

Pech, D., Arcega-Cabrera, F., Hernández-Ávila, I., Paz-Rios, C.E. 2025. Asociación entre la Macrofauna Bentónica y los Contaminantes Sedimentarios en la Plataforma Continental de Yucatán, p. 203-214. En: J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202509.

Asociación entre la Macrofauna Bentónica y los Contaminantes Sedimentarios en la Plataforma Continental de Yucatán

*D. Pech¹, F. Arcega-Cabrera²,
I. Hernández-Ávila³, C.E. Paz-Rios⁴*

¹Laboratorio de Biodiversidad Marina y Cambio Climático
El Colegio de la Frontera Sur

²Facultad de Química. Unidad de Química Sisal
Universidad Nacional Autónoma de México

³Facultad de Ciencias Naturales
Universidad Autónoma del Carmen

⁴Instituto EPOMEX
Universidad Autónoma de Campeche

Resumen

En este estudio se analiza la posible asociación de la composición de especies de macrofauna bentónica con la concentración de hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales detectados en los sedimentos de la plataforma continental de Yucatán (PCY), México. El objetivo principal es proporcionar información sobre los cambios temporales y espaciales de dicha asociación en función del gradiente longitudinal y de profundidad. La composición de especies bentónicas y las concentraciones de Al, Ni y Pb mostraron diferencias significativas entre las subregiones de la PCY (Caribe occidental, centro de Yucatán y oeste de Yucatán), y la profundidad. Los hidrocarburos alifáticos y aromáticos presentaron concentraciones similares en todas las subregiones. La composición de especies estaba significativamente asociada con los niveles de hidrocarburos alifáticos en los sitios someros (15–50 m) de las subregiones de la PCY. Nuestros resultados proporcionan las primeras percepciones sobre la presencia y tendencias espaciales de diferentes concentraciones de hidrocarburos y metales de origen no puntual a lo largo de la PCY, esenciales para establecer la condición ecológica actual y establecer una condición de referencia para identificar futuros cambios.

Palabras clave: macrofauna, contaminantes, hidrocarburos aromáticos policíclicos, Yucatán.

Abstract

This study examines the possible correlation between the composition of benthic macrofauna species and the levels of aliphatic hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and metals found in the sediments of the continental shelf of Yucatan (CSY), Mexico. The main goal is to provide information about how this correlation changes over time and space based on longitudinal and depth gradients. The composition of benthic species and the concentrations of Al, Ni, and Pb differed significantly between the sub-regions of the CSY (Western Caribbean, Central Yucatan, and Western Yucatan), as well as with depth. Aliphatic and aromatic hydrocarbons showed similar concentrations in all sub-regions. The species composition was notably linked to aliphatic hydrocarbon levels at shallow sites (15–50 m) within the CSY sub-regions. Our findings offer initial insights into the presence and spatial patterns of varying concentrations of non-point source hydrocarbons and metals along the CSY, which are crucial for understanding the current ecological condition and establishing a reference point for identifying future changes.

Keywords: Macrofauna, Pollutants, Polycyclic aromatic hydrocarbons, Yucatan

Introducción

En el contexto mundial actual, donde la contaminación marina se ha convertido en un grave problema ambiental, resulta crítico intensificar los esfuerzos para monitorear los contaminantes y sus fuentes, con el fin de proporcionar nuevas evidencias sobre la interacción entre dichos contaminantes y los invertebrados bentónicos. El impacto de los contaminantes en sedimentos sobre la fauna marina bentónica ha sido ampliamente explorado (Archambault *et al.*, 2010; Ryu *et al.*, 2011) desde el enfoque de la búsqueda de respuestas biológicas al estrés (O'Brien & Keough, 2013) hasta la respuesta ecológica a escala de la comunidad (Brown *et al.*, 2000), mostrando efectos inducidos por contaminantes. Establecer los patrones de respuesta ambiental frente a contaminantes ha sido una constante en estudios que tratan de evaluar el estado de salud ecológica de los ambientes marinos.

