

**La investigación en la UJAT desde la perspectiva
de los Cuerpos Académicos de la DACB**

C O L E C C I Ó N

HÉCTOR OCHOA BACELIS

Textos de enseñanza de Ciencias Básicas

Guillermo Narváz Osorio
Rector

Hermicenda Pérez Vidal
Directora de la División Académica de Ciencias Básicas

Primera edición, 2025

© Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

www.ujat.mx



Para su publicación esta obra ha sido dictaminada por el sistema académico de “doble ciego”. Los juicios expresados son responsabilidad del autor o autores. El contenido de esta obra no podrá utilizarse para entrenar modelos de Inteligencia Artificial sin el consentimiento expreso de sus autores (o herederos) y de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

ISBN: 978-607-606-712-3

Edición y corrección: Francisco Cubas Jiménez

Hecho en Villahermosa, Tabasco, México

Introducción

En el estado de Tabasco, una región rica en recursos naturales y biodiversidad, la investigación y el desarrollo en el ámbito de la química aplicada a los objetivos del desarrollo sustentable están avanzando con gran dinamismo. Sin embargo, la región enfrenta desafíos significativos que deben de atenderse, en lo que destacan temas relacionados con la gestión ambiental en materia de residuos e hidrocarburos, así como de estudios básicos de las plantas medicinales y de rutas de síntesis orgánicas e inorgánicas que establezcan métodos innovadores que favorezcan la reducción de costos e impactos al medio ambiente.

Un tema preocupante en la salud y bienestar, especialmente en materia de género, es el cáncer de mama que, si bien no es un padecimiento exclusivo de la mujer, representa una de las tasas de mayores decesos para este género. Además, recientemente se han establecido estrategias de enmiendas orgánicas y la optimización de prácticas sostenibles para el sector primario, en el cual se presentan como soluciones clave para mitigar los impactos negativos y promover una gestión ambiental más eficaz, las cuales pueden ser aplicadas a la región tabasqueña.

Así, Tabasco está en un punto crítico en la intersección entre desarrollo científico y sostenibilidad ambiental, donde la investigación académica y las estrategias de manejo ambiental juegan roles cruciales para enfrentar los desafíos actuales y construir un futuro más verde y saludable para la región. Por estas razones, en el presente libro, los Cuerpos Académicos de la División Académica de Ciencias Básicas (DACB) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) presentan estudios de diagnósticos ambientales y rutas de síntesis químicas para reducir los efectos negativos que los procesos industriales tienen sobre los ecosistemas tropicales y la salud pública, así como nuevos estudios de cáncer de mama.

Dr. Carlos Mario Morales Bautista
*Líder del Cuerpo Académico Química Aplicada
a la Gestión Ambiental*

Prólogo

La investigación es una de las funciones sustantivas en las instituciones de educación superior, mediante ella, se impulsa a los miembros de los claustros académicos para que apliquen su formación y experiencia en la formulación de propuestas de solución a problemáticas en distintos ámbitos; esta actividad conlleva, de manera especial, la generación de espacios para fortalecer también la formación de recursos humanos de alto nivel.

En las últimas décadas, dentro de las Universidades Públicas Estatales de México, esta importante labor se lleva a cabo principalmente a través de los denominados Cuerpos Académicos, los cuales se integran por profesores investigadores con intereses y afinidades comunes, que les permiten trabajar articuladamente para cultivar Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento bien definidas, generando productos académicos de calidad, impactando positivamente en los programas educativos de licenciatura y posgrado que atienden, además de generar espacios para que los estudiantes puedan involucrarse activamente en el desarrollo de proyectos específicos relacionados con los objetivos propios de cada Cuerpo Académico.

De ahí la pertinencia de esta obra ya que en “La investigación en la UJAT desde la perspectiva de los Cuerpos Académicos de la DACB” se presenta una recopilación del quehacer de tres Cuerpos Académicos de la División Académica de Ciencias Básicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Mediante la exposición de ejemplos relevantes de sus actividades, el lector podrá conocer diferentes vertientes dirigidas a la búsqueda y aplicación del conocimiento y realizadas en el seno de este claustro universitario.

De esta forma, el Cuerpo Académico Química Orgánica, presenta en el capítulo 1, el desarrollo de procesos sintéticos tendientes a aplicar el paradigma actual de la química verde. Así, mediante la aplicación de estrategias mecanoquímicas o con sistemas libres de disolventes, el uso de reactivos fácilmente accesibles, así como la aplicación de fuentes alternativas de energía, se han diseñado procesos ecológicamente más amigables para la obtención de compuestos orgánicos de interés.

Otra línea de investigación que cultiva el Cuerpo Académico Química Orgánica, sustenta el capítulo 2, en donde se presenta la recopilación relativa al estudio químico de las plantas medicinales empleadas en Tabasco; mediante casos concretos, se muestra cómo, apoyándose en el conocimiento tradicional, se ha logrado abundar en la comprensión de los aspectos fitoquímicos y de actividad biológica que poseen plantas de uso común en las regiones tabasqueñas, conocimiento que aporta hacia el uso racional de este importante recurso natural.

Por otro lado, en el capítulo 3, el Cuerpo Académico Bioquímica y Biología Molecular presenta un análisis genómico que atiende un grave problema de salud, como lo es el cáncer de mama. Mediante la aplicación de las tecnologías de secuenciación genética, actualmente se cuenta con un sólido andamiaje conceptual y procedimental que explica por un lado los aspectos mecánicos involucrados en la formación de genes híbridos potencialmente cancerígenos y, por otro lado, permite aplicar herramientas analíticas que los identifican en la patogénesis del cáncer de mama.

El Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental desarrolla en los capítulos 4, 5 y 6 un análisis de las diferentes direcciones hacia las cuales dirige su generación y aplicación del conocimiento. De esta manera, presenta en el capítulo 4, el caso concreto del estudio de los indicadores ambientales, centrados en los cambios geomorfológicos, que permiten reconocer si las infraestructuras que se han implementado para la prevención de inundaciones y derrames recientes ejercen efectos de acumulación de contaminantes en comunidades específicas.

Otro aspecto vinculado a la gestión ambiental se desarrolla en el capítulo 5, a través del análisis del manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos en sitios de transferencia, concebidos como depósitos temporales de este tipo de residuos pero que representan una fuente potencial de riesgos. Se enfatiza en este análisis la importancia que tiene esta actividad no sólo en los aspectos ambientales, sino también en el impacto sanitario y social que conlleva.

En el capítulo 6, por su parte, se aterriza en el desarrollo de las enmiendas orgánicas como estrategias viables en su aplicación, para atender la problemática recurrente que se presenta por el fenómeno de degradación de los suelos, debido a diferentes factores como lo es el aumento en las actividades industriales. Un

aspecto novedoso que conlleva el uso de enmiendas orgánicas es que, además, en su preparación se fomenta el reciclaje y la reutilización de insumos orgánicos generados por diferentes actividades económicas como lo son residuos agroindustriales y derivados de actividades pecuarias.

Este amplio espectro de actividades desarrolladas por Cuerpos Académicos de la División Académica de Ciencias Básicas cuenta con el factor común de ser el resultado del trabajo colaborativo entre pares académicos integrados en equipos de trabajo con objetivos y metas comunes. Más aún, esta colaboración va más allá de una sola entidad educativa, sino que al ir desarrollando estrategias para la atención de problemáticas complejas, se requiere la participación intra e interinstitucional, como lo prueba el hecho de que dentro de los trabajos presentados se incluyen investigadores de la División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco y la División Académica de Ingeniería y Arquitectura; además de instituciones externas como el Centro de Investigación Biomédica del Sur, la Universidad Popular de la Chontalpa y el Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco.

La génesis misma de esta obra es el resultado de los esfuerzos coordinados de los Cuerpos Académicos involucrados que, con la mejor disposición, ponen a juicio del lector las perspectivas que han forjado mediante su trabajo cotidiano en la investigación.

Dr. Carlos Ernesto Lobato García
Editor y jefe de la revista Journal of Basic Sciences

Contenido

Capítulo I	11
Aporte al desarrollo de estrategias sintéticas en química verde desde la perspectiva del cuerpo académico de química orgánica	
<i>Vilchis-Reyes Miguel Ángel, Roa-de la Fuente Luis Fernando, Alvarado-Sánchez Cuauhtémoc, Hidalgo-de los Santos Alam Yair, Alarcón-Matus Erika, Torres-Sauret Quirino, Ramos-Rivera Erika Madeleyne y Romero-Ceronio Nancy</i>	
Capítulo II	31
Estrategias para el estudio de plantas empleadas en la medicina tradicional de Tabasco	
<i>Gómez-Rivera Abraham, González-Cortazar Manasés, López-Rodríguez Ricardo, Gallegos-García Ammy Joana, Blé-González Ever Arquímedes, Hernández-Abreu Oswaldo Ignacio, Medrano-Sánchez Eric Jaziel y Lobato-García Carlos Ernesto</i>	
Capítulo III	59
Identificación de genes de fusión en el cáncer de mama mediante análisis transcriptómico	
<i>De la Cruz-Cano Eduardo, Díaz-Gandarilla José A., González-Garrido José A. y López-Victorio Carlos J.</i>	

Contenido

Capítulo IV	75
Indicadores socioambientales de contaminación por hidrocarburos cerca del campo petrolero Samaria, Tabasco	
<i>Yzquierdo-Ruiz Mónica M., Morales-Bautista Carlos M., García-Zaleta David S., Pérez-Vidal Hermicenda, Márquez-Herrera Ciro E., Torres-Sánchez Sonia A. y De la Garza-Rodríguez Iliana M.</i>	
Capítulo V	94
Importancia ambiental, sanitaria y social del manejo de RSU en sitios de transferencia	
<i>Montejo-Custodio Diana Laura, Morales-Bautista Carlos M., Laines-Canepa José R., Alor-Chávez Maricela de J., Lunagómez Rocha María A., Márquez-Herrera Ciro E. y Pérez-Vidal Hermicenda.</i>	
Capítulo VI	112
Enmiendas orgánicas a partir de residuos agroindustriales para aplicación a suelos con derrames de hidrocarburos	
<i>Fuentes-Domínguez Irene, Ojeda-Morales Marcia E., González-Garrido José A., López-Victorio Carlos J. y Morales Bautista Carlos M.</i>	
Conclusiones generales	130

Capítulo 1

**Cuerpo Académico
de Química Orgánica**

Aporte al desarrollo de estrategias sintéticas en química verde desde la perspectiva del cuerpo académico de química orgánica

Contribution to the Development of Synthetic Strategies in Green Chemistry from the Perspective of Research Group of Organic Chemistry

Vilchis-Reyes Miguel Ángel^{1a}, Roa-de la Fuente Luis Fernando^{1a}, Alvarado-Sánchez Cuauhtémoc^{1a}, Hidalgo-de los Santos Alam Yair², Alarcón-Matus Erika^{1b}, Torres-Sauret Quirino^{1b}, Ramos-Rivera Erika Madeleyne^{1b} y Romero-Ceronio Nancy^{1a*}

^{1a}Integrante, ^{1b}Colaborador del Cuerpo Académico de Química Orgánica. Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco. División Académica de Ciencias Básicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

²Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco.

Autor de correspondencia: nancy.romero@ujat.mx

Resumen

La síntesis orgánica y la química verde trabajan de forma conjunta para la obtención de compuestos de interés sin consecuencias en el medio ambiente. En el presente capítulo se expone una recopilación de las aportaciones de estrategias de síntesis hechas por el Cuerpo Académico Consolidado (CAC) “Química Orgánica” (UJAT-CA-225) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). En los resultados se describen tres estrategias centrales: Reacciones libres de disolvente y mecanoquímica (síntesis de fluoresceína); uso de agentes oxidantes de uso diario (oxidación de arilcetonas empleando hipoclorito de sodio) y fuentes de activación alternativas, microondas (obtención de fluorochalconas) y ultrasonido (síntesis de: ácido de Meldrum, pirroles y sales de Zincke).

Palabras clave: química verde, síntesis orgánica, mecanoquímica, ultrasonido, microondas.

Abstract

Organic synthesis and green chemistry work closely to obtain useful compounds without having a negative impact on the environment. The present chapter compiles some synthetic efforts made by the Organic Chemistry research group UJAT-CA-225 (*Cuerpo Académico Consolidado, CAC*, for its name in Spanish) at *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT)*. The results section describes three central strategies: solvent-free and mechanochemical reactions (fluorescein synthesis); use of everyday oxidizing agents in synthesis (oxidation of aryl ketones using sodium hypochlorite); and use of alternative activation sources, microwaves (synthesis of fluorinated chalcones) and ultrasound (synthesis of: Meldrum acid, pyrroles and Zincke salts).

Keywords: Green Chemistry, Organic Synthesis, Mechanochemistry, Ultrasound, Microwaves.

1. Introducción

Actualmente persiste la suposición de que los compuestos de origen natural son mejores en comparación con los compuestos de origen sintético, es decir los productos obtenidos en un laboratorio. Sin embargo, al realizar una comprobación entre dos moléculas, una de obtenida de fuentes naturales y otra obtenida en un laboratorio, ambas presentan la misma estructura y propiedades fisicoquímicas, espectroscópicas y biológicas (Bruice, 2008).

En este sentido, la síntesis orgánica permite a los químicos acceder a la obtención de compuestos idénticos a los extraídos de fuentes naturales e incluso potencializar las propiedades de los primeros mediante la síntesis de compuestos análogos. Sin embargo, existen un gran número de moléculas bioactivas aisladas de fuentes naturales las cuales aún no han sido sintetizadas, todavía (Bruice, 2008).

La síntesis orgánica tiene la función de crear moléculas complejas a partir de moléculas más pequeñas. Las estrategias sintéticas fueron evolucionando a lo largo de la historia de la mano de personajes icónicos como Robert Burns Woodward & Elias James Corey, ambos galardonados con el Premio Nobel de

Química en 1964 y 1990 respectivamente. Woodward, manifestó una concepción romántica de la síntesis orgánica, pues la consideró como un arte, mientras que para Corey la síntesis orgánica es un reto intelectual al cual se puede atacar mediante el razonamiento sistemático y estratégico, así desarrolló la teoría del sintón o mejor conocida como retrosíntesis. La retrosíntesis permite analizar una molécula objetivo mediante la ruptura imaginaria de enlaces de manera sistemática (González, s. f.).

La síntesis orgánica es un área fundamental de investigación que se encuentra en constante crecimiento y a la vanguardia. Así lo demuestra lo reportado por Yue et al. (2023), quienes mencionan que entre el 2019 y 2020 se incrementó en un 25% el número de artículos publicados en esta área, en comparación con años anteriores. Estos autores analizaron los artículos publicados en el área de síntesis orgánica con el propósito de conocer los conceptos que son tendencias y los agruparon en cinco categorías: Química verde, desarrollo de fármacos, electroluminiscencia orgánica, propiedades o características y la última, catálisis. Con esto, se hace evidente la sinergia entre la síntesis orgánica y la química verde.

El término “*green chemistry*” o química verde, fue propuesto por Anastas & Warner, (1998) y hace referencia al “*diseño de procesos y productos químicos que reduzcan o eliminen el uso y generación de sustancias peligrosas*”. Estos autores propusieron doce principios, con base en estos se establecen las directrices de los químicos para el desarrollo de nuevas metodologías o en el diseño de rutas de síntesis Figura 1.

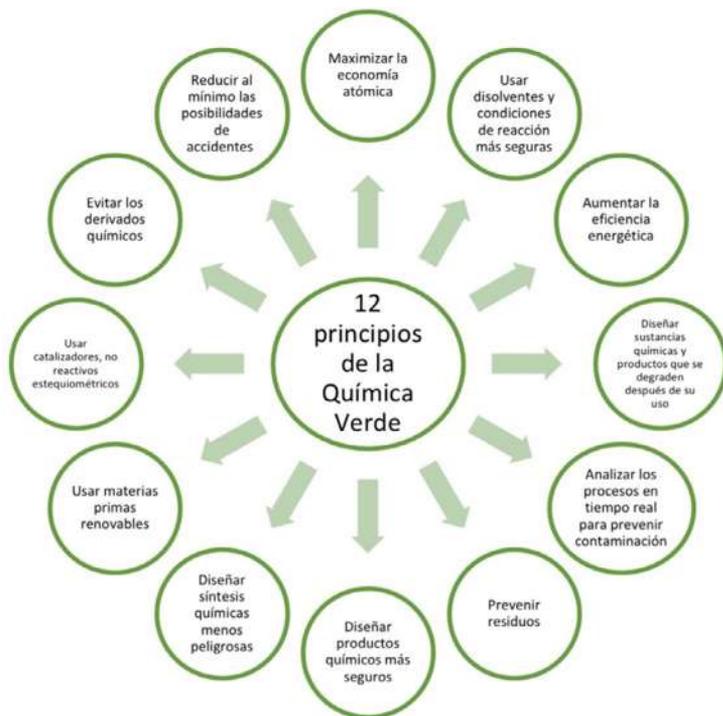


Figura 1. Los doce principios de la química verde. [Construcción propia con base en: Ibanez, J. G.; Hernandez-Esparza, M.; Dorian-Serrana, C.; Fragoso-Infante, A. 2007. *Environmental Chemistry Fundamentals*. ed. Springer. New York. Capítulo 12].

En consecuencia, los químicos enfrentan un gran desafío al momento de realizar la síntesis de un compuesto, las reacciones no solo deben de ser eficaces, selectivas y con altos rendimientos, sino que también no deben de generar daño al medio ambiente, a la salud de los operadores y ser económicas, tal como representa Clark (1999) en la Figura 2.

Van Aken et al. (2006) retoman estas ideas y crean un algoritmo llamado ecoescala. La ecoescala es una herramienta que permite evaluar, las reacciones a nivel laboratorio, en una escala de 0 a 100, las reacciones con base en los puntos obtenidos se clasifican de la siguiente manera con 75 puntos es una reacción excelente, mayor a 50 puntos aceptable, menor de 50 puntos inadecuada y donde 0

representa una reacción totalmente fallida (0% de rendimiento) y 100 representa la reacción ideal, definida por los autores como:

...el compuesto A (sustrato) sufre una reacción con (o en presencia de) compuesto(s) B económico(s) para dar el compuesto C deseado con un rendimiento del 100% a temperatura ambiente con un riesgo mínimo para el operador y un impacto mínimo para el medio ambiente (p. 3)



Figura 2. Síntesis ideal. [Modificado de Clark, J. H. *Green chemistry: challenges and opportunities*. (1999). *Journal of Green Chemistry* 1(1): 1998].

