalizado en las zonas con mayores niveles de riesgo ecológico y potencial carcinogénico, en lugar de plantear acciones uniformes para toda la cuenca [196, 197]. Los casos prioritarios son el sitio 34 (adyacente al complejo petroquímico Pajaritos) y del 15 al 19 (tramo comprendido entre Minatitlán y la boca del río Uxpanapa); aunque en esta sección no se detectaron las concentraciones máximas de HAP, su proximidad a la refinería Gral. Lázaro Cárdenas del Río, el constante tráfico de embarcaciones menores y su cercanía a poblaciones ribereñas como Capoacán, la convierten en una zona de alta vulnerabilidad socioambiental, especialmente por la extracción y el consumo local de recursos pesqueros.

Igualmente, la predominancia de las fuentes pirogénicas identificada mediante las relaciones de diagnóstico indica que los esfuerzos de gestión no deben concentrarse exclusivamente en la prevención y atención de derrames de hidrocarburos; por lo que resulta necesario fortalecer el control de emisiones a la atmósfera en fuentes asociadas a procesos de combustión [198].

En materia de remediación, se recomienda que cualquier intervención se plantee de manera sustentada en la caracterización particular de cada sitio. Debido a la persistencia y baja biodisponibilidad de algunos HAP, resulta pertinente evaluar, mediante estudios específicos de tratabilidad, alternativas fisicoquímicas y biológicas antes de seleccionar una tecnología de remediación [199–201]. Además, en aquellos sitios donde se determine la necesidad de intervención, la remoción o reducción de contaminantes deberá complementarse con medidas orientadas a la recuperación de las funciones ecológicas del sedimento y del suelo [202].

Respecto al control en las descargas, antes de proyectar el diseño y construcción de nuevas PTAR, lo cual implicaría extensos procesos de Evaluación de Impacto Ambiental; se recomienda priorizar el mantenimiento de la infraestructura ya existente y evaluar la eficiencia de los trenes de tratamiento con base en las características específicas de cada efluente industrial [203, 204]. La identificación de contaminantes traza y la implementación de estrategias de minimización en la fuente permitirían reducir la carga contaminante antes de mezclarse con descargas municipales o de llegar a cuerpos receptores [205]. Cuando las características del efluente lo justifiquen, podrán evaluarse tecnologías específicas, incluidos los procesos de oxidación avanzada, mediante estudios de eficiencia, viabilidad técnica y económica [206].

8.3. Futuras líneas de investigación

Se sugiere establecer un programa de monitoreo espaciotemporal que permita determinar la evolución de las concentraciones de HAP y del riesgo asociado. La integración de estos registros en un Sistema de Información Geográfica permitiría identificar tendencias, reconocer cambios y evaluar, en estudios posteriores, la efectividad de las medidas de control o de remediación.

También se recomienda ampliar la caracterización ambiental hacia otras matrices, particularmente agua superficial, aire y organismos asociados al ecosistema bentónico. El análisis de bioacumulación en organismos de importancia ecológica o de consumo permitiría

complementar la evaluación realizada en sedimentos y estimar con mayor precisión las posibles rutas de exposición.

En esa misma línea, se propone ampliar el espectro analítico y de evaluación de otros contaminantes de interés ambiental, como elementos potencialmente tóxicos, plaguicidas, bifenilos policlorados, productos de cuidado personal, bisfenoles y ftalatos para determinar su coocurrencia y explorar sus interacciones toxicológicas conjuntas [207].

Por otra parte, las características hidrogeológicas de la región hacen pertinente estudiar y modelar la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas. La incorporación de información actualizada sobre cargas hidráulicas, niveles piezométricos y propiedades hidrogeoquímicas permitiría evaluar posibles procesos de intercambio entre ambos sistemas y contribuiría a comprender con mayor precisión el transporte de contaminantes.

Adicionalmente, los esfuerzos de resiliencia climática en esta región costera no pueden desvincularse de la carga de contaminantes actuales [208, 209]. La presión ambiental podría aumentar con megaproyectos como el CIIT, por lo que es recomendable transitar hacia esquemas de movilidad sostenible, minimizar el tráfico vehicular pesado y erradicar prácticas como la quema a cielo abierto de RSU.

8.4. Regulación y gestión ambiental

Resulta pertinente fortalecer las capacidades técnicas, operativas y presupuestarias de las instituciones responsables de la inspección, vigilancia y protección ambiental, de manera que puedan sostener esquemas de acciones preventivas y de seguimiento continuo. Esta necesidad adquiere relevancia actual en un contexto presupuestario en el que se han señalado asimetrías entre los recursos destinados a infraestructura y aquellos orientados directamente a la gestión ambiental y climática [210, 211], así como la necesidad de establecer metas más claras e indicadores que permitan verificar el cumplimiento de las mismas.

Asimismo, se recomienda fortalecer los mecanismos de generación, actualización y transparencia de la información ambiental. Instrumentos como la Cédula de Operación Anual y el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes podrían beneficiarse de procesos de modernización e interoperabilidad que permitan contar con información más oportuna, consistente y útil para todo público, así como para la toma de decisiones [212, 213].

A nivel local, los instrumentos de planeación municipal y los protocolos de atención a emergencias ambientales deberían traducir sus objetivos generales en mecanismos operativos de prevención, respuesta y seguimiento [214, 215]. En particular, los residuos generados durante eventos de contaminación deben manejarse de acuerdo con su clasificación y con la normativa aplicable, garantizando su adecuada contención, transporte y disposición.

Finalmente, los resultados de este estudio ponen de manifiesto una oportunidad para fortalecer el marco regulatorio relacionado con la contaminación por hidrocarburos, específicamente, la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que constituye un referente para la caracterización y remediación de suelos contaminados; sin embargo, su alcance no resuelve por sí mismo la evaluación de HAP en sedimentos acuáticos [24]. Por ello, se propone que futuras revisiones normativas evalúen incorporar criterios específicos para sedimentos, ya sea mediante la adaptación de las Guías de Calidad de Sedimentos a las condiciones ambientales mexicanas o mediante el desarrollo de instrumentos regulatorios específicos para ecosistemas acuáticos.

8.5. Consideraciones finales

La desvinculación de la sociedad con la naturaleza contribuye a la permanencia y agravamiento del deterioro ambiental. En ese marco, vale la pena reconocer que el desarrollo económico de estos municipios no tiene por qué depender exclusivamente de la actividad petrolera. Las acciones de remediación, monitoreo ambiental y modernización tecnológica también pueden representar en sí mismos, oportunidades para el desarrollo de capacidades técnicas y generación de empleo. No obstante, para su materialización, se requiere de compromiso y de inversión coordinada tanto del sector público como de la iniciativa privada, teniendo como eje central no solo la recuperación de los ecosistemas, sino la salvaguarda de la salud pública [2].

Del mismo modo, fortalecer la educación ambiental desde una perspectiva basada en la evidencia científica y la cultura constituye una estrategia fundamental para prevenir y atender futuros eventos de contaminación aguda y crónica. Es por ello que, para lograr un cambio estructural, resulta indispensable focalizar la inversión y los esfuerzos educativos con mayor énfasis en la infancia y la juventud, formando desde etapas tempranas una conciencia ecológica crítica y el desarrollo de competencias aplicadas para el desarrollo sostenible [216], sin excluir la participación activa y concientización del resto de los sectores de la población.

Finalmente, aunque los cambios estructurales recaen en los sectores público y privado, la academia desempeña un rol insustituible. Por ello, resulta indispensable mantener e incrementar la inversión en investigación científica y tecnológica, orientada tanto a intervenir en estas zonas críticas como a prevenir futuros impactos ambientales; aunque el panorama ambiental pueda parecer abrumador, el cambio es trazable. Este trabajo tiene alcances específicos, pero no sería un verdadero ejercicio de ingeniería si no apostara por la multidisciplina y la sinergia entre todos los actores para aspirar al bienestar para todas las formas de vida.

Referencias

[1] Moreno Casasola P, Rojas Galaviz JL, Zárate Lomelí D, et al. Diagnóstico de los manglares de Veracruz: distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemática. *Madera Bosques* 2016; 8: 61–88.

[2] Morales-Mora MA, Rodríguez-Pérez B, Martínez-Delgadillo SA, et al. Human and ecotoxicological impacts assessment from the Mexican oil industry in the Coatzacoalcos region, as revealed by the USEtox™ model. *Environ Sci Pollut Res* 2014; 21: 9819–9831.

[3] Bozada Robles, L.M., y P.E. Namihira-Santillán. El Derrame de Petróleo del 22 de Diciembre de 2004 en la Cuenca Baja del Río Coatzacoalcos: Estudio de Caso. *2da Ed* 2005; 681–696.

[4] Ranjbar Jafarabadi A, Riyahi Bakhtiari A, Moghimi H, et al. Assessment of parent and alkyl - PAHs in surface sediments of Iranian mangroves on the northern coast of the Persian Gulf: Spatial accumulation distribution, influence factors, and ecotoxicological risks. *Chemosphere* 2024; 358: 142176.

[5] Padilla R. Tesis: Determinación de los niveles de hidrocarburos en sedimentos recientes del río Calzadas, en la región del bajo río Coatzacoalcos, Veracruz, México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México; 1989., https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/53998b4c-ef9b-45bd-af8e-4190ff52565b/content (accessed 25 August 2026).

[6] Brandão CCL, Sousa TR, Lee JT, et al. PAHs in Sediments from Amazon Mangrove and Oyster Farming Areas: Sources, Ecological Risks and Potential Toxicity. *Bull Environ Contam Toxicol* 2026; 116: 109.

[7] Olivares-Rubio HF, Ponce-Vélez G. Polycyclic aromatic hydrocarbons during the 21st Century in Southern Gulf of Mexico, a prominent petroleum area: A review. *Mar Pollut Bull* 2025; 210: 117343.

[8] Grimalt JO, Van Drooge BL, Ribes A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon composition in soils and sediments of high altitude lakes. *Environ Pollut* 2004; 131: 13–24.

[9] Namihira-Santillán PE, Olivares-Rubio HF, Velandia-Aquino LB, et al. PAHs in sediments and shrimps: Levels, sources, and risk estimation in a tropical coastal lagoon system near oil industry. *Mar Pollut Bull* 2025; 214: 117812.

[10] Masters GM, Ela WP. *Introduction to environmental engineering and science*. Third edition, Pearson new international edition. Harlow: Pearson, 2014.

[11] PEMEX. Pemex plan estratégico 2025-2035. Gobierno de México, Secretaría de Energía. Petróleos Mexicanos; 2025.,

https://www.pemex.com/saladeprensa/discursos/Documents/PemexPlanEstrategico2025-2035.pdf (accessed 6 May 2026).

[12] Gobierno de México. Plan nacional de desarrollo 2025-2030. Gobierno de México; 2025., https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981072/PND_2025-2030_v250226_14.pdf (accessed 6 May 2026).

[13] SEMARNAT. Inventario de Sitios Contaminados y Remediados 2025., https://www.datos.gob.mx (2025, accessed 6 August 2026).

[14] ONU S de E. Agenda 2030. Sistema de Información de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SIODS), https://agenda2030.mx/#/home (accessed 2 August 2026).

[15] SHCP, BANOBRAS. Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT). *Proyectos México. Oportunidades de Inversión. Secretaría de Hacienda y Crédito Público y Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos*, https://www.proyectosmexico.gob.mx/ppp03-ciit/ (2026, accessed 26 August 2026).

[16] Cruz-Santiago O, Torres-Dosal A, Ilizaliturri-Hernández CA, et al. Regiones de emergencia sanitaria y ambiental en México: Una breve revisión sobre la cuenca baja del río Coatzacoalcos. *Investig Cienc Univ Autónoma Aguascalientes*. Epub ahead of print 30 September 2024. DOI: 10.33064/iycuaa2024934626.

[17] SEMARNAT. Trabajará Semarnat con afectados de seis regiones del país con altos impactos ambientales y de salud. *gob.mx*, http://www.gob.mx/semarnat/prensa/trabajara-semarnat-con-afectados-de-seis-regiones-del-pais-con-altos-impactos-ambientales-y-de-salud?idiom=es-MX (2019, accessed 11 August 2026).

[18] SEMARNAT. Programa nacional de restauración ambiental 2025-2030. Gobierno de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2025., https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/998319/PNRA-2025.pdf (accessed 26 August 2026).