La plataforma continental de Yucatán ha sido una de las áreas geográficas en el golfo de México que ha sido objeto de estudios en los últimos 10 años para establecer un estado de referencia biológico y ecológico. En contraste con las regiones adyacentes como la plataforma de en el eje Tabasco-Ciudad del Carmen-Campeche, donde se realizan la mayoría de las actividades de extracción y procesamiento de petróleo al sur del golfo de México, en la plataforma de Yucatán no se llevan a cabo actividades relacionadas con la industria petrolera. Sin embargo, diversos contaminantes químicos, probablemente relacionados con el transporte y almacenamiento de hidrocarburos, han sido detectados principalmente a lo largo de la

zona costera de la península de Yucatán, y en algunos casos se han asociado con la estructura y funcionamiento de diversas poblaciones o comunidades marinas. Un escrutinio de contaminantes no puntuales en la zona costera de la península de Yucatán muestra la presencia de hidrocarburos alifáticos (HA) e hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) de bajo y alto peso molecular. Específicamente, estos contaminantes fueron encontrados dentro de las cuatro principales lagunas costeras y se sabe que afectan las abundancias de peces y sus parásitos (Pech *et al.*, 2009), y las características de la comunidad de la fauna bentónica (Kuk *et al.*, 2012). La presencia de PAH no puntuales y contaminantes orgánicos persistentes (COP) también ha sido detectada en huevos de tortugas Carey que anidan en las playas arenosas de la PCY (Muñoz & Vermeiren, 2018). Hallazgos recientes sugieren que los hábitats litorales de fondo blando en la península de Yucatán presentan bajos niveles de contaminación (Santibañez *et al.*, 2020). Sin embargo, mediciones de referencia de contaminantes químicos registradas en aguas frente a la costa de Yucatán de 2015 a 2016 muestran la presencia de una concentración relativamente alta de naftaleno, benzo[a]pireno e hidrocarburos policíclicos aromáticos en la bilis de peces (Pulster *et al.*, 2020). Además, la evaluación indirecta de la vulnerabilidad de las comunidades bentónicas frente a múltiples factores estresantes muestra que los contaminantes petroleros procedentes del tráfico marítimo (incluido el transporte de petróleo), que a menudo resultan en derrames frecuentes a pequeña

escala, es uno de los principales factores estresantes que causan una alta vulnerabilidad en la plataforma de la península de Yucatán (Ocaña *et al.*, 2019).

De 2015 a 2017 se llevaron a cabo una serie de tres campañas oceanográficas para establecer una línea de base ecológica y biológica de la península de Yucatán. Los resultados sobre la abundancia y composición de especies de macrofauna de estas campañas muestran una estructura general compuesta por tres ensamblajes principales en función del gradiente longitudinal asociado con las características sedimentarias e hidrográficas de la región (Hernandez *et al.*, 2020). En el presente estudio utilizamos se analizan

las tendencias espaciales de la posible asociación entre la abundancia de especies de los ensamblajes de macrofauna bentónica y las concentraciones de hidrocarburos sedimentarios y contaminantes metálicos de origen no puntual, bajo la hipótesis de que dicha asociación cambia en función del gradiente longitudinal y de profundidad de la península de Yucatán. El objetivo principal es proporcionar percepciones sobre los cambios temporales y espaciales de dicha asociación en función del gradiente longitudinal y de profundidad. Se presenta este trabajo para fomentar la divulgación de hallazgos previos publicados por los autores (Pech *et al.*, 2022).

Materiales y métodos

La plataforma continental de la península de Yucatán, ubicada al sur del golfo de México, es una plataforma amplia de constituida principalmente por carbonato de calcio con un área de aproximadamente 57 000 km² que alberga una variedad de ecosistemas como cayos, bancos, islas, arrecifes de coral, lagunas costeras y manglares, entre otros. En el área de estudio se recolectaron muestras de sedimentos en tres expediciones oceanográficas (2015, 2016, 2017). En cada expedición, se muestrearon 83 puntos de muestreo distribuidos en 16 transeptos a lo largo del gradiente de profundidad y longitudinal de la plataforma de la península de Yucatán (figura 1). El gradiente de profundidad incluye un estrato somero (15-50 m), medio (50-100 m) y profundo (> 100m hasta el borde de la plataforma, ~200 m). Las muestras de sedimentos se recolectaron utilizando

un muestreador de agarre Smith McIntyre de 0.25 m². Tres submuestras en los primeros 10 cm de profundidad, obtenidas con núcleos de PVC de 5 cm de diámetro para la caracterización de la macrofauna. Además, se recolectó una submuestra de sedimento para la caracterización de la textura (Bouyoucos, 1962) y el contenido de carbono orgánico (Gaudette & Wilson, 1974). Otras dos submuestras de sedimento dentro de los primeros 5 cm de profundidad se recolectaron para el análisis de hidrocarburos y metales.