Por su parte la Sociedad Química Americana (ACS, por sus siglas en inglés) en conjunto con la industria farmacéutica desde 2005 han entablado mesas de debate para establecer directrices de investigación que estén en sintonía con las necesidades en el desarrollo de fármacos y los principios de la química verde (Bryan et al., 2018).

En este sentido, el Cuerpo Académico Consolidado (CAC) Química Orgánica (UJAT-CA-225) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), tiene como una de sus líneas de generación de conocimiento la síntesis orgánica con enfoque sustentable dirigida a la obtención de compuestos con actividad biológica. Dentro de esta línea se busca contribuir con la modificación o adecua-

ción de metodologías clásicas a estrategias “verdes”, es decir, metodologías sintéticas que incorporen al menos uno de los doce principios de la química verde.

La búsqueda para adaptar metodológicamente un procedimiento bajo los principios de química verde se inicia con el análisis de la técnica tradicional reportada en la bibliografía. A continuación, se exploran las condiciones de reacción modificando aspectos como son: el disolvente, los reactivos y la fuente de activación. Posteriormente, la metodología modificada se evalúa mediante parámetros como: rendimiento, tiempo de reacción, economía atómica (EA), eficiencia atómica (EfA) y ecoescala. Estos últimos permiten diagnosticar el grado de “verdor” o “sustentabilidad” de la metodología modificada. Finalmente, se estudia el alcance del procedimiento, esto con la finalidad de establecer la versatilidad estructural de las condiciones de reacción encontradas (Trost, 1991a, 1995b; Van Aken, 2006; Sierra, 2014) Figura 3.



Figura 3. Proceso para la modificación o adecuación de metodologías clásicas a estrategias “verdes”. [Creación propia].

Con el proceso de adecuación descrito en la Figura 3, se han obtenido resultados originales muy interesantes que han permitido fortalecer la línea de investigación por parte de nuestro cuerpo académico, algunos de los aportes se presentan en este capítulo. Los trabajos se describen en tres estrategias centrales: 1) Reacciones libres de disolvente y mecanoquímica; 2) Uso de agentes oxidantes de uso diario (hipoclorito de sodio) y 3) Fuentes de activación alternativas (microondas y ultrasonido).

2. Resultados de Estrategias Sintéticas

2.1. Reacciones Libre de Disolvente y Mecanoquímica: Síntesis de fluoresceína

La mayoría de las reacciones químicas se llevan a cabo en disolución, sin embargo, los disolventes empleados tradicionalmente en el laboratorio son inflamables, volátiles, tóxicos o hasta cancerígenos. Una alternativa es sustituir estos por disolventes verdes, como los alcoholes obtenidos de fuentes renovables, agua, fluidos supercríticos, disolventes fluorados y líquidos iónicos (Sierra, 2014). Otra opción es eliminar el uso de disolvente, es decir, realizar las reacciones libres de disolventes.

Existe un gran número de reacciones reportadas que proceden de manera eficiente en fase sólida, incluso con mayor selectividad, tal como señala Tanaka (2000), las reacciones libres de disolvente a menudo son más rápidas y económicas, brindan mayores rendimientos y tienen una variedad de otros beneficios sobre las reacciones tradicionales basadas en soluciones. A su vez muchas reacciones de mecanoquímica, reacciones químicas activadas por la absorción directa de energía mecánica, se llevan a cabo en un ambiente libre de solventes (Paneque-Quevedo, 2019; Kappe, 2021).

La fluoresceína [1] fue preparada por primera vez por von Baeyer en 1871 a partir de resorcinol y anhídrido ftálico vía una acilación de Friedel-Crafts seguida de una ciclodeshidratación. Actualmente, existen diferentes metodologías para la síntesis de la fluoresceína, de las cuales se destacan las metodologías libres de disolventes donde la reacción es sometida a flama directa por medio de mechero y a temperaturas de fusión, entre otras, todas ellas reportan rendimientos muy variados y son metodologías que se pueden considerar dentro de la química verde (Duan, 2009; Collado-Leyva et al., 2017) Figura 4.

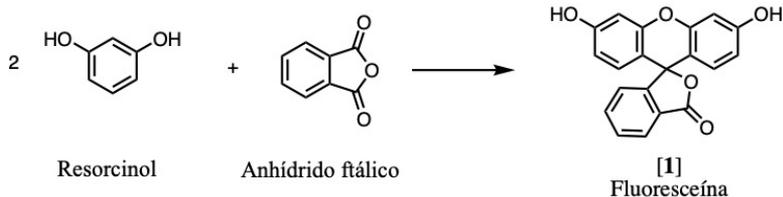


Figura 4. Síntesis de fluoresceína. [Modificado de Duan, 2009].

Collado-Leyva et al. (2017), reportaron la optimización para la síntesis de la fluoresceína mediante una reacción libre de disolvente. Las modificaciones metodológicas se centraron en la relación estequiométrica de los reactivos de partida y del catalizador; sustitución del equipo de reacción empleado y cambios en el proceso de recristalización del crudo de reacción, todos fueron evaluados por EA, EfA y ecoescala. Tabla 1.

Tabla 1. Optimización del proceso de síntesis de fluoresceína [modificado de Collado-Leyva et al., 2017].

Método	Equivalentes R/AF	Condiciones de reacción Purificación	Rendimiento %	EA ^b %	EfA ^c %	Ecoescala ^d
1 ^a	1.2 / 1	a) Exceso de ácido sulfúrico, se utilizó matraz Erlenmeyer con calentamiento directo en parilla b) Recristalización a partir de etanol: agua (1:1)	50.2	90.2	45.3	47.1
2	2/1	a) Exceso de ácido sulfúrico, se utilizó cápsula de porcelana con calentamiento directo en parilla b) Recristalización a partir de etanol: agua (1:1)	77.0	90.2	69.5	60.5

3	2.1/1	a) 5 eq de ácido sulfúrico, se utilizó cápsula de porcelana con calentamiento directo en parilla b) Recristalización a partir de agua (1:1)	97.8	90.2	88.2	70.9
---	-------	--	------	------	------	------

Notas: ^aMétodo 1 reportado en Brewster et al., 1970. ^bEconomía atómica. ^cEficiencia atómica. ^dCalificación de ecoescala: >75 excelente, >50 aceptable y <50 inadecuada.

2.2. Uso de agentes oxidantes de uso diario (oxidación de arilcetonas empleando hipoclorito de sodio)

La oxidación de una molécula orgánica generalmente se describe como la ganancia de átomos de oxígeno o bien la pérdida de densidad electrónica producida por la acción de otro compuesto, a estos compuestos se les denomina agentes oxidantes. Existen muchos agentes oxidantes que son utilizados en química orgánica para la síntesis de diversos compuestos, sin embargo, muchos de estos son altamente contaminantes. Una de las reacciones que sufren las arilcetonas al igual que las cetonas simples, es la reacción de oxidación. Los agentes más comunes que oxidan arilcetonas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Agentes que oxidan arilcetonas a ácidos carboxílicos.

Agente Oxidante	Comentarios
KMnO ₄	Tiene muchos usos como oxidante, particularmente en síntesis orgánica y para la destrucción de compuestos peligrosos. Es tóxico por ingestión y pueden ocurrir explosiones cuando entra en contacto con materiales orgánicos o fácilmente oxidables, ya sea en seco o en solución, también es incompatible con muchos compuestos orgánicos e inorgánicos.
CaClO ₂	Es un fuerte agente oxidante de apariencia granulosa color beige claro, muy peligroso para la salud humana y para el medio ambiente. Puede explotar durante su almacenamiento.
LiClO	Es un fuerte agente oxidante de apariencia granular color blanco de olor a cloro, es una sustancia extremadamente peligrosa para la salud debido a su alta toxicidad.
KClO	Es un agente oxidante que se encuentra en estado líquido, su fácil manejo no lo hace relativamente peligroso a menos que se tenga contacto directo con la sustancia que provoca efectos físicoquímicos nocivos para la salud humana y para el medio ambiente.

NaClO

El hipoclorito de sodio es un agente oxidante en estado líquido, es incompatible con una variedad de productos, y es corrosivo e irritante si se tiene contacto directo con la sustancia, su manejo no es peligroso si se hace con todas las precauciones.

Fuente: (Lunn & Sansone, 1994).

En general, los hipocloritos son excelentes agentes oxidantes y son capaces de oxidar ciertas moléculas orgánicas, se utilizan en soluciones diluidas para disminuir su toxicidad. Uno de los principios de la química verde es el empleo de sustancias químicas más seguras, en este sentido se reportó el estudio del alcance para la oxidación de arilcetonas diversamente sustituidas, utilizando como agente oxidante hipoclorito de sodio acuoso al 6%, grado comercial (Figura 5).

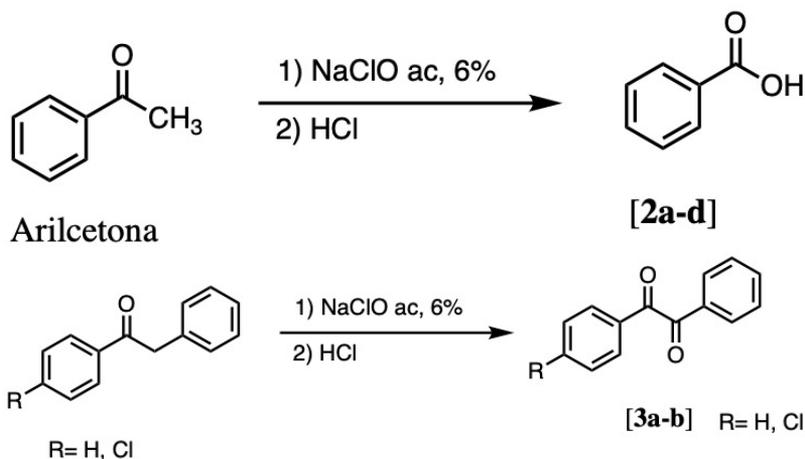


Figura 5. Oxidación de arilcetonas. [Modificado de Hidalgo-de los Santos, 2018].

La metodología se diseñó bajo los principios de la química verde y se logró la síntesis de los siguientes productos: ácido benzoico [2a], ácido 2-nitrobenzoico [2b], ácido 3-nitrobenzoico [2c], ácido 4-nitrobenzoico [2d], 1,2-difeniletano-1,2-diona [3a], 1-(4-clorofenil)-2-feniletano-1,2-diona [3b] con rendimientos que van desde 20.5 hasta 98% (Hidalgo-de los Santos, 2018) Figura 6.

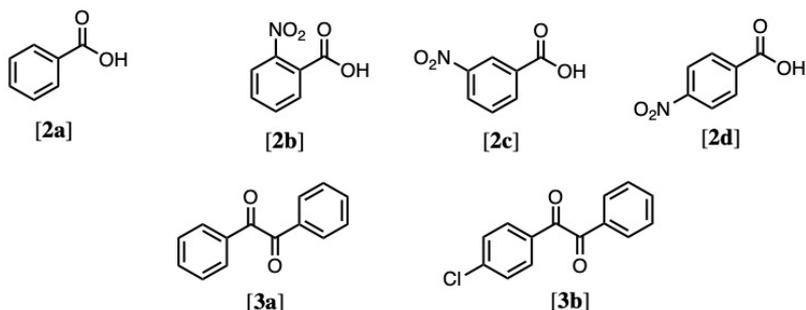


Figura 6. Productos obtenidos por Hidalgo-de los Santos (2018). [Modificado de Hidalgo-de los Santos, 2018].

Todos ellos fueron caracterizados por espectroscopia infrarroja o por Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de ^1H y ^{13}C y concuerdan con las estructuras propuestas. Por último, se realizó la evaluación de la sostenibilidad de las reacciones empleadas, se determinó los parámetros de EA, EfA y ecoescala, los datos se muestran en la Tabla 3 (Hidalgo-de los Santos, 2018).

Tabla 3. Resultados de la oxidación de arilcetonas [Modificado de Hidalgo-de los Santos, 2018].

Compuesto	p.f* (°C)	Rendimiento %	EA %	EfA %	Ecoescala**
2a	123	98	62.7	61.48	82
2b	145	97	69.7	67.60	81
2c	140	80	69.7	55.76	73
2d	234	68	69.7	47.39	67
3a	105	20.5	77.66	15.92	30.25
3b	169	54	80.31	43.36	47

*Punto de fusión. **Calificación de ecoescala: >75 excelente, >50 aceptable, <50 inadecuada.

La evaluación de los parámetros mostró que las condiciones de reacción para la síntesis de los compuestos [2a] y [2b] fueron verdes, por lo que ambas son reacciones que se pueden reproducir con toda confianza como estrategia de síntesis en la obtención de ácidos carboxílicos minimizando los impactos al medio ambiente. En cuanto a los compuestos [2c] y [2d] las condiciones de reacción

se calificaron como aceptables. Mientras que para los derivados [3a] y [3b], las condiciones obtuvieron calificación de inadecuadas, con respecto a los algoritmos de la ecoescala, debido a: El rendimiento, el uso de condiciones de reflujo y las separaciones cromatográficas empleadas (Hidalgo-de los Santos, 2018).

2.3. Fuentes de activación alternativas: microondas (obtención de fluorochalconas) y ultrasonido (ácido de Meldrum, pirroles y sales de Zincke)

Existen diferentes alternativas para aportar la energía necesaria para que una reacción química se efectue (energía de activación); estos métodos de activación química están agrupados como clásicos o convencionales y poco clásicos o no convencionales. En los primeros se encuentran los métodos de activación térmicos, fotoquímicos y electroquímicos, mientras que por métodos no convencionales se tiene activación por mecanoquímica, ultrasonido, microondas y radiación infrarroja (Doble et al., 2010).

Las microondas (MO) son un tipo de radiación electromagnética no ionizante, que causa movimiento molecular por migración de iones y rotación de dipolos. Los principales beneficios son tres: las reacciones se hacen en menos tiempo, se reduce el esfuerzo y el proceso es más sostenible. Se generan altas presiones en el sistema de reacción, se requiere de disolventes con momento dipolar, equipos especializados, en particular los instrumentos MO monofocal debido a que presentan una mayor eficiencia energética en comparación con sus contrapartes de multifocal (Martina, 2021).

En el reporte de Antonio et al. (2018) se comparó en la síntesis de fluorochalconas [4a-c] el uso del horno de microondas doméstico (HMO) (radiación multifocal) versus el reactor de microondas (RMO) (radiación monofocal). Los resultados mostraron que la síntesis mediada por irradiación de microondas ya sea RMO o por HMO presentó mayores rendimientos (> 65%) en comparación con los métodos de agitación mecánica y reflujo. Mientras que para el caso del compuesto [4a], el rendimiento obtenido cuando se empleó RMO fue superior al obtenido por HMO, tal como se muestra en la tabla 4.



Figura 7. Síntesis de fluorochalconas por Antonio-Arias et al., (2018). [Modificado de Antonio-Arias et al., 2018].

Tabla 4. Síntesis de fluorochalconas por Antonio-Arias et al. (2018). [Modificado de Antonio-Arias et al., 2018].

Compuesto	MO	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	P.F. (°C)	EA	EfA	Ecoescala
4a	HMO*	5	26.2	44	92.6	24.3	40.1
4a	RMO**	15	70	44	92.6	64.8	62
4b	HMO*	5	65	48	92.6	60.2	59.5
4b	RMO**	15	75	48	92.6	69.5	64.5
4c	RMO**	15	95.5	79	92.6	88.4	74.8

*1 eq. acetofenona/ 1 eq. fluorobenzaldehído / 0.5 eq., *p*-TsOH, HMO: MABE, model: HMM74MB.

**1 eq. acetofenona/ 1 eq. fluorobenzaldehído / 0.5 eq., *p*-TsOH, RMO: VICHI model: MW-600 MIC-1.

Temperatura: 50°C, velocidad: 100 rxm, potencia: 90%, presión: 1psi.

Para actualizar el estudio anterior se presenta el cálculo de los parámetros EA, EfA y ecoescala. Al igual que en los ejemplos anteriores, un factor decisivo es el porcentaje de rendimiento de la reacción. Para este caso en particular el valor de EfA aumenta a la par que aumenta el porcentaje de rendimiento, similar a la ponderación por ecoescala, a mayor rendimiento menos puntos penalizados y por tanto mayor puntaje (Tabla 4).

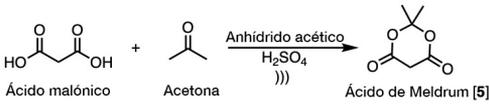
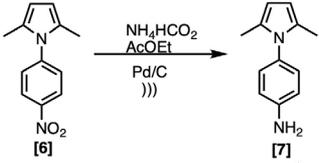
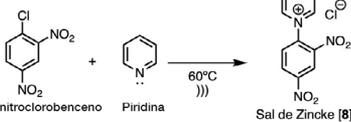
Otra forma de activación no convencional es mediante ultrasonido, Martínez et al. (2021) se refiere al ultrasonido como las ondas acústicas inaudibles generalmente alrededor de 20 kHz. Así, la sonoquímica estudia las reacciones o transformaciones producidas o promovidas por ultrasonido, la mayoría de las reacciones, por sonoquímicas, se llevan a cabo a frecuencias ultrasónicas entre 20 y 100 kHz con intensidades lo suficientemente altas como para causar cavitación en el medio líquido (Martínez et al., 2021).

En las últimas tres décadas, se ha incrementado la aplicación de la radiación ultrasónica en el área de la química orgánica. Esto se debe a que varias reacciones

se pueden acelerar empleando esta fuente alterna de energía y a su vez se obtienen altos rendimientos con condiciones suaves y tiempos cortos de reacción (Martínez et al., 2021).

El uso de ultrasonido para promover reacciones químicas en la UJAT se empezó a implementar en el año 2010, con la síntesis de análogos del ácido de Meldrum [5], reducción del grupo nitro en el pirrol [6], obtención de sales de Zincke [8], entre otros ejemplos. En la Tabla 5 se presentan algunas de las reacciones que se han logrado optimizar aplicando la activación no convencional por ultrasonido en nuestro CAC, en todos los casos se observó un incremento en el rendimiento y una disminución en el tiempo de reacción (Cruz-Arcos, 2011; Gómez-Bolaina, 2011 y Torres-Sauret, 2015).