[19] Ruiz-Fernández AC, Betancourt Portela JM, Sericano JL, et al. Coexisting sea-based and land-based sources of contamination by PAHs in the continental shelf sediments of Coatzacoalcos River discharge area (Gulf of Mexico). *Chemosphere* 2016; 144: 591–598.

[20] Sánchez-Guerra M, Pelallo-Martínez N, Díaz-Barriga F, et al. Environmental polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure and DNA damage in Mexican children. *Mutat Res Toxicol Environ Mutagen* 2012; 742: 66–71.

[21] González-Mille DJ, Ilizaliturri-Hernández CA, Espinosa-Reyes G, et al. DNA damage in different wildlife species exposed to persistent organic pollutants (POPs) from the delta of the Coatzacoalcos river, Mexico. *Ecotoxicol Environ Saf* 2019; 180: 403–411.

[22] Ontiveros-Cuadras JF, Olivares-Rubio HF, Carnero-Bravo V, et al. Assessment of potentially toxic elements in surface sediments along the lower Coatzacoalcos River basin, Mexico. *Environ Geochem Health* 2026; 48: 129.

[23] Vázquez Botello A, Páez F. El problema crucial: la contaminación. Volumen 1. Serie Medio Ambiente en Coatzacoalcos. Centro de Ecodesarrollo; 1987.

[24] DOF. Norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012; 2012., https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133743/16._NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.pdf (accessed 17 August 2026).

[25] Honda M, Suzuki N. Toxicities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Aquatic Animals. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17: 1363.

[26] Olivares-Rubio HF, Ontiveros-Cuadras JF, Celis-Hernández O, et al. Spatial distribution of PAHs, nickel, and vanadium in sediments from a large coastal lagoon near a petroleum extraction area in the southern Gulf of Mexico. *Mar Pollut Bull* 2024; 207: 116901.

[27] Patel AB, Shaikh S, Jain KR, et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Front Microbiol*; 11. Epub ahead of print 5 November 2020. DOI: 10.3389/fmicb.2020.562813.

[28] Downham RP, Gannon B, Lozano DCP, et al. Tracking the history of polycyclic aromatic compounds in London through a River Thames sediment core and ultrahigh resolution mass spectrometry. *J Hazard Mater* 2024; 473: 134605.

[29] Spira R. Coal tars and cancer. *EBSCO*, https://www.ebsco.com (2024, accessed 12 October 2025).

[30] Lipsick J. A History of Cancer Research: Carcinogens and Mutagens. *Cold Spring Harb Perspect Med* 2021; 11: a035857.

[31] Jameson CW. Polycyclic aromatic hydrocarbons and associated occupational exposures. In: Baan RA, Stewart BW, Straif K (eds) *Tumour Site Concordance and Mechanisms of Carcinogenesis*. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer, http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570325/ (2019, accessed 12 October 2025).

[32] Halfadji A, Naous M, Bettiche F, et al. Human Health Assessment of Sixteen Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Contaminated Soils of Northwestern Algeria. *J Health Pollut* 2021; 11: 210914.

[33] Authority EFSA. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food - Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *EFSA J* 2008; 6: 724.

[34] Protocolo del Convenio de 1979 sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia provocada por contaminantes orgánicos persistentes, http://data.europa.eu/eli/prot/2004/259/oj/spa (1998, accessed 18 August 2025).

[35] Friedman CL, Selin NE. Long-Range Atmospheric Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Global 3-D Model Analysis Including Evaluation of Arctic Sources. *Environ Sci Technol* 2012; 46: 9501–9510.

[36] Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt J Pet* 2016; 25: 107–123.

[37] Femi-Oloye OP, Sutton RT, Gordon HD, et al. An Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Estimation Programs. *Toxics* 2024; 12: 592.

[38] Ben Othman H, Pick FR, Sakka Hlaili A, et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on marine and freshwater microalgae – A review. *J Hazard Mater* 2023; 441: 129869.

[39] Amador-Muñoz O, Martínez-Domínguez YM, Gómez-Arroyo S, et al. Current situation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in PM2.5 in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques. *Sci Total Environ* 2020; 703: 134526.

[40] Hayakawa K. Chemistry of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Nitropolycyclic Aromatic Hydrocarbons (NPAHs) and Other Oxidative Derivatives of PAHs. In: Hayakawa K (ed) *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Environmental Behavior and Toxicity in East Asia*. Singapore: Springer, pp. 3–10.

[41] Dąbrowska D, Kot-Wasik A, Namieśnik J. Stability Studies of Selected Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Organic Solvents and Identification of Their Transfromation

Products. Polish J. of Environ. Stud. 2008; Vol. 17, No. 1, 17-24, https://www.pjoes.com/pdf-88074-21933?filename=Stability-Studies-of-Sele.pdf (2008).

[42] ATSDR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Atlanta (GA): US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 1995., https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp69.pdf (accessed 25 August 2025).

[43] Achten C, Andersson JT. Overview of Polycyclic Aromatic Compounds (PAC). *Polycycl Aromat Compd* 2015; 35: 177–186.

[44] Li, H, Ran Y. Distribution and Bioconcentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water and Fishes. *Sci World J Res*. Epub ahead of print 9 August 2025. DOI: 10.1100/2012/632910.

[45] van Hattum B, Pons MJC, Montañés JFC. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Freshwater Isopods and Field-Partitioning Between Abiotic Phases. *Arch Environ Contam Toxicol* 1998; 35: 257–267.

[46] Duran R, Cravo-Laureau C. Role of environmental factors and microorganisms in determining the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment. *FEMS Microbiol Rev* 2016; 40: 814–830.

[47] Kanaly RA, Harayama S. Biodegradation of High-Molecular-Weight Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Bacteria. *J Bacteriol* 2000; 182: 2059–2067.

[48] Ruiz-Fernández AC, Sanchez-Cabeza J-A, Alonso-Hernández C, et al. Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico). *Cont Shelf Res* 2012; 37: 57–65.

[49] Feng Y, Li Z, Li W. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): Environmental Persistence and Human Health Risks. *Nat Prod Commun* 2025; 20: 1934578X241311451.

[50] Xu M, Wu M, Zhang Y, et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by bacterial mixture. *Int J Environ Sci Technol* 2022; 19: 3833–3844.

[51] Keshavarzifard M, Vazirzadeh A, Sharifinia M. Implications of anthropogenic effects on the coastal environment of Northern Persian Gulf, using jinga shrimp (*Metapenaeus affinis*) as indicator. *Mar Pollut Bull* 2020; 159: 111463.

[52] Ramzi A, Habeeb Rahman K, Muraleedharan KK. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Aquatic Environment: A Rudimentary Approach. In: Alshemmari H, Hashmi MZ, Kavil YN, et al. (eds) *Contaminated Land and Water: Remediation and Management*. Cham: Springer International Publishing, pp. 131–144.

[53] Net S, El-Osmani R, Prygiel E, et al. Overview of persistent organic pollution (PAHs, Me-PAHs and PCBs) in freshwater sediments from Northern France. *J Geochem Explor* 2015; 148: 181–188.

[54] Marris CR, Kompella SN, Miller MR, et al. Polyaromatic hydrocarbons in pollution: a heart-breaking matter. *J Physiol* 2020; 598: 227–247.

[55] Chen Y, Zheng F, Yang H, et al. The production of diverse brGDGTs by an Acidobacterium providing a physiological basis for paleoclimate proxies. *Geochim Cosmochim Acta* 2022; 337: 155–165.

[56] Yan B, Abrajano TA, Bopp RF, et al. Molecular Tracers of Saturated and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Inputs into Central Park Lake, New York City. *Environ Sci Technol* 2005; 39: 7012–7019.

[57] Stogiannidis E, Laane R. Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Using Their Molecular Indices: An Overview of Possibilities. In: Whitacre DM (ed) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Cham: Springer International Publishing, pp. 49–133.

[58] Ghetu CC, Scott RP, Wilson G, et al. Improvements in identification and quantitation of alkylated PAHs and forensic ratio sourcing. *Anal Bioanal Chem* 2021; 413: 1651–1664.

[59] Alaidaroos BA, AL-Essa NH, Jastaniah SD. Aromatic Hydrocarbon Compounds as Environmental Pollutants and Factors Affecting the Degradation Process By Some Microorganisms. *(IOSR-JPBS)* 2022; 17: 41–46.

[60] Wakeham SG, Canuel EA. Biogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the San Joaquin River in California (USA), and current paradigms on their formation. *Environ Sci Pollut Res* 2016; 23: 10426–10442.

[61] Guo Y, Laux SJ, Burdier M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in processed yard trash. *Waste Manag Res* 2020; 38: 825–830.

[62] Gore, PJW. Diagenesis. *EBSCO*, https://www.ebsco.com (2024, accessed 7 September 2025).

[63] Wang F, Zhao D, Zhang S, et al. Gas-particle partitioning and air-water exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Three Gorges Reservoir, southwest China. *Atmos Environ* 2023; 299: 119646.

[64] Keyte IJ, Harrison RM, Lammel G. Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons – a review. *Chem Soc Rev* 2013; 42: 9333–9391.

[65] Lammel G, Dvorská A, Klánová J, et al. Long-range Atmospheric Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons is Worldwide Problem - Results from Measurements at Remote Sites and Modelling. *Acta Chim Slov* 2015; 62: 729–735.

[66] Li J, Zhu Y, Ji X, et al. Oxidation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Triggered by a Photochemical Synergistic Effect between High- and Low-Molecular-Weight PAHs. *Environ Sci Technol* 2024; 58: 17807–17816.

[67] Shemer H, Linden KG. Aqueous photodegradation and toxicity of the polycyclic aromatic hydrocarbons fluorene, dibenzofuran and dibenzothiophene. *Water Res* 2007; 41: 853–861.

[68] Li S, Zhang S, Xu J, et al. Photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons on soil surface: Kinetics and quantitative structure-activity relationship (QSAR) model development. *Environ Pollut* 2024; 345: 123541.

[69] Leharne S. Risk assessment and remediation of NAPL contaminated soil and groundwater. *ChemTexts* 2021; 8: 5.

[70] Newell CJ, Acree SD, Ross RR, et al. Ground Water Issue: Light Nonaqueous Phase Liquids. *U S Environ Prot Agency US EPA*, https://www.epa.gov/remedytech/light-nonaquaeous-liquids.

[71] ITRC. Key LNAPL Concepts – LNAPL Update, https://lnapl-3.itrcweb.org/3-key-lnapl-concepts/ (accessed 6 October 2025).

[72] US EPA O. Dense Nonaqueous Phase Liquids, https://www.epa.gov/remedytech/dense-nonaqueous-phase-liquids (2015, accessed 6 October 2025).

[73] US EPA. Contaminants > Dense nonaqueous phase liquids (dnapls) > Chemistry and behavior; 2025., https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/dense_nonaqueous_phase_liquids_(dnapls)/cat/Chemistry_and_Behavior/ (2025, accessed 6 October 2025).

[74] Wehrer M, Rennert T, Totsche KU. Kinetic control of contaminant release from NAPLs – Experimental evidence. *Environ Pollut* 2013; 179: 315–325.

[75] Birak PS, Miller CT. Dense Nonaqueous Phase Liquids at Former Manufactured Gas Plants: Challenges to Modeling and Remediation. *J Contam Hydrol* 2009; 105: 81–98.

[76] Ali M, Xu D, Yang X, et al. Microplastics and PAHs mixed contamination: An in-depth review on the sources, co-occurrence, and fate in marine ecosystems. *Water Res* 2024; 257: 121622.

[77] Cullen JA, Marshall CD, Hala D. Integration of multi-tissue PAH and PCB burdens with biomarker activity in three coastal shark species from the northwestern Gulf of Mexico. *Sci Total Environ* 2019; 650: 1158–1172.

[78] Madeen E, Siddens LK, Uesugi S, et al. Toxicokinetics of Benzo[a]pyrene in Humans: Extensive Metabolism as Determined by UPLC-Accelerator Mass Spectrometry Following Oral Micro-Dosing. *Toxicol Appl Pharmacol* 2019; 364: 97–105.

[79] Bekki K. Metabolic Activation. In: Hayakawa K (ed) *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Singapore: Springer Singapore, pp. 227–234.