Las muestras para macrofauna fueron narcotizadas utilizando una solución de cloruro de magnesio al 15 % durante 15 minutos, y se fijaron una solución de formaldehído al 4% buferada, hasta su procesamiento en el laboratorio. Para obtener la macrofauna las muestras de sedimento fueron tamizadas utilizando un tamiz de 500 µm y se colec-

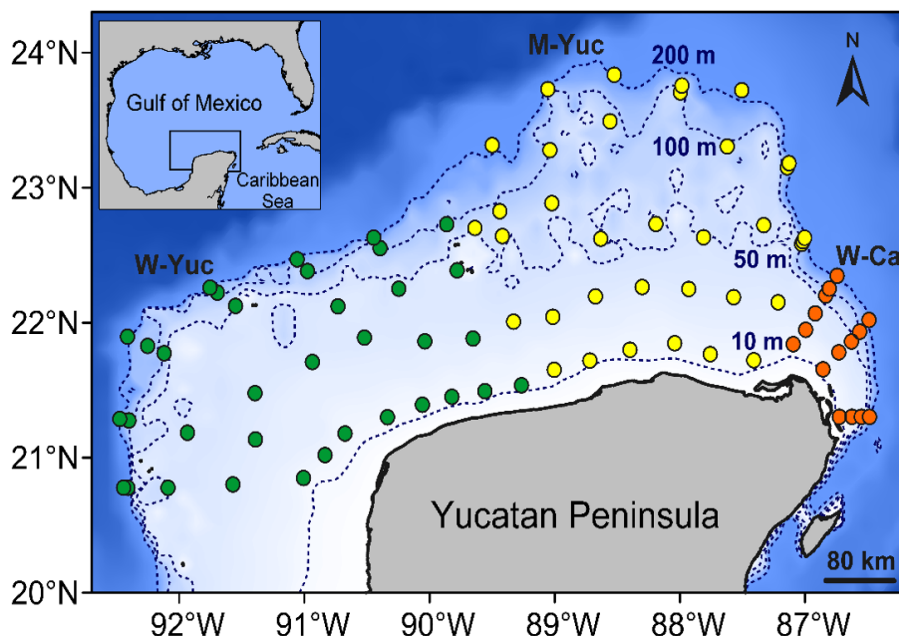


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo en la plataforma continental de Yucatán. Puntos verdes indican estaciones al Oeste de Yucatán, amarillos indican Yucatán central, rojos indican Caribe occidental.

taron todos los organismos retenidos. La macrofauna retenida en el tamiz se conservó en una solución de etanol al 70 %. Los organismos de la macrofauna se contaron e identificaron hasta la categoría taxonómica inferior posible (a nivel de especie en la mayoría de los casos).

La determinación de hidrocarburos se realizó mediante cromatografía de columna. Brevemente, para la fracción alifática se utilizó una elución de muestra con hexano TEDIA grado GC (15 mL) y para los PAH, se utilizó la segunda fracción 50:50 v/v de hexano TEDIA grado GC y diclorometano TEDIA grado GC (15 mL). La fracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) se identificó y cuantificó utilizando un cromatógrafo de gases Clarus 500 Perkin Elmer

acoplado a un detector de espectrometría de masas equipado con un DB5-MS de 0.25 mm de espesor. Las muestras se analizaron utilizando el método de barrido completo y el método de selección de iones (Wang *et al.*, 1994). La cuantificación de metales (Cd, Ni, V y Pb) se realizó utilizando el ICP-MS ICAP Q de Thermo Scientific y los iones V51, Ni60, Cd 112 y Pb208 Multielemental. Se utilizó el método EPA 3052 para digerir las muestras. Todos los análisis de sedimentos se realizaron utilizando métodos de control de calidad y aseguramiento de la calidad (QA/QC), límites de detección y material de referencia certificado según Herguera *et al.* (2017) y Herzka *et al.* (2017).