Tabla 5. Recopilación de aporte en sonoquímica por el CAC de Química Orgánica.

Aporte	Reacción	Método (rendimiento (%) / tiempo (h))
Síntesis de ácido de Meldrum	 <p>Ácido malónico + Acetona $\xrightarrow[\text{H}_2\text{SO}_4]{\text{Anhídrido acético}}$ Ácido de Meldrum [5]</p>	Convencional (24/ 24) Ultrasonido (42/ 0.5)
Reducción de grupo nitro en la síntesis de bis-pirroles	 <p>[6] $\xrightarrow[\text{Pd/C}]{\text{NH}_4\text{HCO}_2, \text{AcOEt}}$ [7]</p>	Convencional (80 / 24) Ultrasonido (90/1)
Síntesis sales de Zincke	 <p>2,4-Dinitroclorobenceno + Piridina $\xrightarrow{60^\circ\text{C}}$ Sal de Zincke [8]</p>	Convencional (90/12) Ultrasonido (100/ 2)

Fuente: Cruz-Arcos, (2011); Gómez-Bolaina, (2011) y Torres-Sauret, (2015).

Las reacciones en ultrasonido de la Tabla 5 se realizaron empleando un baño ultrasónico, como el que se muestra en la Figura 8. Existen otros tipos de equipos en los cuales la radiación ultrasónica se transmite a través de una sonda tipo antena que se introduce en el interior del matraz, o bien en diseño tipo

reactor que permite emitir frecuencias altas por medio de una sonda (Martínez et al., 2021).



Figura 8. Baño de ultrasonido [Fuente: Cruz-Arcos, 2011].

Actualmente, la sonoquímica se aplica en estudios del tipo interdisciplinarios y multidisciplinarios que van desde la nanotecnología hasta la administración de fármacos, entre otros. Con respecto a la síntesis orgánica, la sonoquímica todavía tiene desafíos que resolver, como la funcionalización selectiva, el control estereoquímico o las interpretaciones de la cavitación en los mecanismos de reacción. Sin embargo, su aporte a metodologías cada vez más verdes es innegable (Martínez et al., 2021).

3. Discusión y Conclusiones

La síntesis orgánica ha evolucionado desde sus inicios en 1838 con la síntesis de la urea por Wöhler hasta la era de Woodward y Corey, es una ciencia en desarrollo continuo que se interrelaciona con otras áreas para innovar nuevas metodologías para la obtención de compuestos de interés. Actualmente, es un

reto constante la búsqueda de nuevas metodologías que permitan a los químicos sintéticos la preparación de moléculas complejas, mediante reacciones estereo y quimioselectivas, con excelentes rendimientos, a partir de materias primas renovables, asequibles y seguras tanto para el operador como con el medio ambiente. Estas ideas marcan las directrices del quehacer académico y científico del CAC: Química Orgánica

Así, la búsqueda de nuevas metodologías bajo los principios de la química verde es una constante en el desarrollo del cuerpo académico, de la mano con la formación de químicos comprometidos con el medio ambiente, para generar conocimientos dentro de la línea de investigación: Síntesis orgánica con enfoque sustentable. En este capítulo se describieron tres estrategias principales: Reacciones libres de disolvente y mecanoquímica (síntesis de fluoresceína); uso de agentes oxidantes de uso diario (oxidación de arilcetonas empleando hipoclorito de sodio) y fuentes de activación alternativas, microondas (obtención de fluorochalconas) y ultrasonido (síntesis de: ácido de Meldrum, pirroles y sales de Zincke).

Las estrategias sintéticas presentadas se evaluaron por EA, E_fA y ecoescala. En el primer parámetro, economía atómica, se pondera cuántos átomos de los reactivos se encuentran en los productos, en general las reacciones de condensación como es el caso de la síntesis de la fluoresceína y chalconas se obtuvieron EA mayores al 90%, es decir no hubo desperdicio de átomos, no así para las reacciones de oxidación, en las cuales el valor EA en promedio fue del 71.6%, debido a la pérdida de átomos en los productos durante el proceso de oxidación. Con respecto a la E_fA y la ecoescala, en ambos, se observó que un factor que llegó a ser determinante fue el rendimiento de reacción obtenido. Con la evaluación de los parámetros anteriores se mostró que las condiciones de reacción reportadas en este capítulo, en la mayoría de los casos, se consideran de aceptables a excelentes dentro de los criterios de la química verde.

Se logró incorporar estrategias sintéticas amigables al medio ambiente, tales como el uso de nuevas fuentes alternativas de energías de activación (mecanoquímica, sonoquímica y microondas); asimismo, se cumplió en la medida de lo posible con los siguientes postulados de la química verde:

- Usar disolventes y condiciones de reacción más seguras

- Diseñar síntesis químicas menos peligrosas
- Uso de materias primas de fuentes renovables
- Maximizar la economía atómica
- Disminución de riesgo de accidentes químicos (por el simple hecho de usar microescala), subproductos de reacción inocuos al medio ambiente

El Cuerpo Académico Consolidado: Química orgánica, UJAT-CA-225, está trabajando con el propósito de consolidar a la investigación en síntesis orgánica en la DACB-UJAT, como un área de generación de conocimiento preocupada por el impacto al medio ambiente y que propone nuevas estrategias sintéticas amigables con el mismo.

Referencias bibliográficas

- Anastas, P. T. & Warner, J. C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, (2000), Oxford: cap. 2
- Antonio-Arias, J. E., Díaz-Oliva, V. del C., Romero-Ceronio, N., Gómez-Rivera, A., Aguilar-Mariscal, H., Roa de la Fuente, L. F. y Lobato-García, C. E. (2018). Monomodal vs Multimodal Microwave Irradiation Applied in the Synthesis of Fluoro-chalcones. *American Journal of Organic Chemistry* 2018, 8(1): 8-12 DOI: 10.5923/j.ajoc.20180801.02
- Brewster, R. Q., Vanderwerf C. A. y Ewen N. E. (1970). *Curso práctico de química orgánica*. Ed. Alhambra
- Bruice, P. Y. (2008). *Química Orgánica*. (5ta ed.). Pearson Prentice Hall.
- Doble, M., Rollins, K., & Kumar, A. (2010). *Green chemistry and engineering*. Academic Press.
- Duan, Y., Liu, M., Sun, W., Wang, M., Liu, S., & Li, Q. X. (2009). Recent progress on synthesis of fluorescein probes. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, 6(1), 35-43.
- Cintas, P., & Luche, J. L. (1999). Green chemistry. The sonochemical approach. *Green Chemistry*, 1(3), 115-125. DOI: 10.1039/A900593E

- Clark, J. H. (1999). Green chemistry: challenges and opportunities. *Green Chemistry*, 1(1), 1-8.
- Collado-Leyva, E., Lobato-García, C. E., Romero-Ceronio, N., Roa, L. F. y Alvarado-Sánchez, C. (2017). Aplicación de fluoresceína reducida en la detección de residuos de sangre en diferentes matrices. En Ocaña, T. A., Torres, J. G., Almaguer, M. H., Rodríguez, J. E., Estrada, L. F. y Ricárdez, C. (Compiladores), *Perspectivas Científicas de la DACB* (pp. 248-253). Editorial. UJAT.
- Cruz-Arcos, B. Y. (2011). *Rutas Alternativas para la Síntesis del fenileno 1,4-Bis(2,5-Dimetilpirrol)*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.]
- Gómez-Bolaina, J. J. (2011). *Síntesis y Caracterización de Compuestos Análogos Estructurales al Ácido de Meldrum*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.]
- González, A. M. R. (s. f.). *Síntesis orgánica: El arte de crear moléculas*.
- Hidalgo-de los Santos, A. Y. (2018). *Estudio de la oxidación de arilcetonas mediante química verde* [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].
- Ibanez, J. G., Hernandez-Esparza, M., Dorian-Serrana, C., Fragoso-Infante, A. (2007) *Environmental Chemistry Fundamentals*. ed. Springer. New York. Capítulo 12
- Kappe, C., O., Mack, J., & Bolm, C. (2021) Enabling Techniques for Organic Synthesis. *The Journal of Organic Chemistry* 86(21), 14242-14244. DOI: 10.1021/acs.joc.1c02326
- Lunn, G. & Sansone, E. B. (1994). *Destruction of hazardous chemicals in the laboratory*, Ed Wiley-Interscience Publication.
- Martina, K., Cravotto, G. & Varma, R. S. (2021). Impact of Microwaves on Organic Synthesis and Strategies toward Flow Processes and Scaling Up. *J. Org. Chem*, 86, 13857–13872.

- Martínez, R., F., Cravotto, G. y Cintas, P. (2021). Organic sonochemistry: a chemist's timely perspective on mechanisms and reactivity. *The journal of organic chemistry* 86(20), 13833-13856. Doi: 10.1021/acs.joc.1c00805
- Panque-Quevedo, A. A. (2019). Mecanoquímica: Una visión general más allá de la Química Inorgánica. *Revista Cubana de Química*, 31, 71-86.
- Sierra, A., Meléndez, L., Ramírez-Monroy, A., & Arroyo, M. (2014). La química verde y el desarrollo sustentable. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 5(9)
- Tanaka, K. & Toda, F. (2000). Solvent-Free Organic Synthesis. *Chemical Reviews*, 100(3), 1025-1074. DOI: 10.1021/cr940089p
- Trost, B., M. (1991). The atom economy--a search for synthetic efficiency. *Science*, 254(5037), 1471-1477
- Trost B., M. (1995). Atom Economy—A Challenge for Organic Synthesis: Homogeneous Catalysis Leads the Way. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 34, 259–281
- Torres-Sauret, Q. (2015). *Preparación de Sales de Zincke con un Enfoque de Química Verde*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.]
- Van Aken, K.; Streckowski, L.; Patiny, L. (2006). EcoScale, a semi-quantitative tool to select an organic preparation based on economical and ecological parameters. *Beilstein J. Org Chem.*, 2(3), 1-7. doi:10.1186/1860-5397-2-3

Capítulo 2

Cuerpo Académico Química Orgánica

Estrategias para el estudio de plantas empleadas en la medicina tradicional de Tabasco

*Strategies for the study of plants employed
in traditional medicine in Tabasco*

Gómez-Rivera Abraham^{1a}, González-Cortazar Manasés², López-Rodríguez Ricardo^{1b}, Gallegos-García Ammy Joana³, Blé-González Ever Arquímedes^{1a}, Hernández-Abreu Oswaldo Ignacio^{1a}, Medrano-Sánchez Eric Jaziel^{1b} y Lobato-García Carlos Ernesto^{1a}.

^{1a}Miembro, ^{1b}Colaborador. Cuerpo Académico Química Orgánica. CICTAT. División Académica de Ciencias Básicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

²Centro de Investigación Biomédica del Sur. Instituto Mexicano del Seguro Social.

³División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Popular de la Chontalpa.

Autor de correspondencia: carlos.lobato@ujat.mx

Resumen

Las plantas medicinales representan un amplio campo de estudio en el área de la química. El Cuerpo Académico “Química Orgánica” cuenta con una línea de investigación enfocada a la fitoquímica. En esta contribución se presentan cuatro ejemplos de trabajos encaminados al conocimiento de las plantas empleadas en la medicina tradicional de Tabasco. Los casos de estudio se agrupan alrededor de estrategias definidas por: a) aislamiento y caracterización de compuestos, b) estudios biodirigidos, c) elaboración de perfiles preliminares y d) variabilidad química de especies vegetales. La finalidad de este análisis es mostrar un panorama general del trabajo realizado en el seno del Cuerpo Académico para incrementar el conocimiento científico sobre la flora medicinal tabasqueña. Se concluye con una breve reflexión de las perspectivas que se generan a partir de los resultados obtenidos hasta el momento.

Palabras clave: fitoquímica, plantas medicinales, herbolaria, medicina tradicional, Tabasco.

Abstract

Medicinal plants represent a wide field of study in chemistry. The Academic Group “Organic Chemistry” has a line of research focused on phytochemistry. This contribution presents four studies that have been carried out, which were intended to increase the knowledge of the plants employed in the traditional medicine of Tabasco. The case studies are grouped around strategies defined by: a) isolation and characterization of compounds, b) biodirected studies, c) preliminary profiling and d) chemical variability of plant species. The purpose of this analysis is to show an overview of the work carried out within the Academic Group to increase scientific knowledge about the medicinal flora of Tabasco. It concludes with a brief reflection about the perspectives generated from the results obtained so far.

Keywords: Phytochemistry, Medicinal Plants, Phytotherapy, Traditional Medicine, Tabasco.

1. Introducción

La fitoquímica es el estudio de la composición química de las plantas, centrado particularmente en los compuestos denominados metabolitos secundarios, también conocidos como productos naturales (Marcano & Hasegawa, 2018). Los metabolitos secundarios son compuestos químicos con una distribución restringida en los seres vivos, a diferencia de los denominados metabolitos primarios (como los azúcares, los lípidos o las proteínas) cuya presencia es ubicua (Alberto, 2006). De esta forma, los metabolitos secundarios pueden estar presentes únicamente en una familia taxonómica, en un género o incluso en una especie y se generan a partir de reacciones bioquímicas específicas que parten de las rutas metabólicas primarias (Dewick, 2009).

El papel de los metabolitos secundarios dentro del organismo que los produce es variado, pueden ser simplemente productos finales de desecho o bien cumplir funciones específicas, como por ejemplo ser mecanismos de defensa ante depredadores, participar en la regulación del crecimiento o intervenir en los procesos de reproducción (Krishnaswamy, 2021). Independientemente de

las funciones naturales que tienen este conjunto de compuestos, el hombre, a lo largo de su historia, ha hecho uso de los productos naturales para diversos fines, como, por ejemplo: en la búsqueda de alivio para sus enfermedades o bien como fuente de esencias y sabores para productos alimenticios y de cosmética (Nahar & Sarker, 2020).

Ejemplos de productos naturales, son el limoneno (**1**), la quercetina (**2**) y la teobromina (**3**), los cuales se encuentran en plantas de uso común. El limoneno, pertenece al grupo de los compuestos químicos denominados como terpenos, específicamente es un monoterpreno, que se descubrió inicialmente en el limón (*Citrus limon* L.), aunque después se ha identificado su presencia en otras plantas cítricas. Es empleado como aromatizante y posee propiedades antibióticas (Nikfar & Behboudi, 2014). La quercetina por su parte se clasifica dentro del conjunto de los flavonoides y su estructura corresponde al grupo de los flavonoles. Se aisló inicialmente de la cebolla (*Allium cepa* L.) aunque está presente también en otras plantas. Se ha determinado que este flavonoide posee propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Ay et al., 2021). La teobromina es un alcaloide del grupo de las xantinas. Es un compuesto representativo del cacao (*Theobroma cacao* L.) y tiene efectos a nivel de sistema nervioso central como estimulante (Vega & Kwik-Urbe, 2012). Estos tres ejemplos, muestran el potencial que tienen las plantas en cuanto a ser fuente de sustancias químicas con actividad biológica benéfica para el hombre. Las estructuras de los compuestos **1-3** se presentan en la figura 1.

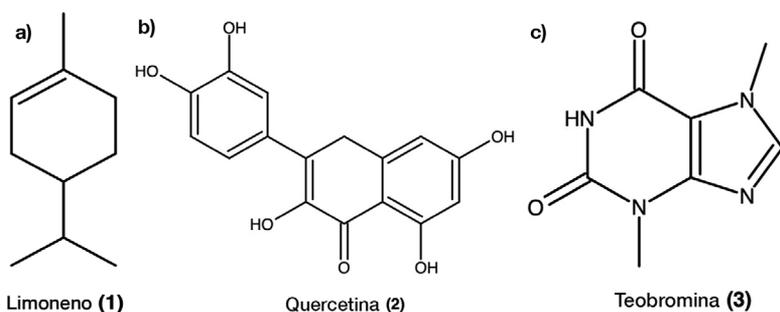


Figura 1. Estructuras químicas y fórmula molecular de: a) limoneno (**1**), b) quercetina (**2**), c) teobromina (**3**), (construcción propia).

Dada la importancia de los metabolitos secundarios presentes en las plantas, el Cuerpo Académico Consolidado (CAC) “Química Orgánica” (UJAT-CA-225) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) dentro de sus líneas de generación y aplicación del conocimiento, incluye el estudio fitoquímico de productos naturales con potencial actividad biológica.

Dentro de esta línea se han desarrollado trabajos de investigación sobre plantas empleadas en la medicina tradicional de Tabasco, con énfasis dirigido hacia diferentes estrategias de acción, como se presenta en la figura 2.

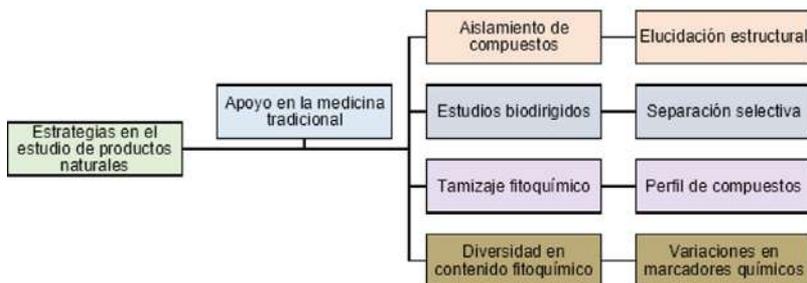


Figura 2. Esquema general de estrategias empleadas en el estudio de productos naturales por parte del CAC Química Orgánica. (Construcción propia).

De esta forma, la estrategia general para el estudio de los productos naturales realizada en el interior de este Cuerpo Académico se apoya en el conocimiento de la medicina tradicional de Tabasco, siendo las fuentes de información las actividades de investigación de campo realizadas, así como la consulta de fuentes bibliográficas especializadas. Así, es posible identificar plantas que se han empleado en la herbolaria tabasqueña para el alivio o tratamiento de diversas afecciones y con ello centrar el interés en conocer aspectos relacionados con su composición fitoquímica. A partir de este conocimiento tradicional, la investigación desarrollada en el Cuerpo Académico se ha dirigido a través de cuatro vertientes principales.