[80] Heredia-Ortiz R, Bouchard M, Marie-Desvergne C, et al. Modeling of the Internal Kinetics of Benzo(a)pyrene and 3-Hydroxybenzo(a)pyrene Biomarker from Rat Data. *Toxicol Sci* 2011; 122: 275–287.

[81] Moorthy B, Chu C, Carlin DJ. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: From Metabolism to Lung Cancer. *Toxicol Sci* 2015; 145: 5–15.

[82] Nakajima D, Yagishita M. Carcinogenicity/Mutagenicity. In: Hayakawa K (ed) *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Environmental Behavior and Toxicity in East Asia*. Singapore: Springer, pp. 235–244.

[83] Stevens EA, Mezrich JD, Bradfield CA. The aryl hydrocarbon receptor: a perspective on potential roles in the immune system. *Immunology* 2009; 127: 299–311.

[84] Vázquez-Gómez G, Rubio-Lightbourn J, Espinosa-Aguirre JJ. Mecanismos de acción del receptor de hidrocarburos de arilos en el metabolismo del benzo[a]pireno y el desarrollo de tumores. *TIP Rev Espec En Cienc Quím-Biológicas* 2016; 19: 54–67.

[85] Carriquiriborde P. *Principios de Ecotoxicología*. 1a edn. Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/118183/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y (2021).

[86] Zahed M, Salehi S, Tanhaie B, et al. Mutagenic and genotoxic effect of polycyclic aromatic hydrocarbons on health: Mechanisms and Risk assessment. Epub ahead of print 2023. DOI: https://doi.org/10.22541/au.168078605.57508625/v1.

[87] Xu Q, He Z, Li P, et al. Toxicity mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbons to Manila clam *Ruditapes philippinarum*: oxidative stress and oxidative damage. *Mar Pollut Bull* 2025; 218: 118177.

[88] Regional Office for Europe WHO. *Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution.* Copenhagen: World Health Organization, https://www.cancer-environnement.fr/app/uploads/2025/02/OMS_2021_Human-health-effects-of-PAH-as-ambient-air-pollutants_Report-of-the-Working-Group-on-PAH-of-the-Joint-Task-Force-on-the-Health-Aspects-of-Air-Pollution.pdf (2021).

[89] Leachi HFL, Marziale MHP, Martins JT, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and development of respiratory and cardiovascular diseases in workers. *Rev Bras Enferm* 2020; 73: e20180965.

[90] Cheng X, Gao H, Li Q, et al. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure and their effects on glycolipid metabolism in pregnant women and their newborn in Haikou City, China. *Front Public Health*; 12. Epub ahead of print 20 January 2025. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1510517.

[91] Mallah MA, Mallah MA, Liu Y, et al. Relationship Between Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Cardiovascular Diseases: A Systematic Review. *Front Public Health* 2021; 9: 763706.

[92] Pozzan R, de Almeida Roque A, Iwamoto H, et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Marine Environments Affect Fish Reproduction—A Critical Review. *Toxics* 2025; 13: 747.

[93] Choi H, Wang L, Lin X, et al. Fetal Window of Vulnerability to Airborne Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Proportional Intrauterine Growth Restriction. *PLOS ONE* 2012; 7: e35464.

[94] Perera FP, Tang D, Wang S, et al. Prenatal Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Exposure and Child Behavior at Age 6–7 Years. *Environ Health Perspect* 2012; 120: 921–926.

[95] ATSDR. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): What Health Effects Are Associated With PAH Exposure? Environmental Medicine; 2023, https://archive.cdc.gov/www_atsdr_cdc_gov/csem/polycyclic-aromatic-hydrocarbons/health_effects.html (accessed 13 October 2025).

[96] Mallah MA, Changxing L, Mallah MA, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overeview. *Chemosphere* 2022; 296: 133948.

[97] Aihemaitijiang G, Zhang L, Li M, et al. PAH Contamination, Sources and Health Risks in Black Soil Region of Jilin Province, China. *Toxics* 2024; 12: 937.

[98] DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-018-STPS-2015, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5411121&fecha=09/10/2015#gsc.tab=0 (2015).

[99] Walker, C.H., Greig-Smith, P.W., Crossland, N.O., Brown, R. Ecotoxicology. In: Balls, M., Bridges, J., Southee, J. (eds). Epub ahead of print 1991. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-349-12667-5_9.

[100] Leeuwen CJ van. *Risk Assessment of Chemicals: An Introduction*. 2nd edition. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. Epub ahead of print 2007. DOI: 10.1007/978-1-4020-6102-8.

[101] US EPA. Guidelines for Ecological Risk Assessment; 1998. *US Environ Prot Agency*, https://www.epa.gov/risk/guidelines-ecological-risk-assessment.

[102] Chapman PM. Determining when contamination is pollution — Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environ Int* 2007; 33: 492–501.

[103] Long ER, Field LJ, MacDonald DD. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines. *Environ Toxicol Chem* 1998; 17: 714–727.

[104] Buchman MF. NOAA Screening Quick Reference Tables; 1999, https://repository.library.noaa.gov (1999, accessed 7 August 2026).

[105] Long ER, Macdonald DD, Smith SL, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ Manage* 1995; 19: 81–97.

[106] Verbruggen EMJ. Environmental risk limits for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for direct aquatic, benthic, and terrestrial toxicity; 2012. *Natl Inst Public Health Environ*, https://rivm.openrepository.com/entities/publication/04ec1473-e316-4daa-8d05-b16125224ac1.

[107] Nisbet ICT, LaGoy PK. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regul Toxicol Pharmacol* 1992; 16: 290–300.

[108] CONAGUA. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/ (accessed 8 April 2025).

[109] Bello J, Magaña V, Rodríguez PH. 5.4 Sitio piloto Río Coatzacoalcos- Laguna El Colorado, https://www.researchgate.net/publication/311594592_Sitio_piloto_Rio_Coatzacoalcos-_Laguna_El_Colorado (2008).

[110] CONABIO. Portal de Información Geográfica; 2023, http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (accessed 6 August 2026).

[111] García EA. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251 (2004, accessed 20 August 2026).

[112] DOF. Resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Costera de Coatzacoalcos, clave 3012, en el Estado de Veracruz, Región Hidrológico-Administrativa Golfo Centro; 2018, https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5440916 (accessed 20 August 2026).

[113] Magaña V, Amador JA, Medina S. The Midsummer Drought over Mexico and Central America, https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/12/6/1520-0442_1999_012_1577_tmdoma_2.0.co_2.xml (1999, accessed 20 August 2026).

[114] SGM. Carta Geológico-Minera Coatzacoalcos, E15-1-4 Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Esc. 1:250,000, https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/metadatos_geol/102_GL_coatzacoalcos.html (accessed 10 September 2026).

[115] Ramos-Vázquez MA, Armstrong-Altrin JS, Rosales-Hoz L, et al. Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcos River delta, western Gulf of Mexico, Mexico. *Arab J Geosci* 2017; 10: 148.

[116] SEMARNAT. Ríos de México, venas de agua, cultura y civilización; 2023. *gob.mx*, http://www.gob.mx/semarnat/articulos/rios-de-mexico-venas-de-agua-cultura-y-civilizacion?idiom=es (accessed 16 May 2026).

[117] CENAPRED. Atlas Nacional de Riesgos, http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html (accessed 6 April 2026).

[118] Winter TC. *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. DIANE Publishing, 2000.

[119] Boano F, Harvey JW, Marion A, et al. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Rev Geophys* 2014; 52: 603–679.

[120] FAO. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Organ Las N U Para Aliment Agric*, https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content (2015).

[121] SEMARNAT. Programa nacional hídrico 2020-2024. Gobierno de México, Secretaría de Medio Ambiente; 2020., https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642632/PNH_2020-2024___ptimo.pdf (accessed 24 August 2026).

[122] CONAPO. Población a mitad de año por municipio y grupos quinquenales de edad (1990-2040), proyección para 2024, https://www.datos.gob.mx (2025, accessed 25 August 2026).

[123] CONEVAL. Pobreza 2020 | Veracruz; 2020, https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Veracruz/Paginas/Pobreza_2020.aspx (accessed 25 August 2026).

[124] CONAPO. Índices de marginación. *gob.mx*, http://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372 (2020, accessed 10 August 2026).

[125] INEGI. Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), población de 15 años y más de edad, https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/#datos_abiertos (2024, accessed 25 August 2026).

[126] Secretaría de Economía. Coatzacoalcos: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública. *Data México*, https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/explore (2020, accessed 25 August 2026).

[127] INEGI. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación esc. 1:250 000 (versión 3). Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2014., https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825063443.pdf (accessed 24 August 2026).

[128] INEGI. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), https://www.inegi.org.mx/app/descarga/ficha.html?tit=2403849&ag=30&f=csv (2024, accessed 24 August 2026).

[129] PEMEX. Anuario estadístico 2024. Gobierno de México; 2025., https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/Anuario%20Estad%C3%ADstico%202024.pdf (accessed 8 September 2026).

[130] ASIPONA. CRECIMIENTO ANUAL CARGA COMERCIAL. Resumen Histórico, https://www.puertocoatzacoalcos.com.mx/resumen-historico (2020, accessed 18 August 2026).

[131] ASIPONA. Estadísticas de Coyuntura. MPM01A - Carga y Buques - PAJARITOS. FEBRERO 2023., https://www.puertocoatzacoalcos.com.mx/estadisticas-de-coyuntura (2023, accessed 18 August 2026).

[132] SITC. Datos Viales - Veracruz. Consulta en línea; 2025., https://micrs.sct.gob.mx/infraestructura/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/ (2025, accessed 18 August 2026).

[133] Onyije FM, Hosseini B, Togawa K, et al. Cancer Incidence and Mortality among Petroleum Industry Workers and Residents Living in Oil Producing Communities: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18: 4343.

[134] Williams SB, Shan Y, Jazzar U, et al. Proximity to Oil Refineries and Risk of Cancer: A Population-Based Analysis. *JNCI Cancer Spectr* 2020; 4: pkaa088.

[135] INEGI. Estadísticas de Defunciones Registradas (EDR), https://www.inegi.org.mx/programas/edr/ (accessed 6 August 2026).

[136] Morales J, Ángeles, S, Salazar MTS. Golfo de México: Venero Petrolero del País. *Probl Desarro* 1989; 20: 145–163.

[137] Sánchez Salazar MT, Martínez Laguna N, Martínez Galicia M. lndustria petroquímica y cambios socioeconómicos regionales en la costa del Golfo de México. El caso del sureste de Veracruz. *Investig Geográficas*; 1. Epub ahead of print 1 August 1999. DOI: 10.14350/rig.59099.

[138] Martínez Laguna N. Evolución y expresión territorial de la industria petroquírnica en Mexico. *Investig Geográficas*; 1. Epub ahead of print 1 June 2001. DOI: 10.14350/rig.59158.

[139] Jiménez Toro ID. La construcción de una ciudad petrolera: vías de comunicación y paisaje urbano de Minatitlán, Veracruz 1906-1950.

[140] SEMARNAT. Cierre técnico Las Matas, un proyecto de ingeniería ambiental. gob.mx; 2024., https://www.gob.mx/semarnat/articulos/cierre-tecnicas-las-matas-un-proyecto-de-ingenieria-ambiental?idiom=es (2024, accessed 2 August 2026).

[141] Castillo Leal, Maricela; Martínez Castro, César Julio y García Martínez, Katia. Análisis socioeconómico de los Polos de Desarrollo para el Bienestar en el Proyecto del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec. *Desigual Reg Empobrecimiento Gest Los Territ Con Inclusión Soc Gest Los Territ Con Inclusión Soc* 2023; 153–168.

[142] Rueda AM. Trabajo recepcional: evaluación de la situación de residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz; 2014. *Fac Cienc Quím Univ Veracruzana*.

[143] Castro JDO. Decreto de creación del organismo público descentralizado intermunicipal denominado Sistema Intermunicipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Manejo Especial (SIGIRES); 2023. *Gac Of Órgano Gob Estado Veracruz Ignacio LLave*, https://sigires.gob.mx/normatividad/.

[144] SEMARNAT. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). Consulta de registros correspondientes a 2024., https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/retc/index.php?opcion=3&anio=2016&param=03 (2024, accessed 6 August 2026).

[145] DOF. Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000; 2002., https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf (accessed 30 July 2026).