Todos los análisis de datos se realizaron utilizando la regionalización de la platafor-

ma continental de la península de Yucatán de acuerdo con los cambios en la composición de la macrofauna bentónica previamente identificados en la literatura (Hernandez *et al.*, 2020; Paz *et al.*, 2020), que se dividió en el oeste de Yucatán (O-Yuc), Yucatán central (C-Yuc) y Caribe Occidental (Ca-O) (figura 1).

Se puso a prueba la hipótesis de no diferencias en los valores de hidrocarburos y metales utilizando un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal–Wallis en función de las subregiones de la plataforma continental de Yucatán. Se aplicó un análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA) para determinar si existen diferencias significativas entre zonas de profundidad, subregiones y años de muestreo, utilizando 9999

permutaciones de residuales en un modelo reducido. Las comparaciones entre pares de niveles para cada factor se probaron utilizando una prueba *t*. La significancia de la correlación entre la composición de especies y las variables ambientales y contaminantes se estimó utilizando el análisis estadístico de Bio-Env (BEST) con 999 permutaciones. El análisis BEST se realizó por separado para cada subregión. Se analizaron y representaron las correlaciones significativas utilizando los análisis canónicos de coordenadas principales (CAP) para identificar la magnitud y la dirección de dicha correlación en función de las zonas de profundidad. Las primeras correlaciones canónicas al cuadrado (Δ^2) también se probaron utilizando 999 permutaciones.

Resultados y discusión

Los valores promedio de oxígeno disuelto (DO), carbono orgánico (OC) y el porcentaje de contenido de arena media (tamaño de grano de 0.35–0.5 mm) tuvieron valores significativamente más altos en la subregión del Ca-O.

El porcentaje de contenido de arena muy fina (tamaño de grano de 0.07–0.12 mm) fue significativamente más alto en la subregión de O-Yuc. No se observaron diferencias significativas en el resto de las variables medidas (tabla 1). Se detectaron un total de 58 hidrocarburos (33 alifáticos y 25 hidrocarburos aromáticos policíclicos) y cinco metales (V, Ni, Cd, Pb y Al) en los sedimentos de la plataforma continental de la península de Yucatán. La descripción específica de estos se publicará posteriormente.

Los valores promedio del total de hidrocarburos alifáticos (figura 2a) y policíclicos

aromáticos (figura 2b) no mostraron cambios significativos entre las tres subregiones. No se detectaron concentraciones que excedieran los límites de toxicidad aguda y crónica (Berry *et al.*, 2003) de las fracciones de hidrocarburos en ninguno de los grupos. Entre los metales, la concentración promedio de Vanadio (figura 2c) y Cadmio (figura 2e) no mostró cambios significativos en función de las subregiones. La concentración promedio de Aluminio (2d) fue significativamente más alta en la subregión de O-Yuc, de manera similar Plomo (figura 2f) y Nickel (figura 2g) exhibieron valores significativamente más altos en la subregión de O-Yuc.

Se observaron cambios significativos en la composición y abundancia de especies de macrofauna en función de la profundidad, el año de muestreo y la subregión (tabla 2).

Tabla 1. Variables físico-químicas entre de las tres regiones de la plataforma continental de Yucatán. Valores se expresan en mediana y intervalo, entre paréntesis. *Prueba K-W entre regiones ($p < 0.05$).

	W-Yuc	M-Yuc	W-Ca
Temperatura, °C	25 (11.3-29.7)	24.1 (16.1-28.5)	25 (18.9-30)
*Oxígeno disuelto, mg L ⁻¹	3.63 (0.2-6.5)	3.77 (1.4-7.4)	3.99 (1.5-7.6)
pH	5 (3.5-8.6)	8.2 (0.4-8.7)	4.7 (3.3-8.1)
Redox, mV	1916.7 (-156-1760)	1388.2 (-152-1236)	1091 (-167-924)
*Carbono orgánico, %	1 (0.4-1.9)	1.2 (0.6-1.8)	1.5 (1-2)
Grava, %	2.3 (0-33)	3 (0.2-46)	3.1 (0.2-21)
*Arena media, %	17.1 (1.2-44.6)	22.2 (1.8-67.4)	32.1 (4.5-71)
Arena fina, %	54.3 (13.8-84)	53 (10.5-89.1)	21.4 (8.6-93.1)
*Arena muy fina, %	21.4 (2.6-83.3)	15.5 (0.2-78.4)	1.4 (0.1-32)