La primera de ellas se ha dedicado al aislamiento y caracterización de compuestos químicos a partir de plantas, esta aproximación ha sido sin duda la estrategia clásica en el estudio de los productos naturales. La búsqueda y caracterización estructural de los denominados principios activos ha llevado a la aplicación

de técnicas analíticas de separación y elucidación estructural que constituye por sí misma un área de investigación sumamente fortalecida (Majik et al, 2019).

La segunda vertiente se ha centrado en los denominados enfoques biodirigidos (Zhao, Ch. L. et al, 2022), en donde se determinan los extractos y fracciones cromatográficas que presentan una actividad biológica específica, con la finalidad de realizar procesos de separación selectiva de compuestos químicos.

Por otro lado, la tercera vertiente se ha aplicado en especies vegetales en donde la información disponible sobre su composición fitoquímica es escasa, por lo que se ha dirigido la atención hacia la definición del perfil fitoquímico general de una planta, empleando para ello procesos de tamizaje y técnicas analíticas que permitan tener una idea general de los tipos de metabolitos secundarios presentes en la misma (Mandal et al, 2015).

Por último, la cuarta vertiente de trabajo se ha enfocado a los casos en donde se asocia la actividad biológica de una planta con la presencia de metabolitos secundarios específicos, denominados marcadores químicos. estudiando la variabilidad de estos en relación con las diferentes regiones geográficas en donde crece una planta medicinal, lo cual es útil para establecer estrategias encaminadas a un uso racional de las mismas (Anugraha et al, 2022).

Vale la pena resaltar que el enfoque que puede darse al estudio de las plantas medicinales es diverso y los cuatro ejes estratégicos que se han descrito no son limitativos; sin embargo, incluyen de manera general las líneas de acción que el CAC “Química Orgánica” ha desarrollado en sus proyectos de investigación fitoquímica. Derivado de lo anterior, el objetivo de esta contribución es presentar cuatro ejemplos representativos de las estrategias de acción antes descritas y que muestran las diversas aproximaciones que el Cuerpo Académico ha realizado en el estudio de las plantas medicinales tabasqueñas.

2. Presentación de las estrategias

2.1. Aislamiento de Homoisoflavonoides y chalconas de *Haematoxylum campechianum* L.

El palo tinto o palo de Campeche, cuyo nombre científico es *Haematoxylum campechianum* L., es una planta nativa de la región de América Central (Ya-

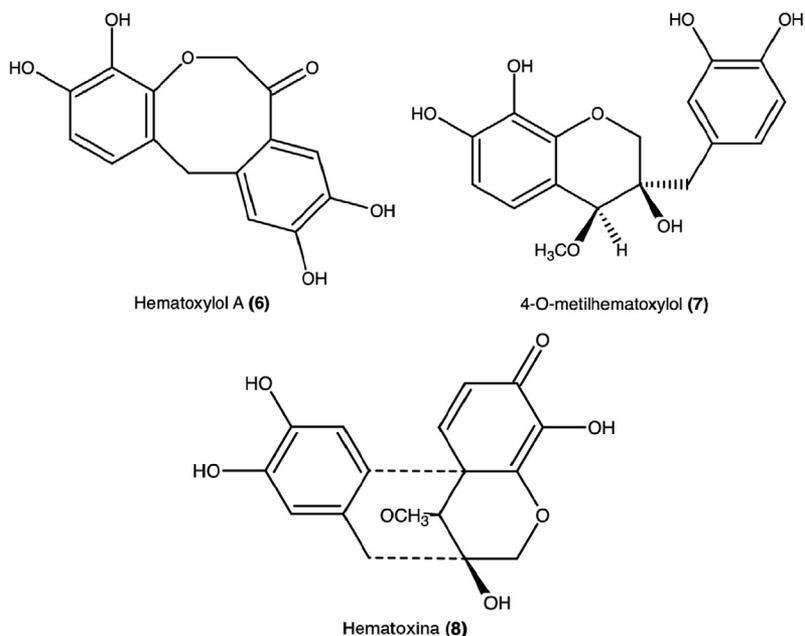


Figura 4. Estructuras químicas de los homoisoflavonoides **6**, **7** y **8**, aislados del extracto metanólico del duramen de la corteza de *H. campechianum* L. (Construcción propia a partir de los datos de Escobar-Ramos et al., 2017).

El proceso de elucidación estructural de los compuestos **4-8**, se realizó empleando Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de ¹H y ¹³C, empleando tanto experimentos unidimensionales como bidimensionales de correlación homonuclear (COSY y NOESY) como heteronuclear (DEPT-Q, HSQC y HMBC). Para el caso de los compuestos **4** y **5**, las correlaciones obtenidas a partir del espectro HMBC permitieron la asignación de las diferentes posiciones en ambas estructuras; la figura 5 muestra correlaciones importantes encontradas empleando este experimento.

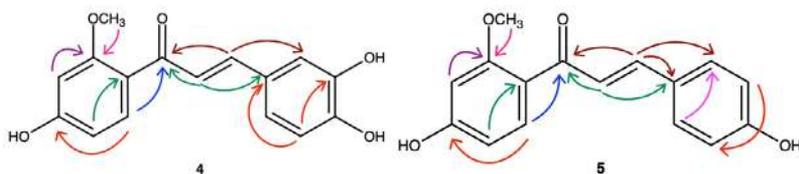


Figura 5. Principales correlaciones heteronucleares encontradas mediante el experimento HMBC en los compuestos **4** y **5**. (Construcción propia a partir de los datos de Escobar-Ramos et al., 2017).

Cabe señalar que los compuestos **4** y **5**, así como los derivados acetilados de **6** y **8**, mostraron actividad espasmolítica moderada al probarse en el modelo *in vitro* de contracción inducida en íleo de cobayo (Lozoya et al., 1990), mientras que un estudio desarrollado por el grupo de trabajo confirmó la actividad ansiolítica en un modelo *in vivo* (Escobar-Ramos et al, 2022).

En conjunto, se logró la elucidación estructural correcta de cinco compuestos tipo flavonoide aislados del duramen de *H. campechianum* L., mediante espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear. De los cinco compuestos aislados, las chalconas **4** y **5** y los derivados acetilados de los homosiflavonoides **6** y **8**, mostraron actividad biológica que contribuye a corroborar el uso tradicional de esta planta en procesos de ansiedad (Escobar-Ramos et al, 2022).

2.2. Estudio biodirigido de *Acalypha arvensis* POEPP ENDL

Conocida en el estado de Tabasco como “hierba de la araña”, *Acalypha arvensis* Poepp Endl, pertenece a la familia de las Euforbiáceas y se distribuye desde México hasta América del Sur (Méndez Gómez et al, 2004). Existen diversos reportes de uso tradicional de esta planta en padecimientos como: afecciones diarreicas, vómitos, problemas en la piel como escabiosis o dermatitis, y el tratamiento de heridas (Argueta, 1994; Duke, 2008). Estudios previos reportados para extractos etanólicos de hojas y flores de esta planta, mostraron actividad inhibitoria contra el crecimiento de enterobacterias patógenas para el humano como *Salmonella typhi*, así como para bacterias Gram positivas causantes de infecciones respiratorias como *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae* y *Streptococcus pyogenes* (Cáceres et al, 1990; Cáceres et al 1991).

Si bien en esta planta se ha identificado la presencia de grupos de metabolitos secundarios como: flavonoides, antocianinas, antraquinonas, cumarinas, entre otros, no se ha llegado a un consenso de las moléculas bioactivas responsables de la actividad antibiótica reportada (Jiménez et al, 2005). Tomando en consideración estos antecedentes y fundamentándose en la necesidad actual para encontrar nuevos agentes antimicrobianos (Giono-Cerezo, et al, 2020), mediante un trabajo colaborativo entre el CA Química Orgánica, el CIBIS-IMSS, el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Autónoma de Guerrero (LT-UA-Gro) y el Departamento de Química y Física de la Florida Gulf Coast University (DFQ-FGCU), Blé-González y colaboradores reportaron en el año 2022, un estudio biodirigido de *Acalypha arvensis* Poepp Endl (*Euphorbiaceae*), en donde se evaluó la actividad contra microorganismos resistentes a metilicina empleando la técnica estándar de dilución en agar (García Hernández et al, 2019) y se aislaron por métodos cromatográficos metabolitos secundarios a los cuales es posible atribuir esta bioactividad.

El protocolo seguido en este estudio, fue realizar pruebas de actividad antimicrobiana contra 13 cepas bacterianas ATCC, iniciando con tres extractos de las hoja de *Acalypha arvensis* Poepp Endl, empleando disolventes de polaridad creciente: hexano (**E1**), acetato de etilo (**E2**) y etanol (**E3**); una vez identificado el extracto más activo, se efectuó una primera separación cromatográfica que generó cinco reuniones **R1-R5**, las cuales fueron nuevamente evaluadas en su actividad antibiótica, para posteriormente realizar un segundo procedimiento cromatográfico de la reunión activa con mayor rendimiento (**R4**), las fracciones cromatográficas **F1-F37** fueron igualmente evaluadas y, a partir del conjunto de fracciones activas, se llegó al aislamiento de los compuestos **9-16**. Un resumen del protocolo empleado se presenta en la figura 6.

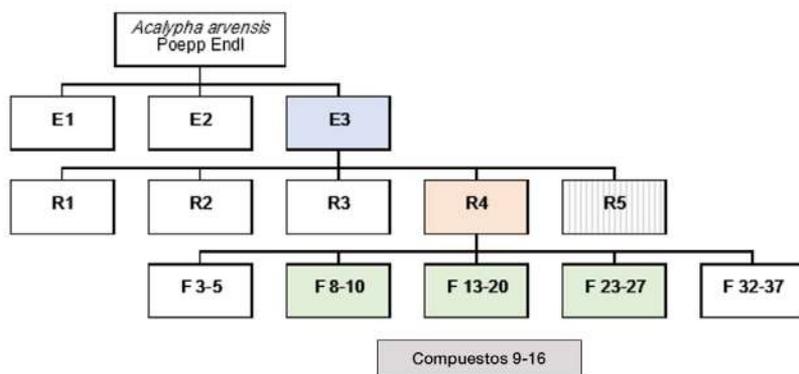


Figura 6. Protocolo general del estudio biodirigido de *Acalypha arvensis* Poepp Endl, se resaltan en color: el extracto, la reunión y las fracciones bioactivas que permitieron el aislamiento de los compuestos 9-16. (Construcción propia a partir de los datos de Blé-González et al., 2022).

Cabe señalar que, de las 13 cepas bacterianas probadas, **E3** mostró actividad antibacteriana contra bacterias grampositivas: *Staphylococcus aureus* (cepa ATCC: 29213), dos cepas ATCC de *Staphylococcus aureus* resistentes a meticilina (4300 y 3359) y *Staphylococcus epidermidis* (cepa ATCC: 1042); así como contra tres bacterias gramnegativas: dos cepas ATCC de *Klebsiella pneumoniae* (13883 y 700605) y *Pseudomona aeruginosa* (cepa ATCC: 27853). En todos los casos la concentración mínima inhibitoria (CMI) fue menor a 2 mg/mL.

En el caso de las reuniones, se observó que **R4** y **R5** presentaron actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* (cepa ATCC: 29213) con CMI de 1.0 y 0.5 mg/mL respectivamente, mientras que para *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (cepa ATCC: 4300) ambas reuniones presentaron una CMI menor a 0.5 mg/mL. Como ya se mencionó, el fraccionamiento cromatográfico se realizó sobre **R4** en virtud de que fue la reunión que obtuvo el mayor rendimiento. Estructuras de cinco compuestos aislados de esta reunión, se presentan en la figura 7.

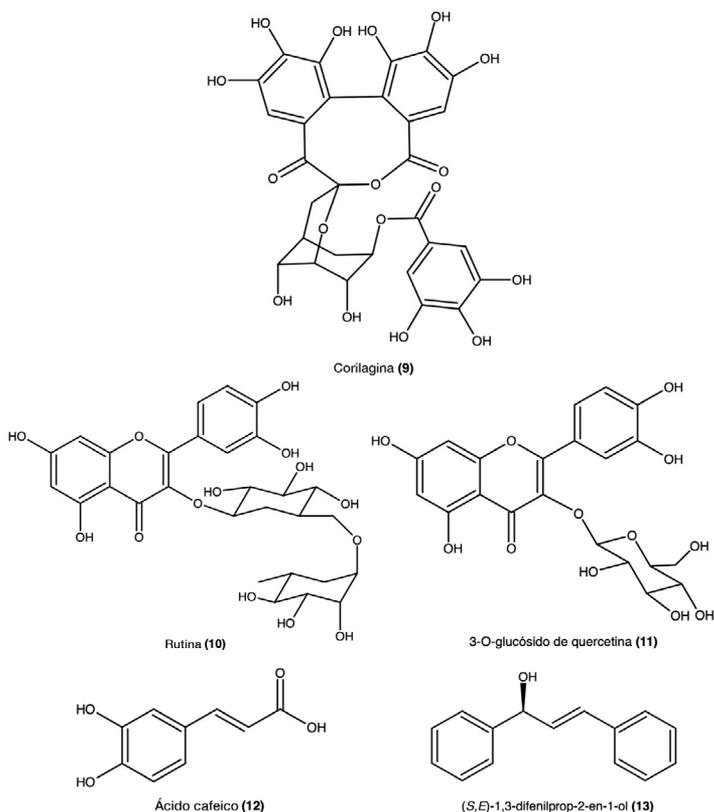


Figura 7. Estructuras de la lactona **9**, los flavonoides **10-11** y los fenilpropanoides **12-13**, aislados de la reunión bioactiva **R4** del extracto etanólico de *Acalypha arvensis* Poepp Endl. (Construcción propia a partir de los datos de Blé-González et al., 2022).

Debe destacarse que la caracterización estructural de **9** y **10** se llevó a cabo mediante estudios de RMN de ^1H y ^{13}C uni y bidimensional, mientras que la identificación de **11-13** se realizó mediante la comparación con estándares, empleando Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia con Detector de Arreglo de Diodos (HPLC-DAD, por sus siglas en inglés). Con ello, se encontró que los compuestos aislados corresponden a la lactona corilagina (**9**); los flavonoides: rutina (**10**) y 3-O-glucósido de quercetina (**11**), además de los fenilpropanoides: ácido cafeico (**12**) y (*S,E*)-1,3-difenilprop-2-en-1-ol (**13**).

Este reporte es el primero en donde se indica la presencia de corilagina (**9**) en una planta del género *Acalypha*. Estudios previos para este compuesto indican que posee actividad antibacteriana contra cepas de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas pneumoniae* con una concentración mínima inhibitoria de 1024 pg/mL (Kolodziej et al., 1999), lo que permite atribuirle la bioactividad encontrada en este estudio; aunque no puede descartarse el hecho de que, probablemente, se presente un fenómeno de sinergia entre los diferentes componentes presentes en *Acalypha arvensis* Poepp Endl, dado que otras sustancias aisladas también presentan actividad antibacteriana, tal es el caso de los derivados tipo flavonoide **10** y **11** y de los fenilpropanoides **12** y **13** (Kumar y Pandey, 2013; Miao & Xiang, 2020).

2.3. Estudio del perfil fitoquímico de *Inga jinicuil* SCHLTDL & CHAM. EX G. DON

Existen plantas que a pesar de ser ampliamente aprovechadas por los diversos beneficios que son capaces de proporcionar, han sido poco estudiadas desde el punto de vista químico. Tal es el caso de *Inga jinicuil* Schltdl & Cham. ex G. Don; conocido en México como cuijinicuil, cuajicuil o jinicuil, en Tabasco, la etnia yokot'an lo identifica como bujte (Magaña et al., 2010; Vargas & Pire, 2017). Se trata de un árbol multipropósito, ya que sus frutos son comestibles, sirve de sombra en cultivos de cacao o café, al contar en sus raíces con una asociación simbiótica con microorganismos fijadores de nitrógeno que ayuda al enriquecimiento del suelo (Hernández Vázquez et al., 2012) y su madera suele ser utilizada para la construcción de viviendas en comunidades rurales del trópico mexicano.

Además, se ha empleado en la medicina tradicional para el tratamiento de enfermedades infecciosas, en el estado de Tabasco es utilizada la infusión de corteza y vainas para aliviar trastornos gastrointestinales (Maldonado, 2005). Sin embargo, la atención que ha recibido esta planta en cuanto al conocimiento de su fitoquímica y actividad biológica es escasa, por ello se planteó realizar un análisis del perfil fitoquímico preliminar de la corteza y las hojas de *Inga jinicuil* Schltdl & Cham. ex G. Don, trabajando de manera coordinada el CAC “Química Orgánica” y el CIBIS-IMSS, con el apoyo del LT-UAGro y el DFQ-FGCU. Los resultados fueron publicados por Gallegos-García y colaboradores en el año 2022.

En este reporte, se presentó el análisis cromatográfico de los extractos orgánicos de la corteza y hojas de la planta de estudio. Para ello, dentro del procedimiento general, se obtuvieron por maceración exhaustiva, en orden de polaridad ascendente, los extractos hexánicos de corteza y hojas (**IjCHex** e **IjHHex**), los extractos diclorometánicos (**IjCD** e **IjHD**) y por último los hidroalcohólicos de los dos órganos de la planta (**IjCHa** e **IjHHa**).

Para el caso de los extractos **IjCHex** e **IjHHex**, al ser de menor polaridad, se analizaron empleando la técnica de cromatografía de gases en fase normal, acoplada a espectrometría de masas. Mientras que para los extractos de polaridad media (**IjCD** e **IjHD**) y alta (**IjCHa** e **IjHHa**), se empleó la cromatografía en fase reversa empleando HPLC-DAD.

En el análisis de **IjCHex** e **IjHHex** se encontraron un total de veintiún compuestos, diez de ellos en la corteza y once en las hojas. El patrón de fragmentación de los espectros de masas correspondientes a cada pico se comparó con los datos de la biblioteca del National Institute of Standards and Technology (NIST) para realizar una asignación preliminar. Los compuestos mayoritarios identificados en *Inga jinicuil* Schltdl & Cham. ex G. Don, fueron respectivamente: para corteza el α -tocoferol (**14**) y para hojas el esteroide 24-metilencicloartan-3-ona (**15**). Es pertinente señalar que ambos compuestos no habían sido reportados previamente en ninguna especie del género *Inga*. Las estructuras de los mismos se presentan en la figura 8.