[146] Schumacher BA. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments; 2002.

[147] Bisutti I, Hilke I, Raessler M. Determination of total organic carbon – an overview of current methods. *TrAC Trends Anal Chem* 2004; 23: 716–726.

[148] US EPA. Method 3550C: ultrasonic extraction, part of test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods; 2015., https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3550c.pdf (accessed 4 August 2026).

[149] Cantwell H (ed). Eurachem guide: the fitness for purpose of analytical methods – a laboratory guide to method validation and related topics (3rd ed); 2025., https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_3rd_ed_V1_EN.pdf (accessed 5 August 2026).

[150] INEGI. Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano. Programas de Información, https://www.inegi.org.mx/programas/ (accessed 6 June 2026).

[151] SGM. GeoInfoMex - El Banco de Datos del Servicio Geológico Mexicano, https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/ (accessed 6 August 2026).

[152] INEGI. SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/ (accessed 23 October 2025).

[153] INEGI. Directorio Nacional de Unidades Económicas. DENUE. *Censos Económicos 2014*, https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx (2014, accessed 17 January 2026).

[154] SENER. Sistema de Información de Hidrocarburos (SIH), https://sih-hidrocarburos.energia.gob.mx/ (accessed 11 November 2025).

[155] INEGI. Censo de Población y Vivienda (CPV) 2020, https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ (2020, accessed 20 January 2026).

[156] Authority EFSA. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. *EFSA J* 2010; 8: 1557.

[157] US EPA O. Regional Guidance on Handling Chemical Concentration Data Near the Detection Limit in Risk Assessments, https://www.epa.gov/risk/regional-guidance-handling-chemical-concentration-data-near-detection-limit-risk-assessments (2015, accessed 6 August 2026).

[158] US EPA. Guidance for data quality assessment: practical methods for data analysis: EPA QA/G9: QA00 Update: 2000., https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/g9-final.pdf (accessed 6 August 2026).

[159] Tobiszewski M, Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environ Pollut* 2012; 162: 110–119.

[160] Yunker MB, Macdonald RW, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Org Geochem* 2002; 33: 489–515.

[161] Whitacre DM (ed). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Cham: Springer International Publishing. Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-10638-0.

[162] Kalf DF. RIVM report 601501010 environmental risk limits for ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA); 2003., https://rivm.openrepository.com/server/api/core/bitstreams/9e5f3717-b289-4f71-a6da-8a5b2e8efe4a/content (accessed 8 August 2026).

[163] Yan Y, Bao K, Zhao K, et al. A baseline study of polycyclic aromatic hydrocarbons distribution, source and ecological risk in Zhanjiang mangrove wetlands, South China. *Ecotoxicol Environ Saf* 2023; 249: 114437.

[164] Wu Y, Zhao Y, Qi Y, et al. Characteristics, Source and Risk Assessment of Soil Polycyclic Aromatic Hydrocarbons around Oil Wells in the Yellow River Delta, China. *Water* 2023; 15: 3324.

[165] US EPA. Method 8270E semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry; 2018., https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/method_8270e_update_vi_06-2018_0.pdf (accessed 13 August 2026).

[166] Ortíz Gl. Análisis de la contaminación en sedimentos y bentos en el bajo río Coatzacoalcos, Veracruz. Tesis; 2000. UNAM. *TESIS*.

[167] Espinosa-Reyes G, Ilizaliturri-Hernández C, González-Mille D, et al. Contaminantes orgánicos persistentes en la cuenca baja del río Coatzacoalcos, Veracruz. *Golfo México Contam E Impacto Ambient Diagnóstico Tend*, https://www.researchgate.net/profile/Cesar-Ilizaliturri-Hernandez/publication/272488104_Contaminantes_organicos_persistentes_en_la_cuenca_baja_del_Rio_Coatzacoalcos_Veracruz/links/54e610700cf2cd2e028bb8e8/Contaminantes-organicos-persistentes-en-la-cuenca-baja-del-Rio-Coatzacoalcos-Veracruz.pdf (2013).

[168] Zamora N. Diagnóstico de la contaminación por mercurio a través del uso de peces y moluscos bivalvos para consumo humano provenientes del estuario del río Coatzacoalcos, Veracruz. Tesis; 2009. UNAM. *TESIS*, https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/de9f39d6-79e6-49a8-ab6d-f3e3a8bb83fa/content (2009).

[169] Torres-Bejarano F, Ramirez H, Rodríguez C. A Study Case of Hydrodynamics and Water Quality Modelling: Coatzacoalcos River, Mexico. In: *Hydrodynamics - Natural Water Bodies*. IntechOpen. Epub ahead of print 5 January 2012. DOI: 10.5772/27721.

[170] Durán-Campos E, Salas-de-León DA, Monreal-Gómez MA, et al. Microphytoplankton communities associated with deep thermoclines in the southwestern Gulf of Mexico during a "Nortes" storm season. *Lat Am J Aquat Res* 2026; 54: 508–519.

[171] Zavala-Hidalgo J, Morey SL, O'Brien JJ. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J Geophys Res Oceans*; 108. Epub ahead of print 2003. DOI: 10.1029/2003JC001879.

[172] Acosta A. *Los ftalatos como contaminantes emergentes prioritarios en sedimentos y biota del río Coatzacoalcos, Ver.* Tesis de Maestría, En Elaboración., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM., 2026.

[173] Chavarría Aráuz FJ. Módulo: Edafología 1. 1a ed. Villamaría, Colombia: Proyecto Universidad en el Campo; 2011., https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf (accessed 16 August 2026).

[174] Mayer LM. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. *Geochim Cosmochim Acta* 1994; 58: 1271–1284.

[175] Hedges JI, Keil RG. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis; 1995. *Mar Chem*.

[176] Budzinski H, Jones I, Bellocq J, et al. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Mar Chem* 1997; 58: 85–97.

[177] Stout SA. Applications of petroleum fingerprinting in known and suspected pipeline releases—two case studies; 2003. *Appl Geochem*.

[178] Gallegos Z. Una explosión causa 32 muertos en una planta de Pemex en Coatzacoalcos. *El País*, 25 April 2016, https://elpais.com/internacional/2016/04/21/mexico/1461192949_735680.html (25 April 2016, accessed 8 September 2026).

[179] Petroquimex. Explosión en complejo Pajaritos provocó la evacuación de 200 trabajadores, https://petroquimex.com/explosion-en-complejo-pajaritos-provoco-la-evacuacion-de-200-trabajadores/ (2021, accessed 8 September 2026).

[180] Demos E, Córdova SC. La Jornada - Explosión e incendio en la petroquímica de Pajaritos, https://www.jornada.com.mx (2021, accessed 8 September 2026).

[181] Diario del Istmo. Derrame en el río Coatzacoalcos: Pemex acuerda estos compromisos con cooperativas de Minatitlán; 2025, https://www.youtube.com/watch?v=_6Bfio-eWBw (2025, accessed 8 September 2026).

[182] N+. Nuevo Derrame de Hidrocarburo en Río Coatzacoalcos Afecta a 800 Pescadores en Minatitlán. *N+*, https://www.nmas.com.mx/veracruz/medio-ambiente/nuevo-derrame-de-hidrocarburo-en-rio-coatzacoalcos-afecta-a-800-pescadores-en-minatitlan-sur-de-veracruz/ (2025, accessed 8 September 2026).

[183] Aristegui Noticias. Reportan derrame de hidrocarburo en río Coatzacoalcos; 2025, https://aristeguinoticias.com/0402/mexico/reportan-derrame-de-hidrocarburo-en-rio-coatzacoalcos/ (2025, accessed 8 September 2026).

[184] Salazar M. Derrame de crudo afectó 36 kilómetros de playa de Coatzacoalcos; causó mortandad de peces y tortugas marinas - Diario de Xalapa. *OEM*, https://oem.com.mx/diariodexalapa/ciencia-y-salud/derrame-de-crudo-afecto-36-kilometros-de-playa-de-coatzacoalcos-causo-mortandad-de-peces-y-tortugas-marinas-13407050 (2024, accessed 8 September 2026).

[185] Martínez FC. En Nanchital, alarma derrame de hidrocarburo de Pemex; llegó al río Coatzacoalcos, https://lasillarota.com/veracruz/2023/8/1/derrame-de-hidrocarburo-por-ducto-obsoleto-de-pemex-llego-al-rio-coatzacoalcos-354238.html (2023, accessed 8 September 2026).

[186] Santander I. Infraestructura de Pemex ligada a 6 de 10 derrames en Coatzacoalcos. *Diario del Itsmo*, https://diariodelistmo.com/coatzacoalcos/infraestructura-de-pemex-ligada-a-6-de-10-derrames-en-coatzacoalcos-20260316-0033.html (2026, accessed 8 September 2026).

[187] Martínez FC. Nuevo derrame de petróleo en el río Coatzacoalcos afecta a pescadores. *Grupo Milenio*, https://www.milenio.com/estados/derrame-petroleo-rio-coatzacoalcos-afecta-pescadores (2024, accessed 8 September 2026).

[188] Diario del Itsmo. Río Coatzacoalcos amanece con nuevo derrame de hidrocarburo; reportan olor asfixiante | VIDEO; 2025., https://diariodelistmo.com/noticias/Rio-Coatzacoalcos-amanece-con-nuevo-derrame-de-hidrocarburo-reportan-olor-asfixiante--VIDEO-20250510-0030.html (2025, accessed 8 September 2026).

[189] Dávila F. Por derrame de crudo, pelícanos comienzan a morir en el río Coatzacoalcos. *Excélsior*, https://www.excelsior.com.mx/nacional/derrame-crudo-muerte-pelicanos-rio-coatzacoalcos/1699455 (2025, accessed 8 September 2026).

[190] Aviña E. Aparecen aves y especies marinas muertas en playa de Coatzacoalcos. *Al Calor Político*, https://www.alcalorpolitico.com/informacion/aparecen-aves-y-especies-marinas-muertas-en-playa-de-coatzacoalcos-425009.html (2025, accessed 8 September 2026).

[191] MILENIO. Reportan nuevo derrame de combustible en aguas Río Coatzacoalcos, https://www.youtube.com/watch?v=Mw2gBQ_Nh7I (2025, accessed 8 September 2026).

[192] ASEA [@agencia_asea]. IMPORTANTE Sobre recientes derrames de hidrocarburo en el río Coatzacoalcos, estado de Veracruz, la ASEA informa. *Twitter; 2025*, https://x.com/agencia_asea/status/1886974701932831077 (accessed 8 September 2026).

[193] Monter YMF, Guerrero JMC. Hábitos de consumo y valor nutricional de los recursos marinos entre los pescadores de Yucatán, México. *Investig Geográficas*. Epub ahead of print 17 April 2023. DOI: 10.14350/rig.60690.

[194] US EPA. Method 3600C: cleanup, part of test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods; 2015., https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3600c.pdf (accessed 17 August 2026).

[195] EPA. Method 3535A: solid-phase extraction (SPE), part of test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods; 2015., https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3535a.pdf (accessed 17 August 2026).

[196] Palermo MR, Schroeder PR, Estes TJ, Francingues NR. ERDC/EL TR-08-29, Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments. *Environ Lab US Army Eng Res Dev Cent US EPA*, https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16532 (2008).

[197] ITRC. Contaminated Sediments Remediation Remedy Selection for Contaminated Sediments. *Interstate Technol Regul Counc*, https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2025/07/CS-2.pdf (2014).

[198] Dat N-D, Chang MB. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Sci Total Environ* 2017; 609: 682–693.

[199] ASEA. Taller virtual de difusión. Regulación sobre sitios contaminados por hidrocarburos en exploración y extracción. Agencia de Seguridad, Energía y Medio Ambiente; 2021., http://104.209.210.233/gobmx/repositorio/DIAGNOSTICO_DE_ACCESIBILIDAD/UGI/PRESENTACION-AJUSTES-24-09-2021.pdf (accessed 17 August 2026).

[200] Trellu C, Mousset E, Pechaud Y, et al. Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: A critical review. *J Hazard Mater* 2016; 306: 149–174.

[201] Chen Y, Zhi D, Zhou Y, et al. Electrokinetic techniques, their enhancement techniques and composite techniques with other processes for persistent organic pollutants remediation in soil: A review. *J Ind Eng Chem* 2021; 97: 163–172.