Estos resultados confirmaron la presencia de tres ensamblajes principales de especies de macrofauna que ocurren cada año durante los períodos de muestreo a lo largo del gradiente geográfico longitudinal que fueron influenciados por el gradiente de profundidad. La descripción detallada de las tendencias espaciales y temporales de la composición y abundancia de especies se exploró previamente en Hernández *et al.* (2020).

El análisis BEST detectó correlaciones significativas entre la abundancia de especies de macrofauna y los datos ambientales, incluida la presencia de contaminantes en cada una de las subregiones (figura 3). En la subregión de O-Yuc, la abundancia de especies estuvo significativamente correlacionada con la combinación de Oxígeno disuelto, grava, Total de Alifáticos y profundidad

(BEST $\rho = 0.369$, $p = 0.001$). En Yuc-C se observó una correlación significativa con la combinación de pH, Carbono orgánico, grava, arena fina, Total de Alifáticos y profundidad (BEST $\rho = 0.283$, $p = 0.001$). En Ca-O, la correlación significativa fue con la combinación de Carbono orgánico, arenas medianas, hidrocarburos alifáticos y profundidad (BEST $\rho = 0.236$, $p = 0.03$).

Una correlación significativa entre la composición de especies y la concentración total de alifáticos, las características del sedimento y la profundidad fue constante entre las tres subregiones. La presencia de hidrocarburos alifáticos ha sido detectada previamente en los ecosistemas de lagunas costeras y aguas someras de la plataforma continental de Yucatán (Pech *et al.*, 2009), pero no se detectó una correlación significativa con

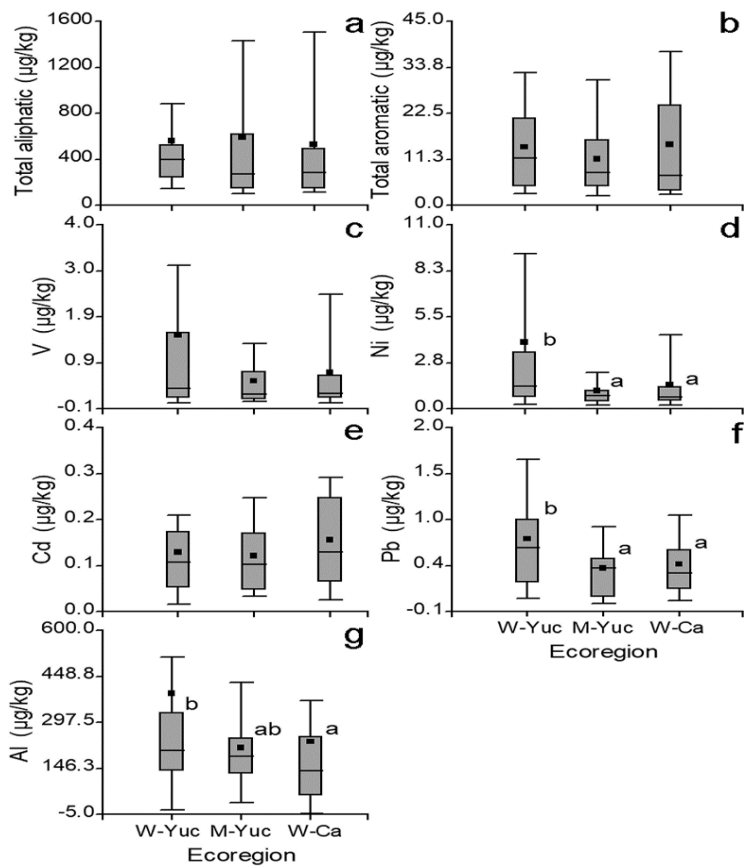


Figura 2. Distribución de concentración de contaminantes en relación a las regiones en la plataforma continental de Yucatán. Las letras indican grupos homogéneos ($\alpha = 0.05$). W-Yuc, Oeste Yucatán, M-Yuc, Yucatán Centro, W-Ca, Caribe Oeste.