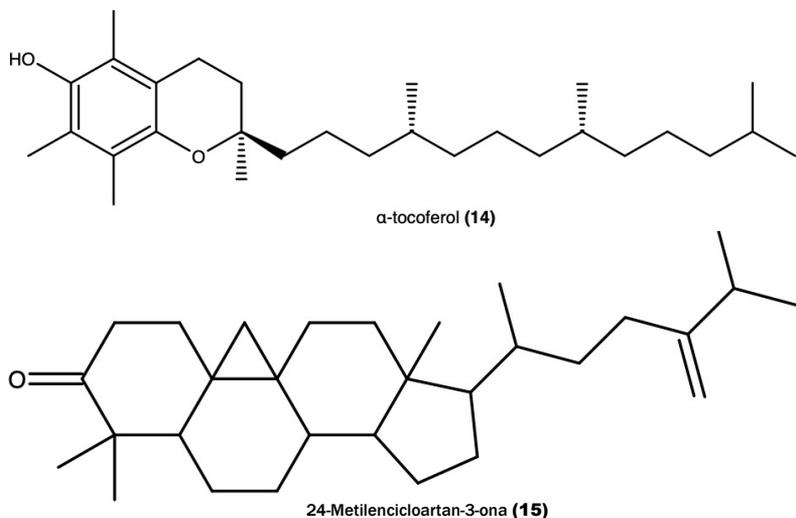


Figura 8. Estructuras de α -tocoferol **14** y el esteroide metilencicloartan-3-ona **15**, identificados respectivamente en los extractos hexánicos de corteza y hojas de *Inga jinicuil* Schldt & Cham. ex G. Don. (Construcción propia a partir de los datos de Gallegos-García et al., 2022).

Además de estos dos compuestos mayoritarios, en los extractos de baja polaridad de corteza y hojas de la planta de estudio, se encontraron también terpenos y compuestos alifáticos de cadena larga que coinciden con lo reportado para otras especies del género *Inga*, como *I. edulis*, *I. laurina* e *I. semialata* (Lima et al., 2020; Lima et al., 2022, Furtado et al., 2014).

El análisis cromatográfico de los extractos de polaridad media y alta (**IjCD**, **IjHD**, **IjCHa** e **IjHHa**) reveló la presencia de un total de veintiún compuestos de los cuales, ocho se encontraron exclusivamente en los extractos de la corteza, seis se encontraron exclusivamente en los extractos de hojas y los siete restantes fueron identificados en ambos órganos de la planta. Se utilizaron estándares para comparar los tiempos de retención y las bandas de absorbancia en los espectros ultravioleta de los picos cromatográficos encontrados, con lo que fue posible la asignación estructural preliminar de los compuestos. Así, por ejemplo, en el caso de la corteza se determinó la presencia de derivados de ácido protocatecuico (**16**) y ácido gálico (**17**). En el caso de las hojas se identificó a un derivado de apigenina (**18**) y un derivado de ácido vanílico (**19**). Mientras que, tanto en corteza como

en hojas, se encontraron presentes derivados de ácido salicílico (**20**). Las estructuras se presentan en la figura 9.

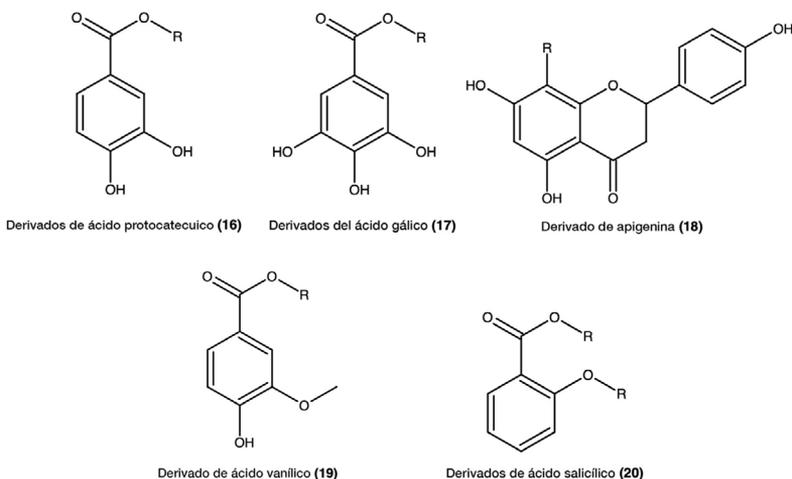


Figura 9. Estructuras de los derivados **16-20**, identificados en los extractos de polaridad media y alta de corteza y hojas de *Inga jinicuil* Schltld & Cham. ex G. Don. (Construcción propia a partir de los datos de Gallegos-García et al., 2022).

Cabe señalar que, además de los perfiles fitoquímicos definidos por los métodos cromatográficos, en este reporte se incluyeron también los resultados de pruebas de actividad biológica realizadas para los extractos obtenidos de corteza y hojas de *Inga jinicuil* Schltld & Cham. ex G. Don. En este sentido, se encontró que los seis extractos mostraron actividad antiinflamatoria de moderada a buena en el modelo de inflamación de edema en la oreja de ratón inducida por TPA descrito por Salazar et al. (2017). Además, cinco de los extractos analizados (**IjCH**, **IjCD**, **IjHD**, **IjCHa** e **IjHHa**) presentaron actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (CMI de 50 µg/mL) y contra *Pseudomona aeruginosa* (CMI menor a 3.12 µg/mL) empleando el modelo de microdilución en placa como lo describen Salazar et al. (2017).

En su conjunto, los resultados preliminares, tanto del perfil fitoquímico como de actividad biológica, se encuentran articulados y apoyan el uso tradicional que se le ha dado a esta planta en el tratamiento de infecciones gastrointestinales. Las actividades biológicas evaluadas se correlacionan con la presencia de compuestos

químicos como son **18**, **21** o **23**, de los cuales se ha reportado su actividad en procesos inflamatorios o contra el crecimiento microbiano (Hussain et al., 2009; Renuka et al., 2016; Nogueira et al., 202; Lima et al., 2022).

2.4. Estudio de variabilidad fitoquímica en *Cecropia spp.*

El término marcador químico se ha acuñado para referirse a aquellos constituyentes (ya sea un metabolito secundario en específico o un grupo de metabolitos) presentes en una planta medicinal y que tienen una actividad terapéutica conocida (Waris et al., 2022). Los marcadores químicos pueden ser empleados en estudios de identificación y cuantificación de preparados herbolarios derivados de la planta en donde están presentes (OMS, 2007).

Para que un compuesto o grupo de compuestos pueda entrar en la clasificación de marcador químico de una planta medicinal, es necesario que cumpla con una serie de criterios, tales como: a) existencia de estudios que confirmen actividades biológicas específicas, las cuales preferentemente deberán estar relacionadas con el uso tradicional de la planta en la cual se encuentran; b) se cuenta con métodos analíticos para su cuantificación; c) se prioriza el o los marcadores químicos con presencia restringida en una planta específica, d) la presencia de los marcadores químicos debe ser en concentraciones por arriba de los 50 µg/g de material vegetal seco (Bensoussan et al., 2015).

La aplicación de los criterios de identidad dados por los marcadores químicos proporciona entonces un grado de certeza y confiabilidad en el uso de preparados herbolarios, al contar con referentes cuantitativos que permitan regular un uso racional de los mismos.

Por otro lado, es necesario hacer notar que la producción de metabolitos secundarios por parte de una planta está sujeta a variaciones derivadas de la respuesta del vegetal ante diversos agentes externos como pueden ser la actividad antropogénica, los factores ambientales, la presencia o ausencia de depredadores, entre otros (Esmailia et al., 2019).

Por lo anterior, resulta frecuente que se encuentren diferencias en el contenido de metabolitos secundarios en plantas del mismo género que han sido colectadas en diferentes regiones, en una misma región, pero en diferentes épocas del

año o inclusive en los mismos especímenes en diferentes etapas de crecimiento (Yousefzadeh et al., 2021).

Dada la importancia de los marcadores químicos como elementos de apoyo para un manejo adecuado de los remedios herbolarios y considerando al mismo tiempo las posibles diferencias en el contenido fitoquímico de una planta medicinal, se desarrolló un estudio para determinar la variabilidad fitoquímica intra e inter-especies de plantas del género *Cecropia* spp. del estado de Tabasco.

En este trabajo participaron el CAC Química Orgánica, el CIBIS-IMSS y el Departamento de Física Aplicada de la Unidad Mérida del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, con la colaboración del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Laboratorio de Genómica de la División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez de la UJAT. Los resultados fueron publicados por Medrano-Sánchez y colaboradores en el año 2023.

El género *Cecropia* está constituido por 61 especies que se distribuyen en las zonas tropicales del continente americano la mayoría de ellas se identifican con el término “guarumo” o variantes de éste como “guarumbo” o “yarumbo” (Berg y Franco, 2005). Particularmente en el estado de Tabasco, la etnia yokot’an la identifica como “k’olok” (Magaña-Alejandro et al., 2019).

Esta planta ha sido empleada en la medicina tradicional de diversas culturas en el tratamiento de la hipertensión, procesos inflamatorios y diabetes (Vidrio et al., 1982; Pérez-Guerrero et al., 2001), también hay reportes del uso de plantas del género *Cecropia* en el tratamiento de la malaria (Rivera-Mondragón, 2019). En el estado de Tabasco están presentes dos especies de este género: *C. peltata* y *C. obtusifolia*, las cuales se han utilizado indistintamente en el tratamiento de la diabetes (Nicasio, 2005).

Se han identificado a cuatro sustancias como marcadores químicos potenciales para este género (Rivera Mondragón et al., 2017): el ácido clorogénico (**21**) que es un derivado del ácido cinámico, además de cuatro flavonoides: isoorientina (**22**), orientina (**23**) y vitexina (**24**), cuyas estructuras se muestran en la figura 10.

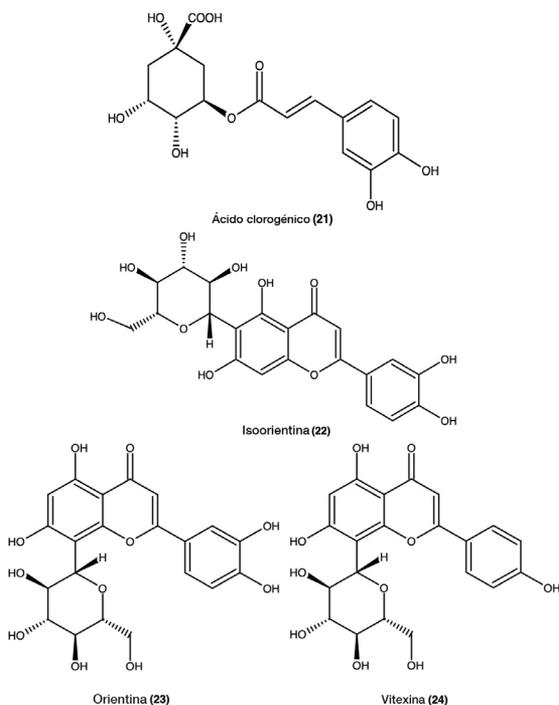


Figura 10. Estructuras de los marcadores químicos: ácido clorogénico **21** y los flavonoides **22-24**, propuestos para *Cecropia sp.* (Construcción propia a partir de los datos de Medrano-Sánchez et al., 2023).

En este trabajo, se determinó el contenido de marcadores químicos totales (**CMQT**), además del contenido de polifenoles y flavonoides totales (**CPT** y **CFT** respectivamente) en los extractos hidroalcohólicos de especímenes de *Cecropia sp.* recolectados en las cinco subregiones del estado de Tabasco. Cuatro de los especímenes fueron identificados taxonómicamente como *Cecropia peltata* y correspondieron a: subregión Centro (**Cp1**), subregión Chontalpa (**Cp2**), subregión Pantanos (**Cp3**) y subregión Ríos (**Cp4**). Se trabajó además con un espécimen identificado taxonómicamente como *Cecropia obtusifolia* correspondiente a la subregión Sierra (**Co5**). La cuantificación de los marcadores químicos se realizó mediante HPLC-DAD, mientras que para polifenoles y flavonoides se emplearon métodos espectrofotométricos. La ubicación de los sitios de recolección de especímenes y los contenidos totales de los grupos de metabolitos secundarios analizados se presentan en la figura 11.

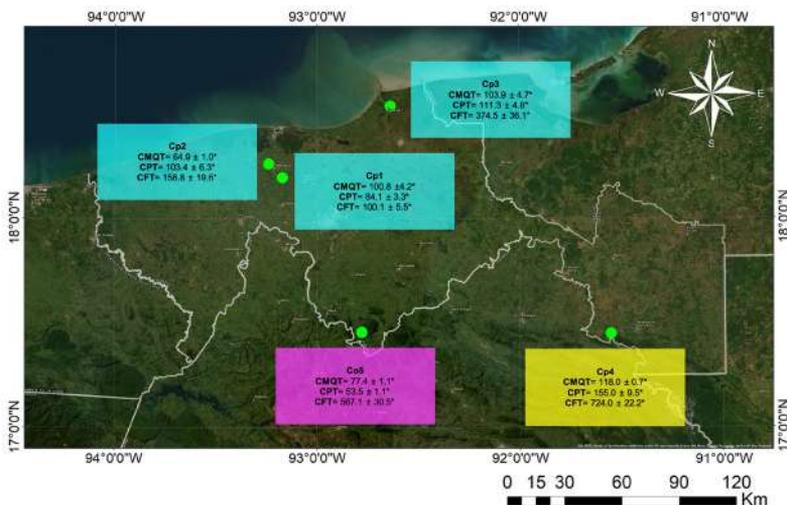


Figura 11. Distribución geográfica de las muestras de *Cecropia sp.* analizadas (Cp1-Cp4 y Co5). Se muestran los promedios y desviaciones estándar de las concentraciones totales de metabolitos cuantificados (n=3). *Claves: **CMQT**= contenido de marcadores químicos totales (mg/g de extracto); **CPT**= contenido de polifenoles totales (mg equivalentes de ácido gálico/g de extracto); **CFT**=contenido de flavonoides totales (mg equivalentes de rutina/g de extracto). (Construcción propia a partir de los datos de Medrano-Sánchez et al., 2023).

El análisis estadístico (ANOVA seguido de prueba Tukey con un nivel de confianza del 95%), mostró que es posible integrar los especímenes en tres grupos en función de las concentraciones de metabolitos secundarios encontradas. En primer término, el espécimen de *C. obtusifolia* Co5 de la subregión Sierra, presenta valores para **CMQT**, **CPT** y **CFT** estadísticamente diferentes a los encontrados para todas las muestras de *C. peltata*, caracterizándose por presentar niveles relativamente bajos en **CMQT** y **CPT**, aunque no para **CFT**.

En el caso de los cuatro especímenes de *C. peltata*, Cp4 de la subregión Ríos se diferenció de las otras tres subregiones, presentando los niveles más altos de **CMQT**, **CPT** y **CFT**. El tercer agrupamiento se dio entre las muestras de las subregiones Centro, Chontalpa y Pantanos; de manera general se observaron diferencias estadísticamente significativas entre Cp1 y Cp2, pero no entre cada una de ellas al compararse con Cp3. Cabe mencionar que además de estas deter-

minaciones, se realizó un análisis metabolómico por RMN de ^1H de los cinco extractos hidroalcohólicos, el análisis de componentes principales mostró las mismas tendencias en las diferencias interespecie al distinguir las señales de **Co5** de los patrones correspondientes a las otras muestras y marcando también diferencias intraespecie al separar el patrón de señales para **Cp4** de los correspondientes a las otras muestras de *C. peltata*.

Los resultados encontrados muestran la plasticidad de las especies vegetales para adecuar la generación de metabolitos secundarios generando variaciones en su contenido fitoquímico. Para los mismos conjuntos de sustancias, las diferencias pueden darse a nivel intra e interespecie. Las razones por las cuales se generan estos cambios son complejas y diversas, aunque se reconoce que están en función del ambiente y los factores externos que rodean a una planta en particular (Borokini & Ayodele, 2012; Butkute et al., 2019).

3. Discusión y conclusiones

Retomando el objetivo inicial de esta contribución, se ha realizado un análisis de las cuatro vertientes hacia las que el CAC Química Orgánica ha dirigido el estudio de las plantas medicinales tabasqueñas. En general todas parten de una valoración del patrimonio cultural que viene de las prácticas ancestrales que han empleado a la naturaleza, de una manera sabia, para mitigar, reparar o resolver diferentes problemáticas a las que se enfrenta la humanidad en su ejercicio cotidiano. Esta valoración cultural de las plantas que curan no se queda en la contemplación, sino que a partir de ella se dirigen esfuerzos encaminados a incrementar el conocimiento científico alrededor de las mismas.

Así, se busca aislar de las plantas compuestos específicos con actividades biológicas definidas; se corrobora el uso tradicional de las plantas, aplicando procesos analíticos y pruebas biológicas encaminadas a demostrarlo; se brindan nuevas perspectivas en el caso de especies poco estudiadas para desarrollar panoramas generales de perfiles fitoquímicos y se busca comprender la complejidad de la variabilidad fitoquímica que logre coadyuvar hacia un desarrollo de prácticas racionales en la herbolaria.

Como se ha presentado en los ejemplos tratados a lo largo del capítulo, el trabajo colaborativo, multi e interdisciplinario es fundamental. La complejidad de los problemas a los que se enfrenta la comunidad científica hace imposible el trabajo individual y se requiere el esfuerzo conjunto, a través de la suma de fortalezas para la consecución apropiada de los objetivos.

El universo de las plantas medicinales es vasto y requiere dedicación y empeño, hay mucho que hacer en este fascinante mundo y las perspectivas se van incrementando. Existen retos que ya se están explorando tales como: la optimización de métodos de extracción y procedimientos analíticos, la extrapolación de la información fitoquímica de las plantas medicinales hacia los preparados herbolarios destinados ya al consumo humano y la interrelación entre la expresión genética de las especies vegetales con el contenido químico que presentan. Todas estas acciones permitirán, sin duda, que paso a paso se vaya construyendo el edificio del conocimiento que brinde mayor fortaleza al uso de las plantas medicinales en Tabasco.