[202] Trujillo-Narcía A, Rivera-Cruz MC, Lagunes-Espinoza LC, Palma-López DJ, Soto-Sánchez S, Ramírez-Valverde G. Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. 2012; 28: 360–374.

[203] Nava Urrego LM, Gasperín Sanchéz R, Durán Moreno A. Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. *Rev Int Contam Ambient* 2014; 30: 101–112.

[204] Fakhru'l-Razi A, Pendashteh A, Abdullah LC, et al. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *J Hazard Mater* 2009; 170: 530–551.

[205] Grandclément C, Seyssiecq I, Piram A, et al. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review. *Water Res* 2017; 111: 297–317.

[206] Rayaroth MP, Marchel M, Boczkaj G. Advanced oxidation processes for the removal of mono and polycyclic aromatic hydrocarbons – A review. *Sci Total Environ* 2023; 857: 159043.

[207] Sreedevi MA, Harikumar PS. Occurrence, distribution, and ecological risk of heavy metals and persistent organic pollutants (OCPs, PCBs, and PAHs) in surface sediments of the Ashtamudi wetland, south-west coast of India. *Reg Stud Mar Sci* 2023; 64: 103044.

[208] He Q, Silliman BR. Climate Change, Human Impacts, and Coastal Ecosystems in the Anthropocene. *Curr Biol* 2019; 29: R1021–R1035.

[209] Botello A.V., S.Villanueva, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz. (2017). Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático. ujat, unam, uac. 476 p., https://www.redicomar.com/wp-content/uploads/2018/10/Vulnerabilidad-de-las-Zonas-Costeras-de-Latinoame%CC%81rica-al-Cambio-Clima%CC%81tico.pdf (accessed 17 August 2026).

[210] Chacón Gina, Velasco Anaid, Martin Daniel. Cuidar lo que importa. El presupuesto para el cuidado del ambiente y las áreas naturales protegidas en el PPEF 2025. Análisis y recomendaciones; 2024., https://nossamexico.com/cuidar-lo-que-importa-el-presupuesto-para-el-cuidado-del-ambiente-y-las-areas-naturales-protegidas-en-el-ppef-2025/ (2024).

[211] Fundar, CEMDA, Greenpeace. Presupuesto limitado, sin metas ni compromisos claros para hacer frente al cambio climático en 2026., https://fundar.org.mx/wp-content/uploads/2025/09/Boletin-Analisis-PPEF-2026-AT16_190925.pdf (accessed 17 August 2026).

[212] Cámara de Diputados. Iniciativa que adiciona el artículo 109 Bis de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en materia de registro de emisiones y transferencia de contaminantes. Sistema de Información Legislativa (SIL). Secretaría de Gobernación; 2026., https://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2026/01/asun_5006587_20260126_1769452679.pdf (accessed 17 August 2026).

[213] Rosete E. Marcos Orellana, relator de la ONU: "En México falta una ley general de sustancias químicas y sobre plaguicidas altamente peligrosos". *El País México*, https://elpais.com/mexico/2026-03-23/marcos-orellana-relator-de-la-onu-en-mexico-falta-una-ley-general-de-sustancias-quimicas-y-sobre-plaguicidas-altamente-peligrosos.html (2026, accessed 17 August 2026).

[214] Gobierno de la Ciudad de Coatzacoalcos. Plan municipal de desarrollo Coatzacoalcos 2026-2029; 2026.

[215] Ayuntamiento de Minatitlán. Plan de desarrollo municipal Minatitlán 2022-2025; 2022.

[216] Izquierdo Alberca MJ. La persistente brecha educativa: del informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Bie3 Bol IEEE Inst Esp Estud Estratég* 2017; 210–223.

[217] Yan J, Wang L, Fu PP, et al. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutat Res* 2004; 557: 99–108.