Tabla 2. Análisis multivariado permutado (PERMANOVA) de la composición de especies de la macrofauna en la plataforma continental de Yucatán bajo un modelo de dos factores ortogonales con profundidad (P) como covariable.					
Source	df	MS	F	P(perm)	√CV
Profundidad (P)	1	75845	21.617	0.001	11.148
Año (A)	2	18031	5.1393	0.001	8.7748
Region (R)	2	14436	4.1145	0.001	7.7217
P x A	2	7033.1	2.0046	0.001	4.4756
P x R	2	9152	2.6085	0.001	5.7558
A x R	4	10274	2.9282	0.001	10.772
P x A x R	4	6590	1.8783	0.001	8.1588
Residuales	564	3508.5			59.233
Total	581				

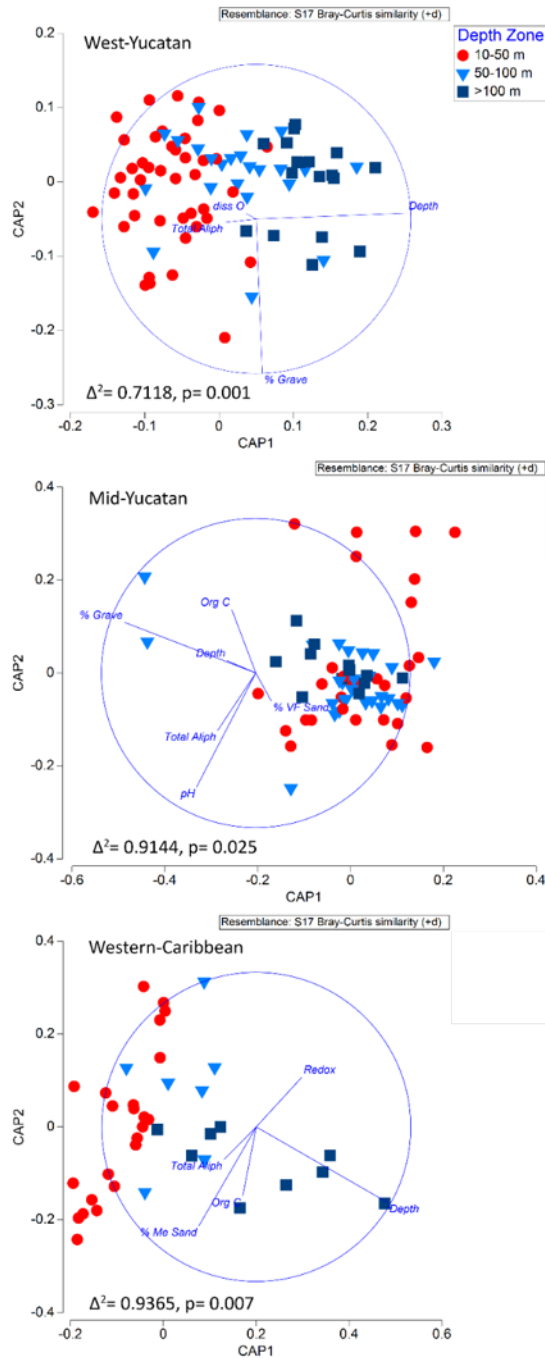


Figura 3. Análisis canónico de coordenadas principales (CAP) de la composición de especies de la macrofauna en las tres regiones de la plataforma continental de Yucatán. Variables ambientales fueron añadidas acorde con el análisis BEST. Se muestran las correlaciones canónicas (Δ^2) y los p-value. Colores de acuerdo con la profundidad.

la macrofauna u otros grupos taxonómicos (es decir, peces y parásitos), aunque se superaron los límites de toxicidad en tres de las cuatro lagunas costeras examinadas. Aquí observamos una asociación espacial significativa entre los hidrocarburos alifáticos y la macrofauna en sitios de muestreo someros (15–50 m de profundidad) cerca de la costa de las subregiones, aunque las concentraciones estaban por debajo de los límites de toxicidad. Además, se detectó la concentración de Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos en todos los puntos de muestreo de todas las expediciones oceanográficas, pero no hubo diferencias significativas en los valores de concentración total. Esto sugiere la probabilidad de una distribución homogénea sin una influencia evidente en la abundancia de especies de macrofauna bentónica, como se sugirió previamente para los hábitats de fondo blando en la parte occidental de la plataforma de Yucatán (Santibañez *et al.*, 2020).