Referencias bibliográficas

- Alberto, M. J. (2006). *Química de los Productos Naturales*. Editorial Síntesis.
- Anugraha, A. C., Thomas, T. y Thomas T. D. (2022). Multiomics approach in medicinal plants. En: Rout, G. R. y Peter, K. V. (Eds.) *Omics in horticultural crops* (pp. 589-602). Elsevier. Academic Press.
- Argueta, A.L., Cano, L., Asselein, L. y Rodarte, M. E. (1994). *Atlas de las Plantas de la Medicina Tradicional Mexicana*. Instituto Nacional Indigenista.
- Ay, M., Charli, A., Jin, H., Anantharam, V., Kanthasamy, A. y Khantasamy, A. G. (2021). Quercetin. En: R. C. Gupta, R. Lall y A. Srivastava (Eds.). *Nutraceuticals: Efficacy, safety and toxicity* (2nd. Ed.) (pp. 749-755). Elsevier. Academic Press.
- Bensoussan, A., Lee, S., Murray, C. Burchier, S., van der Kooy, F., Pearson, J. L., Chang, D. y Khoo, C. S. (2015) Choosing chemical markers for quality assurance of complex herbal medicines: Development and application of

- the herb MaRS criteria. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*. 97(6), 628-640.
- Berg, C. C. y Franco, P. (2005). *Cecropia. Flora Neotropica Monograph 94*. The New York Botanical Garden Press.
- Ble-González, E. A., Gómez-Rivera, A., Zamilpa, A., López-Rodríguez, R., Lobato-García, C.E., Álvarez-Fitz, P., Gutierrez-Roman, A .S., Perez-García, M. D., Bugarin, A., y González-Cortazar, M. (2022). Ellagitannin, Phenols, and Flavonoids as Antibacterials from *Acalypha arvensis* (Euphorbiaceae). *Plants*. 11, 300. <https://doi.org/10.3390/plants11030300>
- Borokini, T. I. y Ayodele, A. E. (2012). Phytochemical Screening of *Tacca leontopetaloides* (L.) Kuntze Collected from Four Geographical Location in Nigeria. *International Journal of Modern Botany*, 2(4): 97-102.
- Butkute, B., Taujenis, L. y Norkeviciene, E. (2019). Small-Seeded Legumes as a Novel Food Source. Variation of Nutritional, Mineral and Phytochemical Profiles in the Chain: Raw Seeds-Sprouted Seeds-Microgreens. *Molecules*, 24: 133
- Cáceres, A., Alvarez, A.V., Ovando, A.E. y Samayoa, B. E. (1991), Plants used in Guatemala for the treatment of respiratory diseases. 1. Screening of 68 plants against gram-positive bacteria. *J. Ethnopharmacol.* 31, 193–208.
- Cáceres, A., Cano, O., Samayoa, B. y Aguilar, L. (1990). Plants used in Guatemala for the treatment of gastrointestinal disorders. 1. Screening of 84 plants against enterobacteria. *J. Ethnopharmacol.* 30, 55–73.
- Dewick, P. M. (2011). *Medicinal Natural Products: A Biosynthetic Approach* (3rd ed.). Wiley.
- Duke, J.A. (2008). *Duke's Handbook of Medicinal Plants of Latin America*. CRC Press.
- Escobar-Ramos, A., Lobato-García, C. E., Zamilpa, A., Gómez-Rivera, A., Tortoriello, J. y González-Cortazar, M. (2017). Homoisoflavonoids and Chalcones Isolated from *Haematoxylum campechianum* L., with Spasmolytic Activity. *Molecules*. 22, 1405; doi:10.3390/molecules22091405

- Escobar-Ramos, A., Gómez-Rivera, A., Lobato-García, C.E., Zamilpa, A., Ble-González, E. A., González-Cortazar, M., Gallegos-García, A.J. y Herrera-Ruiz, M. (2022). Anxiolytic effect of the heartwood of *Haematoxylum campechianum* L. and sappanchalcone in an *in vivo* model in mice. *Journal of Ethnopharmacology*, 284, 114764; doi:10.1016/j.jep.2021.114764
- Esmailia, H., Javad, H. A. K., Saharkhiza, M. J. y Samad, Ebrahimic N. (2019). Variation in the phytochemical contents and antioxidant activity of *Glycyrrhiza glabra* populations collected in Iran. *Industrial Crops and Products*, 137: 248-259.
- Furtado, F.B.; de Aquino, F.J.T.; Nascimento, E.A.; de Martins, C.M.; de Moraes, S.A.L.; Chang, R.; Cunha, L.C.S.; Leandro, L.F.; Martins, C.H.G.; Martins, M.M., sa Silva, C. M., Machado, F. y De Oliveira, A. (2014). Seasonal Variation of the Chemical Composition and Antimicrobial and Cytotoxic Activities of the Essential Oils from *Inga laurina* (Sw.) Willd. *Molecules*. 19, 4560–4577.
- Gallegos-García, A. J., Lobato-García, C.E., González- Cortazar, M., Herrera-Ruiz, M., Zamilpa, A., Álvarez-Fitz, P., Pérez-García, M. D., López-Rodríguez, R., Ble-González, E. A., Medrano-Sánchez, E. J., Feldman, M R., Bugarin, A. y Gomez-Rivera, A. (2022). Preliminary Phytochemical Profile and Bioactivity of *Inga jinicuil* Schltld & Cham. ex G. Don. *Plants*. 11, 794.
- García-Hernández, C., Rojo-Rubio, R., Olmedo-Juárez, A., Zamilpa, A., Mendoza-de Gives, P., Antonio-Romo, I. A., Aguilar-Marcelino, L., Arece-García, J., Tapia-Maruri, D. y González-Cortazar, M. (2019). Galloyl derivatives from *Caesalpinia coriaria* exhibit in vitro ovicidal activity against cattle gastrointestinal parasitic nematodes. *Exp. Parasitol.* 200, 16–23.
- Giono-Cerezo, S., Santos-Preciado, J. I., Rayo Morfín-Otero, M. D. Torres-López, F.J. y Alcántar-Curiel, M.D. (2020). Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gac. Med. Mex.* 156, 172–180.
- Grosso, C., Valentao, P., Ferreres, F. y Andrade, P.B. The use of flavonoids in Central Nervous System Disorders. En: Atta-ur-Rahman (ED.) *Current Medicinal Chemistry Vol. 20*(pp. 4694–4719). Bentham Science Publishers.

- Hernández Vásquez E., Campos Ángeles G. V., Enríquez del Valle J. R., Rodríguez-Ortiz G. y Velasco Velasco V. A. (2019). Captura de carbono por *Inga jinicuil* Schltdl. en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3(9), 11-21. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.536>.
- Hussain, M.A.; Badshah, M.; Iqbal, M.S.; Tahir, M.N.; Tremel, W.; Bhosale, S.V.; Sher, M.; Haseeb, M.T. (2009). HPMC-Salicylate Conjugates as Macromolecular Prodrugs: Design, Characterization, and Nano-Rods Formation: Rapid Communication. *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* 47, 4202–4208.
- Jiménez, M., Cruz, S.M. y Cáceres, A. (2005). Determinación de la actividad biocida de cinco especies del género *Acalypha* (*A. guatemalensis*, *A. arvensis*, *A. polystaquia*, *A. hispida* y *A. pseudoalopecurioides*). *Rev. Científica (IIQB USAC)*. 3, 35–38.
- Kolodziej, H., Kayser, O., Latt'e, K.P. y Ferreira, D. (1999). Evaluation of the antimicrobial potency of tannins and related compounds using the microdilution broth method. *Planta Med.* 65, 444–446.
- Krishnawani, N. R. (2021). *Chemistry of Natural Products: A Unified Approach*. Universities Press.
- Kumar, S. y Pandey, A. K. (2013). Chemistry and biological activities of flavonoids: An overview. *Sci. World J.* 2013, 162750.
- Lima, N.M.; Andrade, T.J.A.S.; Silva, D.H.S. (2022). Dereplication of Terpenes and Phenolic Compounds from *Inga edulis* Extracts Using HPLC-SPE-TT, RP-HPLC-PDA and NMR Spectroscopy. *Nat. Prod. Res.* 36, 488–492.
- Lima, N.M.; de Marqui, S.R.; Silva, D.H.S. (2020). Phytochemical, Metabolic Profiling and Antiparasitic Potential from *Inga semialata* Leaves (Fabaceae). *Nat. Prod. Res.* 2020, 1–6.
- Lozoya, X., Becerril, G. y Martínez, M. (1990). Modelo de perfusión intraluminal del íleon del cobayo in vitro en el estudio de propiedades antidiarréicas de la guayaba (*Psidium guajava*). *Arch. Investig. Med.* 21, 155–162.

- Magaña Alejandro, M. A., Gama Campillo, L. M. y Mariaca Méndez, R. (2010). El Uso de las Plantas Medicinales en las Comunidades Maya-Chontales de Nacajuca, Tabasco, México. *Polibotánica*. 29, 213–262.
- Majik, M. S., Gawas, U. B. y Mandrekar, V. K. (2019). Analytical methods for natural products isolation: Principles and applications. En: Nandan, S. y Naik, M. M. *Advances in Biological Science Research* (pp. 395-409). Elsevier. Academic Press.
- Maldonado, M.F. *Flora Medicinal del Estado de Tabasco: Uso, Manejo y Conservación* (2ª ed). Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco.
- Mandal, S. C., Mandal V. y Das, A. K. (2015). Qualitative Phytochemical Screening. En: Mandal, S. C., Mandal, V. y Das A. K. (Eds). *Essentials of Botanical Extraction* (pp.173-185). Elsevier. Academic Press.
- Marcano, D. y Hasegawa, M. (2018). *Fitoquímica Orgánica* (3ª ed.). Universidad Central de Venezuela; Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Masuda, H., Ohtani, K., Mizutani, K., Ogawa, S., Kasai, R. y Tanaka, O. Chemical study on Haematoxylum campechianum: A sweet principle and new dibenz[b,d]oxocin derivatives. *Chem. Pharm. Bull.* 39, 1382–1384.
- Medrano-Sánchez, E. J., Hernández-Bolio, G. I., Lobato- García, C. E., González-Cortazar, M., Antunez-Mojica, M., Gallegos-García, A. J., Barredo-Hernández, C. O., López-Rodríguez, R., Aguilar- Sánchez, N. C. y Gómez-Rivera, A. (2023). Intra- and Interspecies Differences of Two *Cecropia* Species from Tabasco, Mexico, Determined through the Metabolic Analysis and ¹H-NMR-Based Fingerprinting of Hydroalcoholic Extracts. *Plants*, 12, 2440.
- Méndez Gómez, E., López Noverola, U., López Naranjo, J.I., Salaya Domínguez, J.M. y Díaz González, J.A. (2004), *Catálogo de Plantas Medicinales de Uso Actual en el Estado de Tabasco*. Fundación Produce Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Miao, M. y Xiang, L. (2020). Pharmacological action and potential targets of chlorogenic acid. *Adv. Pharmacol.* 87, 71–88.

- Nahar, L. y Sarker, S. D. (2020). Medicinal Natural Products: an introduction. *Annual Reports in Medicinal Chemistry*. 55, 1-44.
- Nicasio, P., Aguilar-Santamaría, L., Aranda, E., Ortiz, S. y González, M. (2005). Hypoglycemic effect and chlorogenic acid content in two *Cecropia* species. *Phyther. Res.* 19, 661–664.
- Nikfar, S., Bebboudi, A. F. (2014). *Limonene*. En P. Wexler (Ed.). *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 78-82). Elsevier.
- Nogueira, K.M.; de Souza, L.K.M.; Medeiros, J.V.R. (2021). Technological Prospection of Anti-Inflammatory Vanilic Acid Activity, with Emphasis on Its Semisynthetic Derivative Isopropyl Vanilate. *Res. Soc. Dev.* 10, e35910313451.
- Norton, S. (1996). The useful plants of dermatology. II. Haematoxylum and hematoxylin. *J. Am. Acad. Dermatol.* 34, 149–151.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2007). WHO Guidelines for assessing quality of herbal medicines with reference to contaminants and residues. World Health Organization.
- Pérez-Guerrero, C., Herrera, M. D., Ortiz, R., de Sotomayor, M. A. y Fernández, M. A. (2001). A pharmacological study of *Cecropia obtusifolia* Bertol aqueous extract. *J. Ethnopharmacol.* 76, 279–284.
- Renuka, B.; Sanjeev, B.; Ranganathan, D. Evaluation of Phytoconstituents of *Caralluma nilagiriana* by FTIR and UV-VIS Spectroscopic Analysis. (2016). *J. Pharmacogn. Phytochem.* 5, 105–108.
- Rivera Mondragón, A., Ortíz, O. O., Bijttebier, S., Vlietinck, A., Apers, S., Pieters, L. y Caballero G. C. (2017). Selection of chemical markers for the quality control of medicinal plants of the genus *Cecropia*. *Pharmaceutical Biology*, 1: 1500-1512.
- Rivera-Mondragón, A., Tuenter, E., Bijttebier, S., Cos, P., Apers, S., Caballero-George, C., Foubert, K. y Pieters, L. (2019). Two new antiplasmodial flavonolignans from the leaves of *Cecropia obtusifolia*. *Phytochem. Lett.* 31, 118–120.

- Salazar-Pineda, D. T.; Castro-Alarcón, N., Moreno-Godínez, M. E.; Nicasio-Torres, M. P., Perez-Hernandez, J. y Alvarez-Fitz, P. (2017). Antibacterial and Anti-Inflammatory Activity of Extracts and Fractions from *Agave cupreata*. *Int. J. Pharmacol.* 13, 1063–1070.
- Vargas, S. G.; Pire, R. (2017). *Inga jinicuil Schtdl: Árbol Multiuso*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Vega, C. y Kwik-Urbe, C. (2012). Theobroma cacao—An Introduction to the Plant, Its Composition, Uses, and Health Benefits. En: N. Garti y N. R. Widlak (Eds.). *Cocoa Butter and Related Compounds* (pp. 35-62). Elsevier. Academic Press.
- Vidrio, H., García-Márquez, F. Reyes, J. y Soto, R.M. (1982). Hypotensive activity of *Cecropia obtusifolia*. *J. Pharm. Sci.* 1982, 71, 475–476.
- Waris, M., Koçak, E., Murat Gonulalan, E., Omur Demirezer, L., Kir, S. y Nemutlu, E. (2022). Metabolomics analysis insight into medicinal plant science. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 157, 116795.
- Yasunaka, K. Abe, F., Nagayama, A., Okabe, H., Lozada-Pérez, L., López-Villafranco, E., Estrada-Muñiz, E., Aguilar, A. y Reyes Chilpa, R. (2005). Antibacterial activity of crude extracts from Mexican medicinal plants and purified coumarins and xanthoncs. *J. Ethnopharmacol.* 97, 293–299.
- Yousefzadeh, S., Abedi, R. y Mokhtassi, B. A., (2021). Which environmental factors are more important for geographic distributions of *Thymus* species and their physio- morphological and phytochemical variation? *Arabian Journal Geosciences*, 14: 1864
- Zhao, Ch. L., Chik, W. I. y Zhang, H. J. (2022). Bioprospecting and bioassay-guided isolation of medicinal plants-A tool for drug discovery. En: Mukherjee, P. K. (Ed.) *Evidence-Based Validation of Herbal Medicine* (pp. 511-537). Elsevier.

Capítulo 3

Cuerpo Académico Bioquímica y Biología Molecular

Identificación de genes de fusión en el cáncer de mama mediante análisis transcriptómico

*Identification of fusion genes in breast cancer
by transcriptomic analysis*

De la Cruz-Cano Eduardo^{1b}, Díaz-Gandarilla José A.^{2b}, González-Garrido José A.^{1a} y López-Victorio Carlos J.^{1a*}

^{1a}Integrante, ^{1b}Colaborador del Cuerpo Académico Bioquímica y Biología Molecular y del Laboratorio de Biología Molecular. Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690, México.

²División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco, Departamento de Laboratorio de Análisis Clínicos. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Comalcalco, Tabasco, C.P. 86650, México.

Autor de correspondencia: Javier.lopez@ujat.mx

Resumen

Los genes de fusión son genes híbridos formados a partir de la yuxtaposición aberrante de dos genes distintos. Estas quimeras pueden formarse como consecuencia de diversas anomalías moleculares que actúan como promotores de la transformación neoplásica y la progresión del cáncer de mama. La importancia biológica de la identificación de los genes de fusión radica primordialmente en que se han convertido en importantes dianas moleculares para monitorear la respuesta a las terapias moleculares, así como biomarcadores diagnósticos para evaluar el pronóstico de los pacientes que sufren de esta condición. En este sentido, las tecnologías de secuenciación de próxima generación han permitido el descubrimiento sistemático de genes de fusión en diversos cánceres humanos. En esta revisión, abordamos aspectos generales de los genes de fusión, mecanismos que conducen a la formación de estas quimeras, limitaciones de las tecnologías NGS en la identificación de los genes de fusión, así como una breve revisión de

los estudios que han identificado genes de fusión en la patogénesis del cáncer de mama.

Palabras claves: genes de fusión; cáncer de mama, secuenciación de transcriptoma.

Abstract

Fusion genes are hybrid genes formed from the aberrant juxtaposition of two different genes. These chimeras can be formed as a consequence of various molecular abnormalities that act as promoters of neoplastic transformation and breast cancer progression. The biological importance of identifying fusion genes lies primarily in the fact that they have become important molecular targets for monitoring response to molecular therapies, as well as diagnostic biomarkers for assessing the prognosis of patients suffering from this condition. In this regard, Next Generation Sequencing technologies have enabled the systematic discovery of fusion genes in several human cancers. In this review, we address general aspects of fusion genes, mechanisms that lead to the formation of these chimeras, limitations of NGS technologies in identifying fusion genes, as well as a brief review of studies that have identified fusion genes in the pathogenesis of breast cancer.