Apéndices

Apéndice A. Cartografía

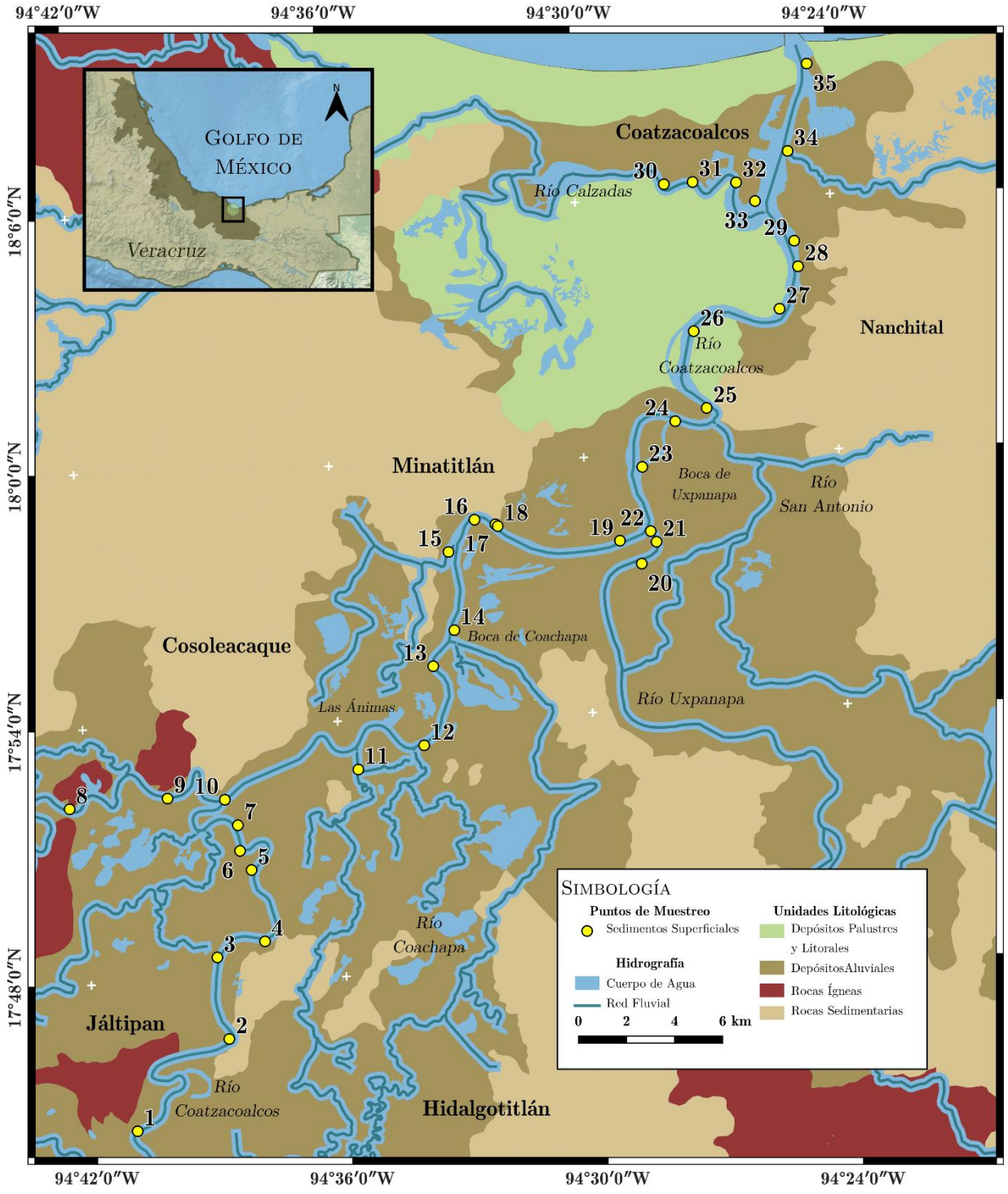


Figura A.1. Geología del río Coatzacoalcos

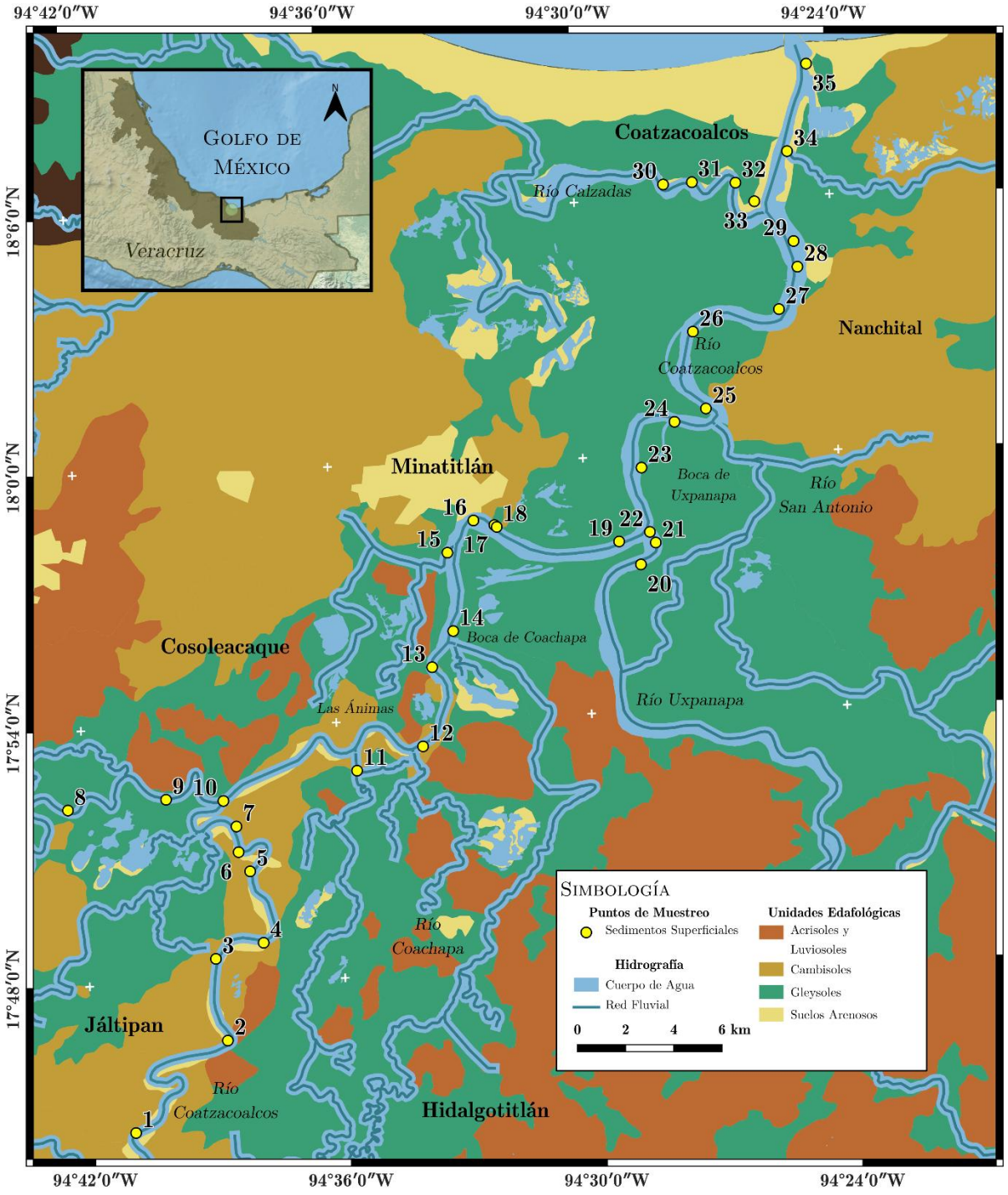


Figura A.2. Edafología del río Coatzacoalcos

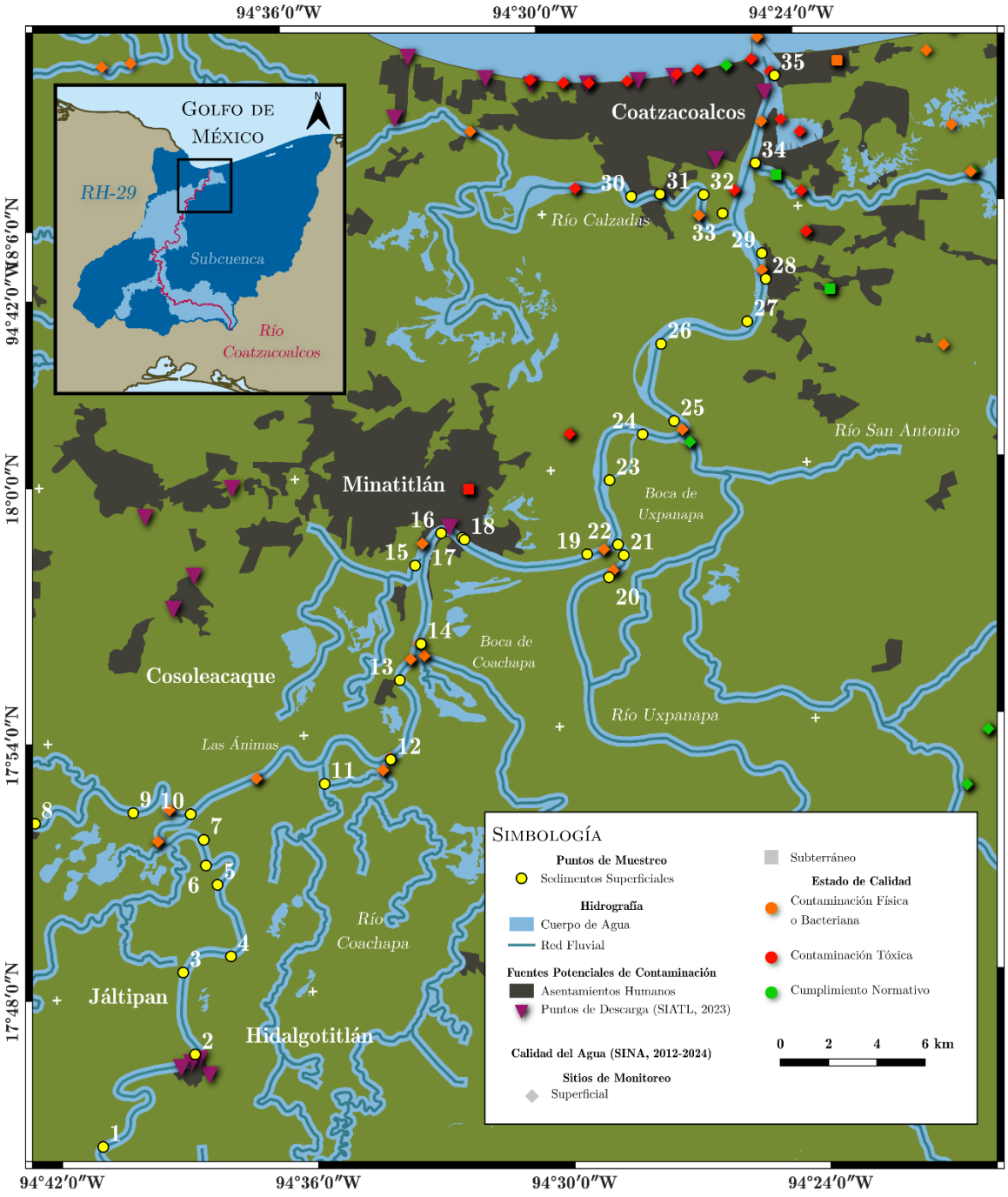


Figura A.3. Hidrografía y Calidad del Agua en la subcuenca para 2024

Nota: La categorización propuesta se adapta el Semáforo de Calidad del Agua (SINA) [**108**]. El cumplimiento normativo (semáforo verde) indica que todos los parámetros están dentro de los límites máximos permisibles. La contaminación física o bacteriana (semáforo amarillo) en aguas superficiales, corresponde al incumplimiento de sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto (OD %), coliformes fecales (CF) o *E. coli*; mientras que, en aguas subterráneas, señala alteraciones fisicoquímicas por incumplimiento en alcalinidad,

conductividad, dureza, sólidos disueltos totales (SDT), hierro o manganeso totales. La contaminación tóxica (semáforo rojo) refleja el incumplimiento de demanda bioquímica o química de oxígeno (DBO, DQO), enterococos o toxicidad en aguas superficiales; y, para aguas subterráneas, indica niveles excedentes de fluoruros, coliformes fecales, nitratos o Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT, como: arsénico, cadmio, cromo, mercurio y plomo totales).

Apéndice B. Evidencia fotográfica

Figura B.1. Muestreo en Campo, junio 2025



Figura B.1.1. Traslado a los puntos de muestreo en el área de estudio



Figura B.1.2. Recolección de sedimentos superficiales con draga Van Veen



Figura B.1.3. Recuperación del sedimento y trasvase a los recipientes de vidrio



Figura B.1.4. Preservación en campo y almacenamiento de las muestras

Figura B.2. Procesamiento de muestras para determinación de materia orgánica

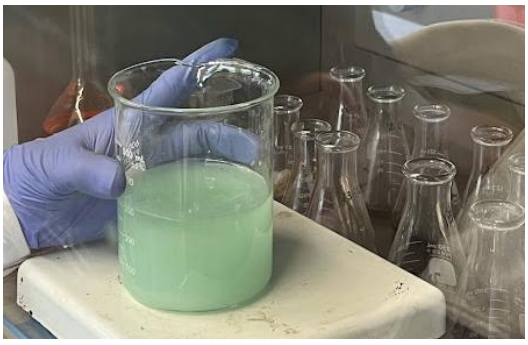


Figura B.2.1. Preparación de la solución



Figura B.2.2. Oxidación de las

valorante de sulfato ferroso amoniacal a 0.5 N



Figura B.2.3. Apariencia de las muestras digeridas, previas a la titulación

muestras con dicromato de potasio y ácido sulfúrico

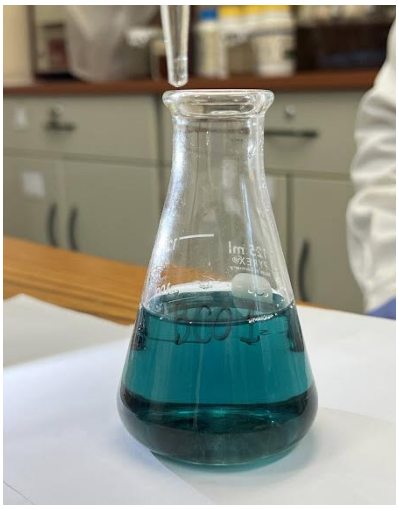


Figura B.2.4. Vire del blanco a color verde esmeralda al final de la titulación



Figura B.2.5. Lote de blancos y muestras para la validación del método

Figura B.3. Procesamiento de muestras para extracción y preparación de HAP



Figura B.3.1. Lote de muestras de



Figura B.3.2. Separación de fases y obtención del segundo sobrenadante tras la

sedimento acondicionadas previo al pesaje



Figura B.3.3. Proceso de extracción sólido-líquido asistida por baño ultrasónico

extracción con solvente

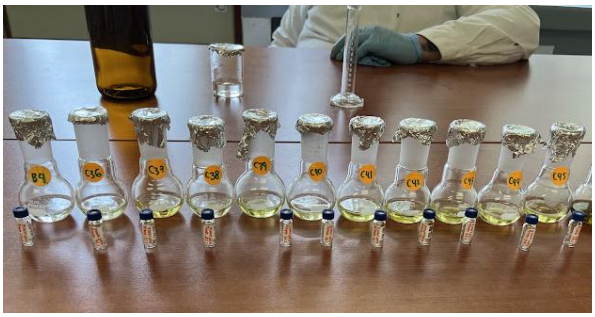


Figura B.3.4. Trasvase de los extractos finales desde matraces hacia viales cromatográficos

Apéndice C. Análisis estadístico en MATLAB

Apéndice C.1. Código fuente (Script)

```
datos=readtable("pyr.xlsx");
disp('---NORMALIDAD:16 HAP---')
for i = 3:18
    HAP=datos{:, i};
    nombre_HAP = char(datos.Properties.VariableNames(i));
  if isscalar(unique(HAP))
     fprintf('%s NO EVALUABLE (Todos los valores son %g, varianza 0)\n', nombre_HAP, HAP(1));
     continue;
    end
    [h, p] = swtest(HAP);
    if h == 0
        fprintf('%s ES NORMAL (p = %.4f)\n', nombre_HAP, p);
    else
        fprintf('%s NO ES NORMAL (p = %.4f)\n', nombre_HAP, p);
    end
end
disp('---CORRELACIÓN MO y HAP---')
MO=datos.MO;
Suma=datos.Suma;
[rho, p_spearman] = corr(MO, Suma, 'Type', 'Spearman');
fprintf('Coeficiente Rho de Spearman (r): %.4f\n', rho);
fprintf('Valor p de significancia: %.4f\n', p_spearman);
if p_spearman < 0.05
    disp('CONCLUSIÓN: SÍ HAY una correlación estadísticamente significativa.')
else
   disp('CONCLUSIÓN: NO HAY correlación significativa entre MO y HAP.')
end
disp('---CORRELACIÓN MO y Benzo[a]pireno---')
```

```
BaP=datos.Benzoapyrene;
[rho_bap, p_bap] = corr(MO, BaP, 'Type', 'Spearman');
fprintf('Coeficiente Rho de Spearman (r): %.4f\n', rho_bap);
fprintf('Valor p de significancia: %.4f\n', p_bap);
if p_bap < 0.05
    disp('CONCLUSIÓN: SÍ HAY una correlación estadísticamente significativa.')
else
    disp('CONCLUSIÓN: NO HAY correlación significativa entre MO y BaP.')
end

%% GRÁFICA DE DISPERSIÓN MO y HAP
figure('Color', 'w');
t = tiledlayout(2, 1, 'TileSpacing', 'none', 'Padding', 'compact');
ax1 = nexttile;
scatter(MO, Suma, 60, 'MarkerFaceColor', '#1a5974', 'MarkerEdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.5);
hold on;
coef = polyfit(MO, Suma, 1);
yfit = polyval(coef, MO);
plot(MO, yfit, '--', 'Color', [0.3 0.3 0.3], 'LineWidth', 1.5);
ylim([18000 19000]);
ax1.XAxis.Visible = 'off';
grid on; set(gca, 'GridLineStyle', ':', 'GridAlpha', 0.5);
set(gca, 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontSize', 11);
leyenda_texto = sprintf('\\it{r} \\rm= 0.3402 \n\\it{p} \\rm= 0.0456');
text(min(MO), 18800, leyenda_texto, 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontSize', 11, ...
   'BackgroundColor', 'white', 'EdgeColor', 'black', 'Margin', 5);
hold off;
ax2 = nexttile;
scatter(MO, Suma, 60, 'MarkerFaceColor', '#1a5974', 'MarkerEdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.5);
hold on;
plot(MO, yfit, '--', 'Color', [0.3 0.3 0.3], 'LineWidth', 1.5);
ylim([-100 2500]);
grid on; set(gca, 'GridLineStyle', ':', 'GridAlpha', 0.5);
set(gca, 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontSize', 11);
hold off;
xlabel(t, 'Materia Orgánica (% MO)', 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontWeight',
'bold', 'FontSize', 12);
ylabel(t, '\Sigma_{16} HAP (ng/g)', 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 12);
linkaxes([ax1 ax2], 'x');
```

Apéndice C.2. Salida de resultados (Output)