La presencia de metales, hasta ahora, parece no afectar la distribución de la abun-

dancia de especies de macrofauna, dado que no se observó correlación en ninguna de las subregiones de la plataforma continental de Yucatán. Hay varios ejemplos en la literatura que muestran un efecto tóxico de los metales en especies específicas de macrofauna, especialmente en aguas someras (Kuklin & Matafonov, 2014). Sin embargo, al evaluar su efecto potencial en las características de la comunidad ecológica (es decir, abundancia, riqueza, diversidad, uniformidad) en hábitats marinos, no se observó una relación significativa (Wu *et al.*, 2014).

Esto no significa que la presencia recurrente de metales no esté afectando sus características, al menos en un ambiente kárstico como la plataforma continental de Yucatán. La alta dinámica en el recambio de especies, que ocurre en cada período estacional (lluvia, seco y tormentas frontales de invierno “nortes”) dentro de un ciclo anual en la región (Pech *et al.*, 2007; Paz *et al.*, 2020) probablemente impide la detección de posibles asociaciones con metales.

Conclusiones

Los resultados de este estudio proporcionan estimaciones sobre la presencia y tendencias espaciales de diferentes concentraciones de hidrocarburos y metales de origen no puntual a lo largo de la plataforma continental de Yucatán. A pesar de su presencia, solo la concentración de hidrocarburos alifáticos mostró una asociación significativa con la abundancia de especies de macrofauna en todas las subregiones del área de estudio. Aunque la fuente de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales aún no se ha iden-

tificado, su presencia en los sedimentos a lo largo de la profundidad (de 15 a 200 m) y el gradiente longitudinal de la PCV representa información importante para establecer una línea de base para la condición ecológica en los ambientes de fondo que deben ser estudiados para identificar cambios futuros. Este resultado destaca la necesidad de generar mejores indicadores para monitorear la calidad del hábitat del fondo y los contaminantes asociados con la información a nivel de comunidad bentónica. Esto ayudaría a

establecer una condición de referencia ambiental integrada en el fondo que permitiría cuantificar futuros cambios en el área,

especialmente aquellos relacionados con la extracción de petróleo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y la Secretaría de Energía – Fondo Sectorial CONAHCYT – Secretaría de Energía – Proyecto Hidrocarburos

201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM). Los autores agradecen a V. Ceja Moreno por su contribución con los análisis de hidrocarburos y metales.

Literatura citada

- Archaimbault V., Usseglio-Polatera P., Garric J., Wasson, J. G., & Babut, M. (2010). Assessing pollution of toxic sediment in streams using bio-ecological traits of benthic macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 55(7), 1430-1446.
- Berry W. J., Burgess R. M., Hansen D. J. (2003). Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: PAH Mixtures. Environ Prot Agency
- Bouyoucos G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54 (5), 464-465
- Brown S. S., Gaston G. R., Rakocinski C. F., Heard R. W. (2000). Effects of sediment contaminants and environmental gradients on microbenthic community trophic structure in Gulf of Mexico estuaries. *Estuaries and Coast*, 23 (3), 411-424.
- Gaudette, H. E., Flight, W. R., Toner, L., & Folger, D. W. (1974). An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1), 249-253.
- Herguera, J. C., Hernández-Ayón, J. M., Camacho-Ibar, V., Delgadillo-Hinojosa, F., Huerta, M. A., & Herrera-Silveira, J. (2017). Manual de procedimientos de muestreos durante los cruceros oceanográficos y resultados de procesos de intercalibración y control de calidad de los laboratorios analíticos. Metodología analítica y procesos de intercalibración y control de calidad de los laboratorios analíticos. Consorcio de investigación del Golfo de México. Documento en gdocs disponible en <https://goo.gl/GzNnFs>.
- Hernandez-Avila I., Ocaña F. A., Pech D. (2020). Testing marine regional-scale hypotheses along the Yucatan continental shelf using soft-bottom macrofauna. *PeerJ*, 8, e8227
- Herzka, S. Z., Aguilar-Trujillo, A., Alexander, H., Balta, P., Arteaga, M. C., & Bazan, C. (2017). Manual de protocolos de muestreo y procesamiento de muestras durante cruceros oceanográficos; Línea de acción 2: Línea base y monitoreo ambiental. Consorcio de investigación del Golfo de México. Documento en gdocs disponible en <https://goo.gl/ju5YdN>.
- Kuk-Dzul, J. G., Gold-Bouchot, G., & Ardisson, P. L. (2012). Benthic infauna variability in relation to environmental factors and organic pollutants in tropical coastal lagoons from the northern Yucatan Peninsula. *Marine Pollution Bulletin*, 64(12), 2725-2733.
- Kuklin, A. P., & Matafonov, P. V. (2014). Background concentrations of heavy metals in