Keywords: Fusion genes; breast cancer; Next Generation Sequencing

1. Introducción

El cáncer de mama es la neoplasia maligna más común en mujeres (Hoxha et al., 2024). Se ha documentado que la inestabilidad genómica de esta enfermedad es una característica molecular distintiva que conduce a reordenamientos cromosómicos que encaminan a la formación de genes de fusión, un subtipo de genes híbridos formados a partir de la yuxtaposición aberrante de dos genes distintos (Duijf et al., 2019; Rasool & Ullah, 2022). Estas quimeras pueden ocurrir tanto a nivel de ADN, como a nivel de ARN, como consecuencia de defectos transcripcionales, como el empalme cis-SAGe y trans (Shi et al., 2021). En este contexto, diversos estudios sobre la influencia de los genes de fusión en la estructura y expresión de los genes han profundizado significativamente nuestra comprensión de la patogénesis del cáncer de mama, identificando numerosos

genes de fusión asociados con el pronóstico del cáncer de mama (Edgren et al., 2011; Kim et al., 2015)

Durante décadas la identificación de reordenamientos cromosómicos se ha apoyado en el uso de técnicas moleculares como la hibridación *in situ* con fluorescencia (FISH)(Chrzanowska et al., 2020; Smail, 2022), la hibridación genómica comparativa (CGH)(Smail, 2022) y la reacción en cadena de la polimerasa con transcriptasa reversa (RT-PCR) (Howarth & Mirza, 2021). Sin embargo, con la llegada de las tecnologías de secuenciación de próxima generación (NGS, *Next Generation Sequencing*), particularmente la secuenciación del transcriptoma (RNA-seq), ha sido posible secuenciar simultáneamente múltiples fragmentos de ADN a una gran profundidad de secuenciación, aumentando así la capacidad de identificar y caracterizar genes de fusión, así como nuevas translocaciones cromosómicas con mayor sensibilidad y especificidad (Edgren et al., 2011; Russnes et al., 2011).

Asimismo, este enfoque ha sido también utilizado en recientes investigaciones para identificar en el transcriptoma de células de cáncer, cambios en la expresión de genes implicados con el efecto anticancerígeno de compuestos aromáticos (De la Cruz-Cano et al., 2023). En esta revisión, abordamos aspectos generales de los genes de fusión, incluyendo aspectos conceptuales, mecanismos que conducen a la formación de estas quimeras, limitaciones de las tecnologías NGS durante la identificación de los genes de fusión, así como una breve revisión de los estudios que han identificado genes de fusión en la patogénesis del cáncer de mama.

1.1. Formación de genes de fusión por reordenamiento cromosómico

A nivel de ADN, la formación de los genes de fusión ocurre mediante reordenamientos cromosómicos, cuando se elimina una región genómica entre dos genes ubicados en la misma hebra (Duijf et al., 2019; Taniue & Akimitsu, 2021; Rasool & Ullah, 2022). Por lo tanto, la relación entre los reordenamientos cromosómicos y las fusiones de genes en el cáncer de mama representa mecanismos cruciales para la expresión desregulada de productos génicos quiméricos que se generan en etapas específicas del desarrollo celular, y que tienen además repercu-

siones fisiopatológicas en la progresión del cáncer de esta enfermedad (Taniue & Akimitsu, 2021). Los cuatro tipos básicos de reordenamiento cromosómico que conducen a la formación de genes de fusión son: Deleciones, translocaciones, inversiones y duplicaciones (ver Figura 1).

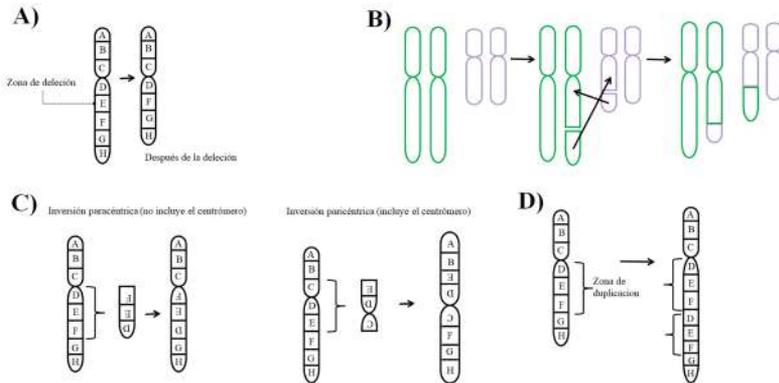


Figura 1. Tipos básicos de reordenamiento cromosómicos. A) *Delección.* Se refiere a la pérdida de una parte del cromosoma. B) *Traslocación.* Consiste en el desplazamiento de un segmento de un cromosoma a uno nuevo. C) *Inversión.* Es un cambio estructural por el cual un segmento cromosómico cambia de sentido dentro del propio cromosoma. D) *Duplicación.* Tipo de reordenamiento en el que se duplica un segmento del cromosoma. Las cajas dentro de cada cromosoma representan genes estructurales (Burssted et al., 2022).

En este sentido, una delección, consiste en la pérdida de un fragmento de cromosoma (Panagopoulos & Heim, 2021). Este tipo de reordenamiento puede ocurrir en cualquier parte del cromosoma, por lo que pueden ser proximales, cuando el segmento de ADN ausente se encuentra cerca del centrómero, o delección distal, cuando la pérdida del material genético tiene lugar cerca de los telómeros (Panagopoulos & Heim, 2021). Por otra parte, los genes de fusión también pueden formarse a partir de duplicaciones, que es cuando una región genómica se duplica una o más veces, y las copias se colocan junto a la región original, dando como resultado la formación de un gen de fusión en la unión de la región copiada y original (Glenfield & Innan, 2021).

Aquí es importante mencionar que el orden de los dos genes durante la transcripción de fusión es sumamente importante, ya que la duplicación crea transcripciones quiméricas donde los genes están en orden inverso en relación con sus posiciones en la hebra (Glenfield & Innan, 2021). Por otra parte, los genes de fusión pueden además formarse como resultado de eventos de inversión donde los segmentos cromosómicos cambian de sentido dentro del propio cromosoma (Taniue & Akimitsu, 2021). Si un gen de fusión involucra dos genes ubicados en hebras opuestas de un cromosoma, se debe sospechar un evento de inversión. Un rasgo característico de esta clase de fusión es la formación de genes de fusión recíprocos en ambos extremos de la inversión (Taniue & Akimitsu, 2021).

Por otra parte, muchos genes de fusión involucran genes ubicados en cromosomas separados (Edwards, 2010). Estas fusiones siempre son causadas por una translocación de algún tipo, ya sea que implique la translocación de un pequeño fragmento genómico a un nuevo locus o una translocación recíproca que implique el intercambio de brazos cromosómicos completos (Courtay-Cahen et al., 2000; Edwards, 2010). Los puntos de ruptura genómicos de los genes de fusión generalmente ocurren en regiones intrónicas o intergénicas y rara vez interrumpen las secuencias de codificación (Courtay-Cahen et al., 2000). La selección oncogénica también puede desempeñar un papel crucial, ya que las fusiones que interrumpen un exón tienen una probabilidad de dos en tres de crear una proteína con marco de lectura desplazado con poco efecto sobre la función celular (Courtay-Cahen et al., 2000; Parl et al., 2019). Por el contrario, los puntos de ruptura intrónicos a menudo conducen a proteínas quiméricas en marco porque los exones tienden a terminar en los límites de los codones (Parl et al., 2019).

1.2. Formación de genes de fusión por empalmes *CIS-SAGE* & *TRANS*

Los genes de fusión pueden también formarse por eventos de empalme del ARN (ver Figura 2). Uno de estos eventos para la formación de ARN quimérico es mediante el empalme en *cis* de genes adyacentes (*cis-SAGE*), el cual es uno de los principales mecanismos en la formación de ARN quiméricos (Jia et al., 2016; Shi et al., 2021; Zhuo et al., 2018). *cis-SAGE* se refiere al empalme intergénico de genes directamente adyacentes con la misma orientación transcripcional, dando como resultado transcritos de lectura completa, denominados ARN quiméri-

cos, que contienen secuencias de dos o más genes parentales (Shi et al., 2021; Zhuo et al., 2018).

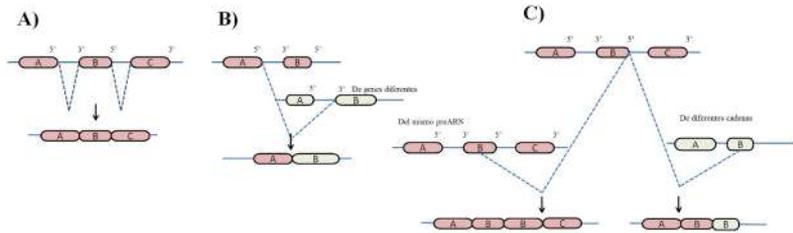


Figura 2. Diferentes tipos de empalme de ARN. A) Empalme en *cis*-SAGE. Después de la escisión de los intrones, los exones del mismo pre-ARNm se unen para formar una molécula lineal. B) Empalme *trans* intergénico. Los transcritos de diferentes genes o incluso de diferentes cromosomas pueden empalmarse, generando una molécula quimérica no lineal. C) Empalme *trans* intragénico. En el mismo gen, el empalme puede ocurrir entre dos transcritos idénticos (izquierda); alternativamente, los transcritos de diferentes cadenas pueden conducir a la duplicación de exones (derecha) (Lei et al., 2016).

En general, el empalme *cis*-SAGE ocurre cuando la ARN polimerasa no termina correctamente la transcripción al final de un gen, sino que continúa transcribiendo hasta el final del siguiente gen, por lo que el pre-ARNm quimérico se empalma para producir un transcrito de fusión (Shi et al., 2021). En casi todos los casos, el ARNm quimérico resultante carecerá del último exón del gen corriente arriba y del primer exón del gen corriente abajo (Zhuo et al., 2018). Este fenómeno ocurre porque el último exón de un gen carece de un sitio donante de corte y empalme que se requiere para la función del spliceosoma (Zhuo et al., 2018). Por otra parte, el ARN quimérico puede surgir además del empalme *trans*, que ocurre cuando los exones de diferentes transcritos de ARN se empalman juntos (Lasda & Blumenthal, 2011).

Básicamente, el spliceosoma usa el sitio de empalme 5' de una molécula y el punto de ramificación, junto con el sitio de empalme 3' de otra molécula para ligar dos exones de dos moléculas diferentes (Lasda & Blumenthal, 2011; Yang & Walsh, 2005). Este mecanismo que ocurre naturalmente en células eucariotas fue identificado inicialmente en el tripanosoma y luego en los platelmintos, antes de observarse en las células humanas (Sutton & Boothroyd, 1986; Davis,

1996). Si bien el enfoque del empalme *trans* está particularmente adaptado para corregir mutaciones en genes muy largos, algunos ARN quiméricos empalmados en *trans* han sido asociados con diversos cánceres, por lo que la relación causal entre el empalme *trans* y el cáncer de mama sigue sin estar clara (Lasda & Blumenthal, 2011; Chen et al., 2022).

1.3. Importancia de la identificación de genes de fusión en el cáncer de mama

La importancia de la identificación de los genes de fusión en la patogénesis del cáncer de mama radica principalmente en determinar los productos de transcripción de los genes de fusión (es decir, las isoformas) involucrados en la progresión de esta enfermedad (Weirather et al., 2015; Heyer & Deveson, 2019), por lo que la caracterización precisa de las secuencias de transcripción de fusión es fundamental en la investigación biomédica de cánceres humanos (Heyer & Deveson, 2019).

Para lograr este objetivo, se necesita: *a*) una herramienta bioinformática para encontrar genes de fusión, es decir, el par de genes involucrados; *b*) Identificar los sitios en donde ocurre la fusión entre los genes emparejados; y *c*) Identificar las isoformas expresadas (Ge et al., 2011; Hong et al., 2020). Cabe resaltar que, con la aparición de las NGS, se han desarrollado diversas herramientas de detección de genes de fusión de todo el genoma, basados en alineaciones de lecturas cortas (Ge et al., 2011; Schmidt et al., 2018). Sin embargo, los resultados de encontrar genes de fusión y sitios de fusión con las herramientas existentes siguen siendo problemáticos (Hoogstrate et al., 2016; Schmidt et al., 2018).

1.4. Limitaciones durante la identificación de genes de fusión

En general, un gen de fusión se detecta a partir de lecturas que abarcan dos genes distintos (Ge et al., 2011; Schmidt et al., 2018), por lo que los métodos bioinformáticos existentes “dividen” las lecturas cortas en fragmentos emparejados y encuentran sus alineaciones en el genoma (Hoogstrate et al., 2016; Schmidt et al., 2018). Similarmente, las lecturas NGS de “extremo emparejado” pueden detectar fusiones de genes si dos parejas se asignan a dos genes (Supper et al., 2013). Sin embargo, dado que los eventos de fusión de genes pueden ser inter cromosó-

micos, el espacio de búsqueda para una alineación de lectura corta dividida o una alineación de lectura de extremos emparejados es el genoma completo (Maher et al., 2009; Wang et al., 2013).

Teniendo en cuenta el tamaño del genoma humano y la corta longitud de lectura de las tecnologías NGS, la tasa de alineación ambigua o incorrecta podría ser una importante limitación por las siguientes razones: *a*) la desalineación debido a variantes del genoma y errores de secuenciación pueden causar detecciones incorrectas (Wang et al., 2013); *b*) múltiples alineaciones de lecturas individuales pueden causar incertidumbre en las detecciones (Kim et al., 2019). Casi la mitad de las regiones del genoma humano son repetitivas, por lo que las alineaciones de lectura corta en estas regiones podrían ser inciertas (Akiva et al., 2006). En general, las longitudes de lectura cortas no pueden garantizar alineaciones precisas de lecturas divididas y lecturas de extremos emparejados (Wang et al., 2013). Además, el análisis de isoformas de los genes de fusión sigue siendo un tema fundamental que no se ha explorado en detalle (Wang et al., 2013).

1.5. Genes de fusión en el cáncer de mama identificados mediante RNA-SEQ

Varios estudios han reportado numerosas fusiones asociadas con la patogénesis del cáncer de mama utilizando análisis de secuenciación de transcriptoma (Edgren et al., 2011; Robinson et al., 2011; Wang et al., 2021). Por ejemplo, Edgren et al (Edgren et al., 2011) identificaron 24 genes de fusión nuevos y 3 previamente conocidos en células de cáncer de mama, los cuales fueron asociados con la progresión y la tumorigénesis de esta enfermedad. Particularmente, ellos identificaron el gen de fusión VAPB-IKZF3 como un candidato potencial relacionado con el crecimiento y la supervivencia de las células tumorales (Edgren et al., 2011). Robinson et al (Robinson et al., 2011) identificaron la fusión NOTCH/MAST en el cáncer de mama mediante análisis de secuenciación de 41 líneas celulares de cáncer de mama y 38 tumores de mama.

El enfoque principal de esta investigación fue que la quinasa MAST y las familias de genes Notch se fusionan repetidamente, en aproximadamente el 5% de los casos. Curiosamente, las fusiones MAST aumentaron la proliferación en células epiteliales mamarias benignas, mientras que las líneas celulares con fusiones Notch fueron sensibles a los inhibidores de la señalización de Notch. Además,

todos los casos con fusiones de Notch fueron receptores de estrógeno negativos y siete de ocho fueron triples negativos (Robinson et al., 2011). Por otra parte, Wang et al (Wang et al., 2021) identificaron 189 genes de fusión en células de cáncer de mama triple negativo, entre los cuales 22 eran fusiones recurrentes. De manera relevante, el análisis transcriptómico de este estudio concluyó que la fusión MFGE8-HAPLN3 es un biomarcador novedoso con aplicación clínica para el diagnóstico y pronóstico de los pacientes con este subtipo de cáncer de mama (Wang et al., 2021).

Otros ejemplos de genes de fusión identificados mediante análisis transcriptómico, incluyen: ESR1-CCDC170 en cáncer de mama luminal B (Li et al., 2020; Veeraraghavan et al., 2014); el gen de fusión BCL2L14-ETV6 detectado exclusivamente en muestras de cáncer de mama triple negativo, especialmente en neoplasias con características de alta agresividad clínica, y que parece estar relacionado con la resistencia al paclitaxel (Lee et al., 2020); la fusión ETV6-NTRK3 en el carcinoma de mama secretor que activa constitutivamente la quinasa NTRK3 (Kim et al., 2015; Park et al., 2018); el gen de fusión MYB-NFIB que actúa como un impulsor genético que sustenta los carcinomas quísticos adenoides de mama mediante la vía MYB (Jiang et al., 2019). Los genes de fusión SLC2A1-FAF1 y BCAS4-AURKA, los cuales se han encontrado presentes en carcinomas micropapilares de mama, y que se ha relacionado con la progresión y metástasis de esta enfermedad (Natrajan et al., 2014).

2. Conclusión y perspectivas

En conclusión, el análisis transcriptómico juega un papel importante en el descubrimiento de genes de fusión en el cáncer de mama. La caracterización molecular de los tumores de mama es de suma importancia para la selección de estrategias y tratamientos eficaces. Es importante destacar que las fusiones identificadas en esta revisión se presentaron en los cánceres de mama más agresivos, por lo que estos podrían estar relacionados con la resistencia terapéutica y, por lo tanto, usarse como biomarcadores para identificar pacientes que requieren un tratamiento y vigilancia más intensivos.

Por otra parte, diversos estudios moleculares han identificado diversos genes de fusión recurrentes implicados en el desarrollo y la progresión de tumores más agresivos; sin embargo, a pesar de la diversidad de estos estudios, creemos que aún deben descubrirse genes de fusión recurrentes más significativos en el cáncer de mama por diversos motivos: 1) La sensibilidad de la tecnología NGS para detectar genes de fusión podría no ser tan buena como se esperaba, ya que solo las lecturas pareadas que abarcan la unión de fusión son identificables como lecturas quiméricas, mientras que las lecturas del resto de las secuencias de fusión se asignan a genes de tipo salvaje, dando como resultado una sensibilidad de detección de fusión sustancialmente menor en comparación con los genes de tipo salvaje. 2) Es bien sabido que el RNA-seq genera comúnmente grandes cantidades de secuencias quiméricas, las cuales corresponden a secuencias de fusión de artefactos, o fusiones de genes pasajeros no funcionales. 3) Los costos de otros enfoques de las tecnologías NGS, tales como WGS (*Whole Genome Sequencing*) han impedido la secuenciación profunda a gran escala de los genomas del cáncer de mama, además de que las longitudes cortas de lectura de estas impiden el ensamblaje *de novo* para identificar genes de fusión.

Finalmente, como perspectiva de esta investigación sería interesante explorar más a fondo si existen genes de fusión recurrentes en entidades tumorales de mama específicos (p. ej. el cáncer de mama resistente a la terapia con HER-2, el cáncer de mama metastásico, cáncer de mama resistente al sistema endocrino, etc.) utilizando nuevas tecnologías de secuenciación profunda y mejoras en las herramientas bioinformáticas, con el fin de descubrir nuevas fusiones recurrentes y patológicamente importantes en esta condición.