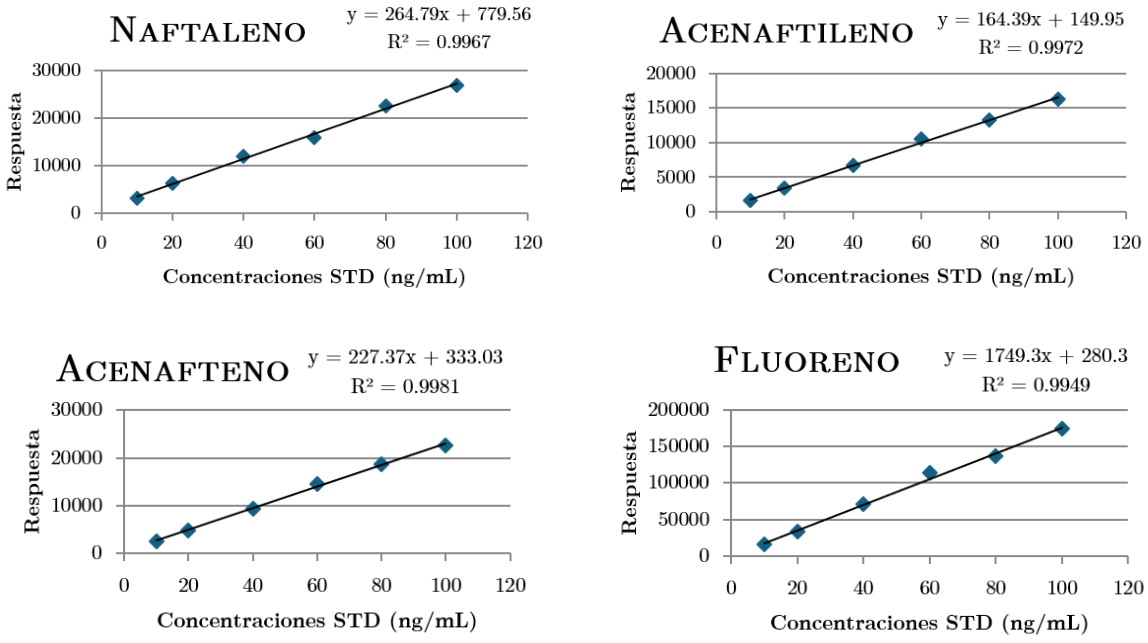
---NORMALIDAD:16 HAP---

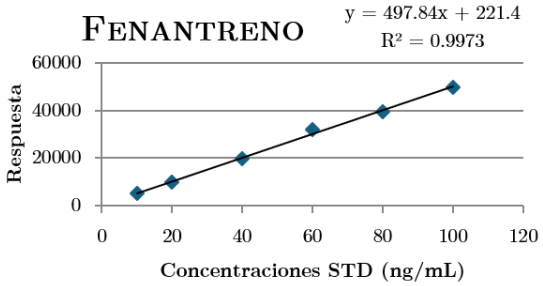
Naphtalene NO EVALUABLE (Todos los valores son 0, varianza 0)

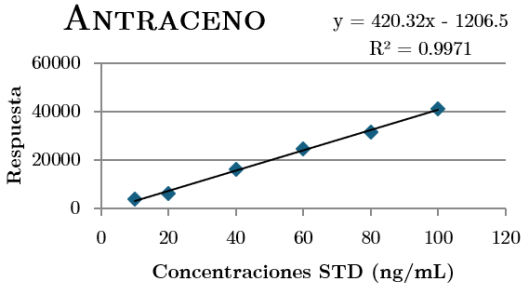
Acenaphthylene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Acenaphthene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Fluorene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Phenanthrene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Anthracene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Fluoranthene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Pyrene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Benzaanthracene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Chrysene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Benzobfluoranthene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Benzokfluoranthene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Benzoapyrene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Indeno123cdpyrene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Dibenzahanthracene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
Benzoghiperylene NO ES NORMAL (p = 0.0000)
---CORRELACIÓN MO vs HAP---
Coeficiente Rho de Spearman (r): 0.3402
Valor p de significancia: 0.0456
CONCLUSIÓN: SÍ HAY una correlación estadísticamente significativa.
---CORRELACIÓN MO vs Benzo[a]pireno---
Coeficiente Rho de Spearman (r): 0.3181
Valor p de significancia: 0.0625
CONCLUSIÓN: NO HAY correlación significativa entre MO y BaP.

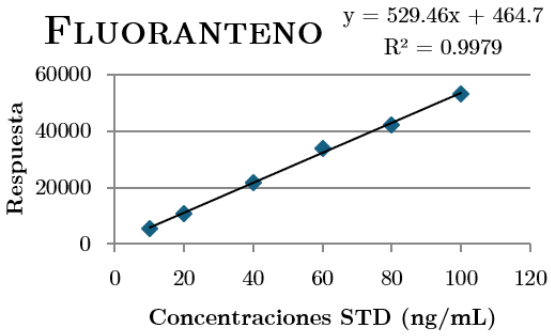
Apéndice D. Curva de calibración cromatográfica

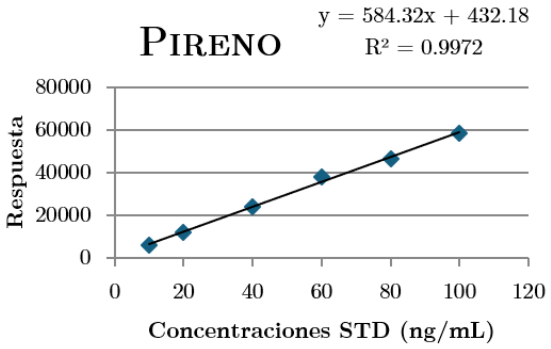
Tabla D.1. Regresión lineal para los 16 HAP prioritarios

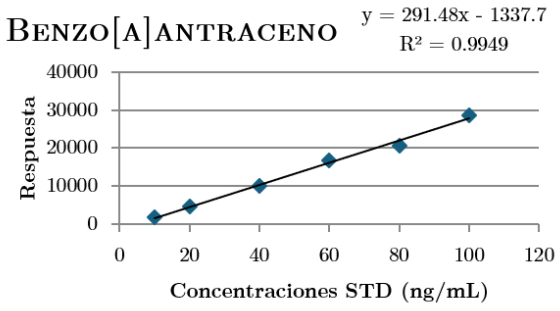


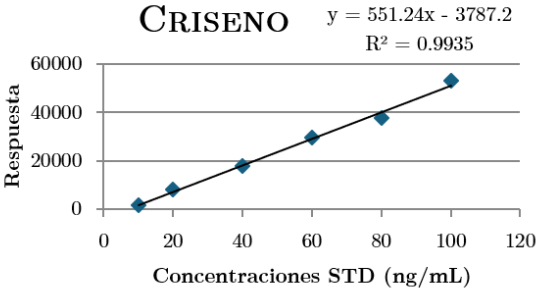

Fenantreno
y = 497.84x + 221.4
R² = 0.9973
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)

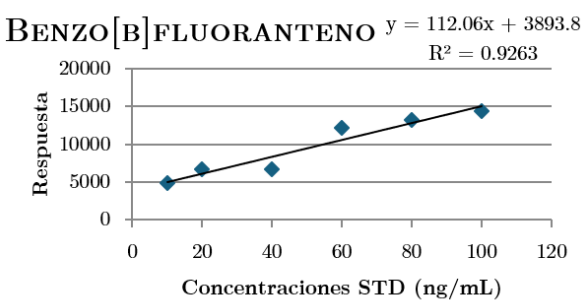

Antraceno
y = 420.32x - 1206.5
R² = 0.9971
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)

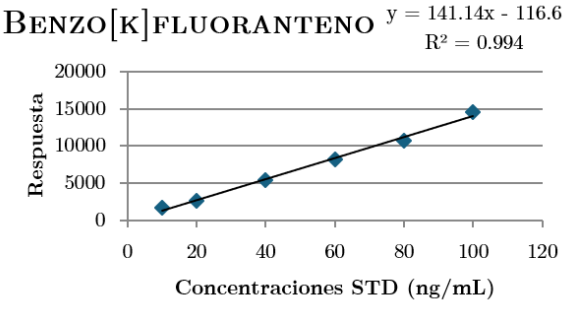

Fluoranteno
y = 529.46x + 464.7
R² = 0.9979
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)


Pireno
y = 584.32x + 432.18
R² = 0.9972
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)


Benzo[a]antraceno
y = 291.48x - 1337.7
R² = 0.9949
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)


Criseno
y = 551.24x - 3787.2
R² = 0.9935
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)


Benzo[b]fluoranteno
y = 112.06x + 3893.8
R² = 0.9263
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)


Benzo[k]fluoranteno
y = 141.14x - 116.6
R² = 0.994
Respuesta
Concentraciones STD (ng/mL)

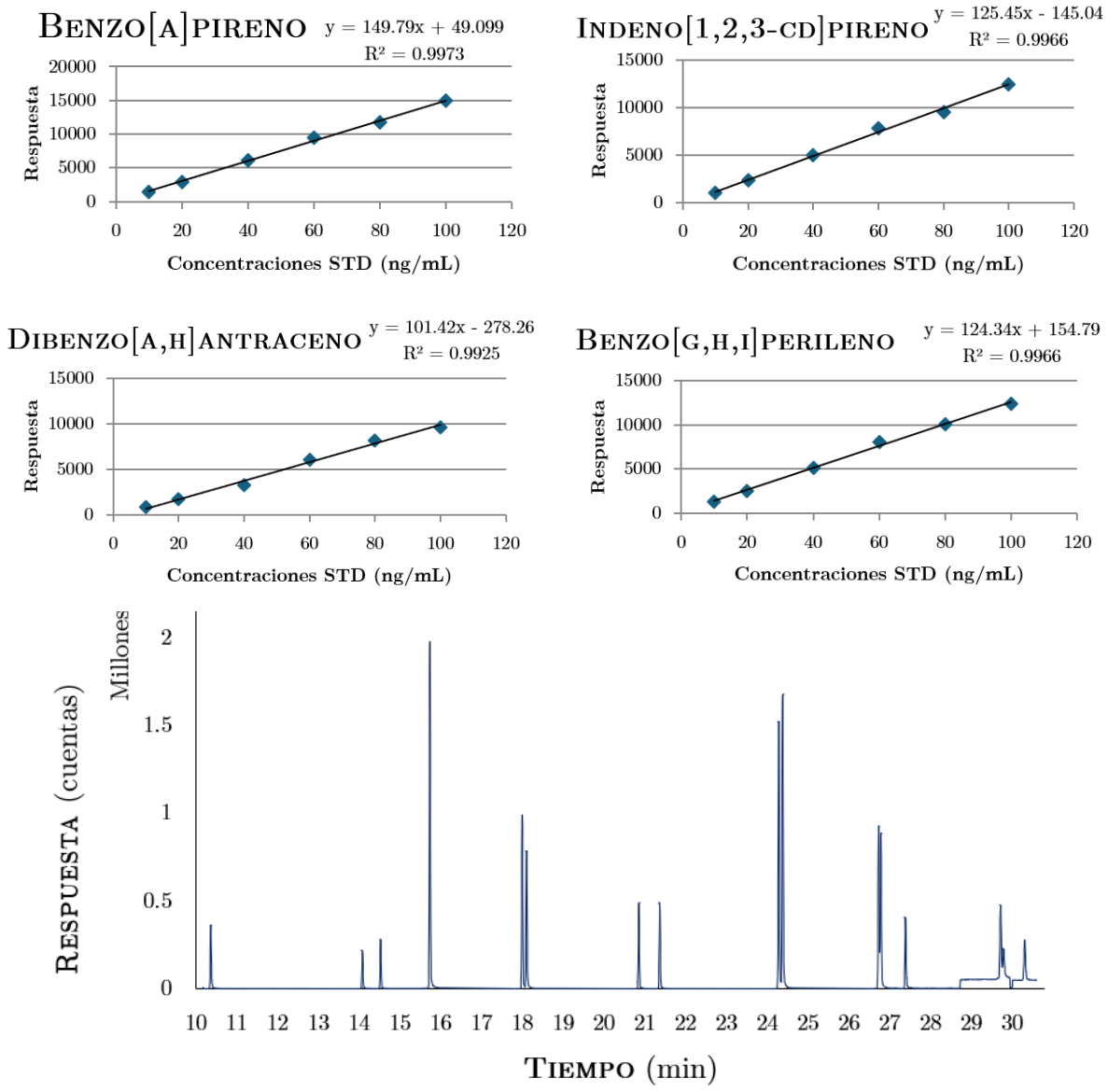


Figura D.1. Cromatograma representativo de la curva de calibración de la mezcla estándar de los 16 HAP (1000 ng/mL)

Apéndice E. Efectos TEL-PEL y ERL-ERM

Tabla E.1. Evaluación de la excedencia de los lineamientos de Guías de Calidad de Sedimentos TEL-PEL para los 16 HAP por sitio de muestreo

Sitio de Muestreo	**Nap**	**Acy**	**Ace**	**Fl**	**Phe**	**Ant**	**Fla**	**Pyr**	**BaA**	**Chr**	**BaP**	**DahA**
1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
2	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O
3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Sitio de Muestreo	Nap	Acy	Ace	Fl	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BaP	DahA
4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
6	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
7	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
8	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
9	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
11	R	R	R	R	R	O	R	R	R	R	O	O
12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
14	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
15	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F	O
16	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	O
17	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R	O	O
18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	O
19	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F	R
20	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
21	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
22	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
23	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
24	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
26	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
27	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
28	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R	F	O
29	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	O
30	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
31	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O
32	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
33	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
34	R	F	O	O	F	F	O	O	F	F	F	F
35	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Nota: Clasificación de Efectos: Raro (R), Ocasional (O) y Frecuente (F)