- benthos from transboundary rivers of the Transbaikalia region, Russia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92, 137-142.
- Muñoz, C. C., & Vermeiren, P. (2018). Profiles of environmental contaminants in hawksbill turtle egg yolks reflect local to distant pollution sources among nesting beaches in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Marine Environmental Research*, 135, 43-54.
- O'Brien, A. L., & Keough, M. J. (2013). Detecting benthic community responses to pollution in estuaries: A field mesocosm approach. *Environmental Pollution*, 175, 45-55.
- Ocaña, F. A., Pech, D., Simões, N., & Hernández-Ávila, I. (2019). Spatial assessment of the vulnerability of benthic communities to multiple stressors in the Yucatan Continental Shelf, Gulf of Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 181, 104900.
- Paz-Ríos, C. E., Pech, D., Mariño-Tapia, I., & Simões, N. (2020). Influence of bottom environment conditions and hydrographic variability on spatiotemporal trends of macrofaunal amphipods on the Yucatan continental shelf. *Continental Shelf Research*, 198, 104098.
- Pech, D., Ardisson, P. L., & Hernández-Guevara, N. A. (2007). Benthic community response to habitat variation: a case of study from a natural protected area, the Celestun coastal lagoon. *Continental Shelf Research*, 27(20), 2523-2533.
- Pech, D., Arcega-Cabrera, F., Hernández-Avila, I., & Paz-Ríos, C. E. (2022). Spatial trends of the potential association between benthic macrofauna and non-source point sediment pollutants in the Yucatán Continental Shelf. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1-6.
- Pech, D., Vidal-Martínez, V. M., Aguirre-Macedo, M. L., Gold-Bouchot, G., Herrera-Silveira, J., Zapata-Pérez, O., & Marcogliese, D. J. (2009). The checkered puffer (*Spheeroides testudineus*) and its helminths as bio-indicators of chemical pollution in Yucatan coastal lagoons. *Science of the Total Environment*, 407(7), 2315-2324.
- Pulster, E. L., Gracia, A., Armenteros, M., Toro-Farmer, G., Snyder, S. M., Carr, B. E., ... & Murawski, S. A. (2020). A first comprehensive baseline of hydrocarbon pollution in Gulf of Mexico fishes. *Scientific Reports*, 10(1), 6437.
- Ryu, J., Khim, J. S., Kang, S. G., Kang, D., Lee, C. H., & Koh, C. H. (2011). The impact of heavy metal pollution gradients in sediments on benthic macrofauna at population and community levels. *Environmental Pollution*, 159(10), 2622-2629.
- Santibañez-Aguascalientes, N. A., Borja, Á., Montero-Muñoz, J. L., Herrera-Dorantes, M. T., & Ardisson, P. L. (2020). Setting reference conditions to assess the ecological status of the sublittoral and bathyal benthic communities of the southern Gulf of Mexico. *Ecological Indicators*, 111, 105964.
- Wang, Z., Fingas, M., & Li, K. (1994). Fractionation of a light crude oil and identification and quantitation of aliphatic, aromatic, and biomarker compounds by GC-FID and GC-MS, part II. *Journal of Chromatographic Science*, 32(9), 367-382.
- Wu, B., Song, J., & Li, X. (2014). Evaluation of potential relationships between benthic community structure and toxic metals in Laizhou Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 87(1-2), 247-256.