Tabla E.2. Evaluación de la excedencia de los lineamientos de Guías de Calidad de Sedimentos ERL-ERM para los 16 HAP por sitio de muestreo

Sitio de Muestreo	**Nap**	**Acy**	**Ace**	**Fl**	**Phe**	**Ant**	**Fla**	**Pyr**	**BaA**	**Chr**	**BaP**	**DahA**
1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
2	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
5	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
6	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
7	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
8	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
9	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
11	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
13	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
14	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
15	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
16	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
17	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
19	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
20	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
21	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
22	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
23	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R
24	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
26	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
27	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
28	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	F	O
29	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
30	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
31	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
32	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
33	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Sitio de Muestreo	Nap	Acy	Ace	Fl	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BaP	DahA
34	R	F	O	O	O	O	O	O	F	O	O	F
35	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Nota: Clasificación de Efectos: Raro (R), Ocasional (O) y Frecuente (F)

Apéndice F. Mortalidad oncológica

Tabla F.1. Matriz de correlación porcentual entre perfil ocupacional y sistema anatómico primario de mortalidad oncológica por municipio para 2024

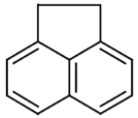
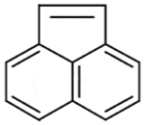
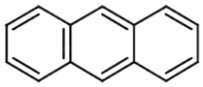
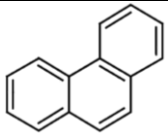
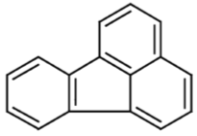
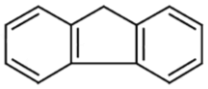
	Sitio anatómico del tumor maligno primario (%)					
Ocupación (%)	Sistema digestivo, hepático y oral	Sistema respiratorio e intratorácico	Sistema renal y vías urinarias	Tumores hormono-dependientes y del sistema reproductor	Hematológicos, dérmicos y otros	**Total (%)**
Hidalgotitlán						
Población jubilada	23.53	5.88	-	5.88	11.76	47.06
Sector agropecuario	17.65	5.88	-	0.00	5.88	29.41
Sector servicios y comercio	11.76	0.00	-	5.88	0.00	17.65
No especificado	0.00	0.00	-	0.00	5.88	5.88
Total (%)	**52.94**	11.76	-	11.76	23.53	100.00
Minatitlán						
Sector industrial	1.69	0.00	0.00	1.12	0.56	3.37
Población jubilada	**26.97**	2.81	1.12	17.98	8.43	57.30
Labores del hogar y población infantil	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.56
Sector agropecuario	2.81	0.56	0.56	2.25	1.69	7.87
Sector servicios y comercio	10.67	1.12	1.69	6.74	6.18	26.40
No especificado	2.25	0.00	0.56	1.12	0.56	4.49
Total (%)	**44.38**	4.49	3.93	29.21	17.98	100.00
Jáltipan						
Sector industrial	8.11	2.70	0.00	2.70	0.00	13.51
Población jubilada	5.41	0.00	2.70	8.11	5.41	21.62
Labores del hogar y población infantil	18.92	0.00	2.70	10.81	8.11	40.54
Sector agropecuario	0.00	2.70	0.00	0.00	0.00	2.70
Sector servicios y	8.11	0.00	0.00	5.41	2.70	16.22

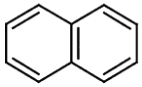
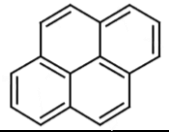
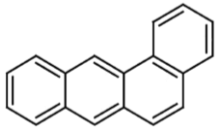
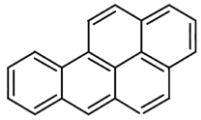
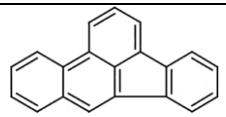
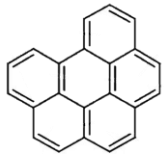
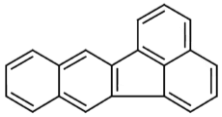
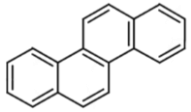
Ocupación (%)	Sitio anatómico del tumor maligno primario (%)					
	Sistema digestivo, hepático y oral	Sistema respiratorio e intratorácico	Sistema renal y vías urinarias	Tumores hormono-dependientes y del sistema reproductor	Hematológicos, dérmicos y otros	**Total** (%)
comercio						
No especificado	2.70	0.00	0.00	0.00	2.70	5.41
Total (%)	**43.24**	5.41	5.41	27.03	18.92	100.00
Cosoleacaque						
Sector industrial	4.50	2.70	1.80	0.90	0.00	9.91
Población jubilada	14.41	2.70	1.80	23.42	9.91	52.25
Labores del hogar y población infantil	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.90
Sector agropecuario	9.01	0.00	0.00	0.00	0.90	9.91
Sector servicios y comercio	10.81	0.90	2.70	3.60	3.60	21.62
No especificado	1.80	0.90	0.00	1.80	0.90	5.41
Total (%)	40.54	7.21	6.31	29.73	16.22	100.00
Coatzacoalcos						
Sector industrial	1.71	0.68	1.03	1.71	2.40	7.53
Población jubilada	20.89	3.42	2.40	21.58	7.53	55.82
Sector agropecuario	0.34	0.00	0.00	0.68	0.68	1.71
Sector servicios y comercio	10.27	2.05	2.74	7.19	5.82	28.08
No especificado	2.05	0.68	1.03	2.05	1.03	6.85
Total (%)	35.27	6.85	7.19	33.22	17.47	100.00

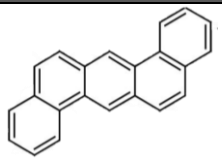
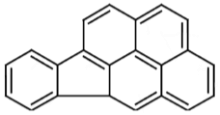
Anexos

Anexo A. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)

Tabla A.1. Propiedades fisicoquímicas y clasificación de la IARC de los 16 HAP prioritarios

Nombre	Fórmula	Estructura	Fase	PM	Peso molecular [g/mol]	Solubilidad en Agua [mg/L]	Punto de Fusión [°C]	Punto de Ebullición [°C]	Presión de Vapor [mmHg]	Log Kow	Log Koc	IARC
Acenafteno (Acy)	$C_{12}H_{10}$		Gas	***BPM***	154.21	3.8	95	96	4.4×10^{-3}	3.29	2.97	3
Acenaftileno (Ace)	$C_{12}H_8$		Gas		152.20	16.1	92-93	265 - 275	0.029	4.07	1.40	3
Antraceno (Ant)	$C_{14}H_{10}$		Partícula Gas		178.24	0.434	218	340 - 342	1.75×10^{-6}	4.45	4.15	3
Fenantreno (Phe)	$C_{14}H_{10}$		Partícula Gas		178.24	1.15	100	340	6.8×10^{-4}	4.45	4.15	3
Fluoranteno (Fla)	$C_{16}H_{10}$		Partícula Gas		202.26	0.26	110.8	375	5.0×10^{-6}	4.90	4.58	3
Fluoreno (Fl)	$C_{13}H_{10}$		Gas		166.22	1.9	116 -117	295	3.2×10^{-4}	4.18	3.86	3

Nombre	Fórmula	Estructura	Fase	PM	Peso molecular [g/mol]	Solubilidad en Agua [mg/L]	Punto de Fusión [°C]	Punto de Ebullición [°C]	Presión de Vapor [mmHg]	Log Kow	Log Koc	IARC
Naftaleno (Nap)	$C_{10}H_8$		Gas		128.17	31	80.26	218	0.087	3.29	2.97	2B
Pireno (Pyr)	$C_{16}H_{10}$		Partícula Gas		202.26	0.132	156	393 - 404	2.5×10^{-6}	4.88	4.58	3
Benzo[a] Antraceno (BaA)	$C_{20}H_{12}$		Partícula	***APM***	228.29	0.011	158	438	2.5×10^{-6}	5.61	5.30	2B
Benzo[a] Pireno (BaP)	$C_{20}H_{12}$		Partícula		252.32	0.0038	179 - 179.3	495	5.6×10^{-9}	6.06	6.74	1
Benzo[b] Fluoranteno (BbF)	$C_{20}H_{12}$		Partícula		252.32	0.0015	168.3	-	5.0×10^{-7}	6.04	5.74	2B
Benzo[ghi] Perileno (BghiP)	$C_{20}H_{14}$		Partícula		276.34	0.00026	273	550	1.03×10^{-10}	6.50	6.20	3
Benzo[k] Fluoranteno (BkF)	$C_{20}H_{12}$		Partícula		252.32	0.0008	215.7	480	9.59×10^{-11}	6.06	5.74	2B
Criseno (Chr)	$C_{18}H_{12}$		Partícula		228.29	0.0015	254	448	6.4×10^{-9}	5.9	-	2B

Nombre	Fórmula	Estructura	Fase	PM	Peso molecular [g/mol]	Solubilidad en Agua [mg/L]	Punto de Fusión [°C]	Punto de Ebullición [°C]	Presión de Vapor [mmHg]	Log Kow	Log Koc	IARC
Dibenzo[ah] Antraceno (DahA)	$C_{22}H_{14}$		Partícula		278.35	0.0005	262	-	$1x10^{-10}$	6.84	6.52	2A
Ideno [1,2,3-cd] Pireno (InP)	$C_{22}H_{12}$		Partícula		276.34	0.062	163.6	530	10^{-10} - 10^{-16}	6.58	6.20	2B

Adaptado de [7, 27, 40, 42, 217]

Nota: Clasificación IARC: **1**, carcinógeno para los humanos; **2A**, probablemente carcinógeno para los humanos; **2B**, posiblemente carcinógeno para los humanos; **3**, no clasificable en cuanto a su carcinogenicidad para los humanos. Clasificación de los HAP por peso molecular (PM): alto (APM) y bajo (BPM).

Tabla A.2. Valores de referencia para la evaluación del riesgo eco toxicológico por HAP en sedimentos

	Nap	Acy	Ace	Fl	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	InP	DahA	BghiP
ERM	2100	640	500	540	1500	1100	5100	2600	1600	2800	-	-	1600	-	260	-
ERL	160	44	16	19	240	85	600	665	261	384	-	-	430	-	63	-
TEL	34.57	5.87	6.71	21.17	86.68	46.85	112.82	152.66	74.83	107.77	-	-	88.81	-	6.22	-
PEL	390.64	127.87	88.90	144.35	543.53	245.00	1493.54	1397.60	692.53	845.98	-	-	763.22	-	134.61	-
MPCi	0.16	0.17	0.97	0.83	0.78	0.05	4.11	1.67	0.35	1.64	0.79	0.79	0.49	0.38	0.18	0.049
TEFi	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.1	0.01	0.1	0.1	1.0	0.1	5.0	0.01

Basado en [104–107]

Nota: **ERL** (Rango de Efecto Bajo); **ERM** (Rango de Efecto Medio); **TEL** (Nivel de Efecto Umbral); **PEL** (Nivel de Efecto Probable); MPCi (Concentración máxima permisible para el compuesto i); **TEFi** (Factor de equivalencia tóxica relativo al Benzo[a]pireno); **Nap** (Naftaleno), **Acy** (Acenaftileno), **Ace** (Acenafteno), **Fl** (Fluoreno), **Phe** (Fenantreno), **Ant** (Antraceno), **Fla** (Fluoranteno), **Pyr** (Pireno), **BaA** (Benzo[a]antraceno), **Chr** (Criseno), **BbF** (Benzo[b]fluoranteno), **BkF** (Benzo[k]fluoranteno), **BaP** (Benzo[a]pireno), **InP** (Indeno[1,2,3-cd]pireno), **DahA** (Dibenzo[a,h]antraceno), **BghiP** (Benzo[g,h,i]perileno). Unidades: Los valores correspondientes a los criterios **ERL**, **ERM**, **TEL** y **PEL** están expresados en **ng/g**. Los valores de **MPCi** están expresados en **mg/kg**. Los factores **TEFi** son valores **adimensionales**.