Referencias bibliográficas

- Akiva, P., Toporik, A., Edelheit, S., Peretz, Y., Diber, A., Shemesh, R., . . . Sorek, R. (2006). Transcription-mediated gene fusion in the human genome. *Genome Res*, 16(1), 30-36. <https://doi.org/10.1101/gr.4137606>
- Burssed, B., Zamariolli, M., Bellucco, F. T., & Melaragno, M. I. (2022). Mechanisms of structural chromosomal rearrangement formation. *Mol Cytogenet*, 15(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13039-022-00600-6>

- Courtay-Cahen, C., Morris, J. S., & Edwards, P. A. (2000). Chromosome translocations in breast cancer with breakpoints at 8p12. *Genomics*, 66(1), 15-25. <https://doi.org/10.1006/geno.2000.6178>
- Chen, Y.-C., Chen, C.-Y., Chiang, T.-W., Chan, M.-H., Hsiao, M., Ke, H.-M., . . . Chuang, T.-J. (2022). Detecting intragenic trans-splicing events with hybrid transcriptome sequencing in cancer cells. *BioRxiv*, 2022.2004. 2021.489006.
- Chrzanowska, N. M., Kowalewski, J., & Lewandowska, M. A. (2020). Use of Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) in Diagnosis and Tailored Therapies in Solid Tumors. 25(8). <https://doi.org/10.3390/molecules25081864>
- Davis, R. E. (1996). Spliced leader RNA trans-splicing in metazoa. *Parasitol Today*, 12(1), 33-40. [https://doi.org/10.1016/0169-4758\(96\)80643-0](https://doi.org/10.1016/0169-4758(96)80643-0)
- De la Cruz-Cano, E., Díaz-Gandarilla, J. A., González-Garrido, J. A., & López-Victorio, C. J. (2023). Fluorinated chalcone arrests cell cycle progression in Triple-Negative Breast Cancer Cells by decreasing the expression of cyclin A, cyclin B1 and Cdc 2 protein. *Salud, Ciencia y Tecnología-Serie de Conferencias*, 2(2), 214-214.
- Duijf, P. H. G., Nanayakkara, D., Nones, K., Srihari, S., Kalimutho, M., & Khanna, K. K. (2019). Mechanisms of Genomic Instability in Breast Cancer. *Trends Mol Med*, 25(7), 595-611. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2019.04.004>
- Edgren, H., Murumagi, A., Kangaspeska, S., Nicorici, D., Hongisto, V., Kleivi, K., . . . Kallioniemi, O. (2011). Identification of fusion genes in breast cancer by paired-end RNA-sequencing. *Genome Biol*, 12(1), R6. <https://doi.org/10.1186/gb-2011-12-1-r6>
- Edwards, P. A. (2010). Fusion genes and chromosome translocations in the common epithelial cancers. *J Pathol*, 220(2), 244-254. <https://doi.org/10.1002/path.2632>
- Ge, H., Liu, K., Juan, T., Fang, F., Newman, M., & Hoek, W. (2011). FusionMap: detecting fusion genes from next-generation sequencing data

- at base-pair resolution. *Bioinformatics*, 27(14), 1922-1928. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr310>
- Glenfield, C., & Innan, H. (2021). Gene Duplication and Gene Fusion Are Important Drivers of Tumorigenesis during Cancer Evolution. 12(9). <https://doi.org/10.3390/genes12091376>
- Heyer, E. E., & Deveson, I. W. (2019). Diagnosis of fusion genes using targeted RNA sequencing. 10(1), 1388. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09374-9>
- Hong, M., Tao, S., Zhang, L., Diao, L. T., Huang, X., Huang, S., . . . Zhang, H. (2020). RNA sequencing: new technologies and applications in cancer research. 13(1), 166. <https://doi.org/10.1186/s13045-020-01005-x>
- Hoogstrate, Y., Böttcher, R., Hiltmann, S., van der Spek, P. J., Jenster, G., & Stubbs, A. P. (2016). FuMa: reporting overlap in RNA-seq detected fusion genes. *Bioinformatics*, 32(8), 1226-1228. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv721>
- Howarth, K. D., & Mirza, T. (2021). NRG1 fusions in breast cancer. 23(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13058-020-01377-5>
- Hoxha, I., Sadiku, F., Hoxha, L., Nasim, M., Christine Buteau, M. A., Grezda, K., & Chamberlin, M. D. (2024). Breast Cancer and Lifestyle Factors: Umbrella Review. *Hematol Oncol Clin North Am*, 38(1), 137-170. <https://doi.org/10.1016/j.hoc.2023.07.005>
- Jia, Y., Xie, Z., & Li, H. (2016). Intergenically Spliced Chimeric RNAs in Cancer. *Trends Cancer*, 2(9), 475-484. <https://doi.org/10.1016/j.trecan.2016.07.006>
- Jiang, Y., Gao, R., Cao, C., Forbes, L., Li, J., Freeberg, S., . . . Kaye, F. J. (2019). MYB-activated models for testing therapeutic agents in adenoid cystic carcinoma. *Oral Oncol*, 98, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2019.09.005>
- Kim, B., Lee, H., Shin, S., Lee, S. T., & Choi, J. R. (2019). Clinical Evaluation of Massively Parallel RNA Sequencing for Detecting Recurrent Gene Fusions

- in Hematologic Malignancies. *J Mol Diagn*, 21(1), 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.jmoldx.2018.09.002>
- Kim, J., Kim, S., Ko, S., In, Y. H., Moon, H. G., Ahn, S. K., . . . Han, W. (2015). Recurrent fusion transcripts detected by whole-transcriptome sequencing of 120 primary breast cancer samples. *Genes Chromosomes Cancer*, 54(11), 681-691. <https://doi.org/10.1002/gcc.22279>
- Lasda, E. L., & Blumenthal, T. (2011). Trans-splicing. *Wiley Interdiscip Rev RNA*, 2(3), 417-434. <https://doi.org/10.1002/wrna.71>
- Lee, S., Hu, Y., Loo, S. K., Tan, Y., Bhargava, R., Lewis, M. T., & Wang, X. S. (2020). Landscape analysis of adjacent gene rearrangements reveals BCL2L14-ETV6 gene fusions in more aggressive triple-negative breast cancer. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 117(18), 9912-9921. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921333117>
- Lei, Q., Li, C., Zuo, Z., Huang, C., Cheng, H., & Zhou, R. (2016). Evolutionary Insights into RNA trans-Splicing in Vertebrates. *Genome Biol Evol*, 8(3), 562-577. <https://doi.org/10.1093/gbe/evw025>
- Li, L., Lin, L., Veeraraghavan, J., Hu, Y., Wang, X., Lee, S., . . . Wang, X. S. (2020). Therapeutic role of recurrent ESR1-CCDC170 gene fusions in breast cancer endocrine resistance. *Breast Cancer Res*, 22(1), 84. <https://doi.org/10.1186/s13058-020-01325-3>
- Maher, C. A., Kumar-Sinha, C., Cao, X., Kalyana-Sundaram, S., Han, B., Jing, X., . . . Chinnaiyan, A. M. (2009). Transcriptome sequencing to detect gene fusions in cancer. *Nature*, 458(7234), 97-101. <https://doi.org/10.1038/nature07638>
- Natrajan, R., Wilkerson, P. M., Marchiò, C., Piscuoglio, S., Ng, C. K., Wai, P., . . . Reis-Filho, J. S. (2014). Characterization of the genomic features and expressed fusion genes in micropapillary carcinomas of the breast. *J Pathol*, 232(5), 553-565. <https://doi.org/10.1002/path.4325>
- Panagopoulos, I., & Heim, S. (2021). Interstitial Deletions Generating Fusion Genes. *Cancer Genomics Proteomics*, 18(3), 167-196. <https://doi.org/10.21873/cgp.20251>

- Park, J., Kim, J., Park, B., Yang, K. M., Sun, E. J., Tognon, C. E., . . . Kim, S. J. (2018). Novel identification of STAT1 as a crucial mediator of ETV6-NTRK3-induced tumorigenesis. *Oncogene*, 37(17), 2270-2284. <https://doi.org/10.1038/s41388-017-0102-2>
- Parl, F. F., Dupont, W. D., & Crooke, P. S. (2019). Interchromosomal Translocations as a Means to Map Chromosome Territories in Breast Cancer. *Cancer Inform*, 18, 1176935119842573. <https://doi.org/10.1177/1176935119842573>
- Rasool, R., & Ullah, I. (2022). Theranostic Interpolation of Genomic Instability in Breast Cancer. 23(3). <https://doi.org/10.3390/ijms23031861>
- Robinson, D. R., Kalyana-Sundaram, S., Wu, Y. M., Shankar, S., Cao, X., Ateeq, B., . . . Chinnaiyan, A. M. (2011). Functionally recurrent rearrangements of the MAST kinase and Notch gene families in breast cancer. *Nat Med*, 17(12), 1646-1651. <https://doi.org/10.1038/nm.2580>
- Russnes, H. G., Navin, N., Hicks, J., & Borresen-Dale, A. L. (2011). Insight into the heterogeneity of breast cancer through next-generation sequencing. *J Clin Invest*, 121(10), 3810-3818. <https://doi.org/10.1172/jci57088>
- Schmidt, B. M., Davidson, N. M., Hawkins, A. D. K., Bartolo, R., Majewski, I. J., Ekert, P. G., & Oshlack, A. (2018). Clinker: visualizing fusion genes detected in RNA-seq data. *Gigascience*, 7(7). <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy079>
- Shi, X., Singh, S., Lin, E., & Li, H. (2021). Chimeric RNAs in cancer. *Adv Clin Chem*, 100, 1-35. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2020.04.001>
- Smail, H. O. (2022). The Roles of the Fluorescent In Situ Hybridization (FISH) and Comparative Genomic Hybridization (CGH) Techniques in the Detection of the Breast Cancer. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*, 11(1), 45-54.
- Supper, J., Gugenmus, C., Wollnik, J., Druke, T., Scherf, M., Hahn, A., . . . Seifert, M. (2013). Detecting and visualizing gene fusions. *Methods*, 59(1), S24-28. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2012.09.013>

- Sutton, R. E., & Boothroyd, J. C. (1986). Evidence for trans splicing in trypanosomes. *Cell*, 47(4), 527-535. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(86\)90617-3](https://doi.org/10.1016/0092-8674(86)90617-3)
- Taniue, K., & Akimitsu, N. (2021). Fusion Genes and RNAs in Cancer Development. *Noncoding RNA*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/ncrna7010010>
- Veeraraghavan, J., Tan, Y., Cao, X. X., Kim, J. A., Wang, X., Chamness, G. C., . . . Wang, X. S. (2014). Recurrent ESR1-CCDC170 rearrangements in an aggressive subset of oestrogen receptor-positive breast cancers. *Nat Commun*, 5, 4577. <https://doi.org/10.1038/ncomms5577>
- Wang, M. Y., Huang, M., Wang, C. Y., Tang, X. Y., Wang, J. G., Yang, Y. D., . . . Gao, C. W. (2021). Transcriptome Analysis Reveals MFGE8-HAPLN3 Fusion as a Novel Biomarker in Triple-Negative Breast Cancer. *Front Oncol*, 11, 682021. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.682021>
- Wang, Q., Xia, J., Jia, P., Pao, W., & Zhao, Z. (2013). Application of next generation sequencing to human gene fusion detection: computational tools, features and perspectives. *Brief Bioinform*, 14(4), 506-519. <https://doi.org/10.1093/bib/bbs044>
- Weirather, J. L., Afshar, P. T., Clark, T. A., Tseng, E., Powers, L. S., Underwood, J. G., . . . Au, K. F. (2015). Characterization of fusion genes and the significantly expressed fusion isoforms in breast cancer by hybrid sequencing. *Nucleic Acids Res*, 43(18), e116. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv562>
- Yang, Y., & Walsh, C. E. (2005). Spliceosome-mediated RNA trans-splicing. *Mol Ther*, 12(6), 1006-1012. <https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2005.09.006>
- Zhuo, J. S., Jing, X. Y., Du, X., & Yang, X. Q. (2018). Generation of Chimeric RNAs by cis-splicing of adjacent genes (cis-SAGe) in mammals. *Yi Chuan*, 40(2), 145-154. <https://doi.org/10.16288/j.ycz.17-197>

Capítulo 4

Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental

Indicadores socioambientales de contaminación por hidrocarburos cerca del campo petrolero Samaria, Tabasco

*Socio-environmental indicators of hydrocarbon
contamination near the Samaria oil field, Tabasco*

Yzquierdo-Ruiz Mónica Maribel¹, Morales-Bautista Carlos Mario², García-Zaleta David S.², Pérez-Vidal Hermicenda³, Márquez-Herrera Ciro E.⁴, Torres-Sánchez Sonia A.⁵ y De la Garza-Rodríguez Iliana M.⁶

¹Doctorado en Ciencias en Química Aplicada, ¹Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental y ³Cuerpo Académico en Ciencias de los Materiales. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

⁴Universidad Nacional Autónoma de México.

⁵Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

⁶Universidad Autónoma de Coahuila.

Autor de correspondencia: hermicenda.perez@ujat.mx

Resumen

En la presente investigación se realizó una revisión de estudios sobre el análisis de la calidad de los suelos, hidrocarburos, metales pesados y mineralogía en zonas aledañas a los pozos petroleros en el campo petrolero Samaria, en el municipio de Cunduacán, Tabasco. El propósito de esta revisión es conocer si las diversas infraestructuras implementadas para la prevención de inundaciones y derrames recientes han provocado acumulación de contaminantes como los son hidrocarburos y metales pesados en una zona con población marginada. Se abordan los cambios geomorfológicos que ha sufrido el río Samaria a lo largo del tiempo y la implementación de bordos de protección contra inundaciones, lo que provocó un encerramiento en las comunidades aledañas al río Samaria ocasionando que en épocas de avenidas los sedimentos quedaran depositados en la llanura aluvial. Así como, investigaciones relacionadas al análisis de los parámetros físicos y químicos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, mineralógicos como el

uso de microscopía petrográfica y Difracción de Rayos X (DRX) y contaminación por elementos potencialmente tóxicos incluyendo hidrocarburos y metales pesados.

Palabras claves: suelos, hidrocarburos, metales pesados, contaminación.

Abstract

In the present research we conducted a review of studies on the analysis of soil quality, hydrocarbons, heavy metals, and mineralogy in areas surrounding the oil wells in Samaria, in the municipality of Cunduacán, Tabasco. The purpose of this review is to know if the various infrastructures implemented for flood prevention and recent spills have caused accumulation of contaminants such as hydrocarbons and heavy metals in an area with a marginalized population. The geomorphological changes that the Samaria River has undergone over time and the implementation of flood protection berms are explained, which caused an enclosure in the communities bordering the Samaria River, causing sediments to be deposited in the alluvial plain in times of flooding. In addition, research related to the analysis of physical and chemical parameters in accordance with NOM-021-RECNAT-2000, mineralogical parameters such as the use of petrographic microscopy and X-ray diffraction (XRD), and contamination by potentially toxic elements including hydrocarbons and heavy metals.

Keywords: Soils, Hydrocarbons, Heavy Metals, Contamination.

1. Introducción

Toda actividad productiva en instalaciones industriales involucrará el manejo, almacenamiento y transporte de productos y residuos, ya sea por vías de comunicación o tuberías, algunos de estos compuestos pueden ser peligrosos y cualquier tipo de vertido accidental puede provocar efectos negativos en el medio ambiente contaminando el suelo, agua y aire, debido a su toxicidad, explosividad e inflamabilidad (CENAPRED, 2014; Barsova et al., 2019). Los suelos son receptores de contaminantes por lo que la liberación de elementos potencialmente tóxicos en estos provocaría daños principalmente en la fertilidad (causando baja calidad en los cultivos) y en la salud pública (inhalación e ingestión por los seres

humanos). (Hoesly et al., 2018 ; Fei et al., 2018; Bellouin et al., 2020; Semenkov & Koroleva, 2020).

A nivel mundial la fuente de energía más utilizada en las últimas décadas es el petróleo crudo y sus derivados. En México, este recurso natural de insumos se emplea para generar energía eléctrica, además, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene de éste (Velásquez, 2017). Hace una década el estado de Tabasco fue el primer lugar nacional en producción de crudo y gas natural (Rodríguez-Padilla, 2013; García de León, 2017). Por lo que, paralelamente a estas actividades petroleras se han contaminado los recursos naturales lo que ha contribuido a un desequilibrio en las propiedades físicas, químicas y biológicas que se ven reflejadas en la baja producción de alimentos. (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2022).

Autores como Gutiérrez & Zavala (2002) señalan que en las tierras bajas del estado de Tabasco han estado sometidas a derrames, ya que existen campos petroleros de extracción de hidrocarburo en el área y que por sus características propias suelen estar saturados, de igual forma indicaron que los diversos suelos tropicales presentan diferente comportamiento a la acumulación de hidrocarburos y que se debe principalmente a la relación entre los rasgos hidromórficos, la mineralogía y la actividad biológica que presentan los suelos. Este factor representa una gran desventaja para la evaluación de los suelos restaurados o contaminados, y es que las normas ambientales mexicanas no toman en cuenta el tipo de hidrocarburo y el tipo de suelo lo que provoca incertidumbres en la interpretación del nivel de impacto y en los parámetros físicos y químicos del suelo (Morales-Bautista et al., 2016, Yzquierdo Ruiz et al., 2022).

Es importante mencionar que a lo largo del río Samaria se construyó en el año 1956 un bordo de defensa el cual junto con las presas Malpaso y Angostura sirvió para controlar el afluente en temporada de avenidas y disminuir el riesgo de inundación de Villahermosa (Ramos-Hernández, 2008). No obstante, la implementación de bordos provocó un encerramiento en las comunidades aledañas al río Samaria ocasionando que en épocas de avenida los sedimentos quedaran depositados en esta llanura, lo cual es conocido como Depósitos de Llanuras de Inundación (DPI), en el que el análisis de la estratigrafía de suelos nos proporciona información sobre la historia sedimentológica y ambiental, aunado a que, por la disminución del caudal por la creación de presas cuenca

arriba no hay mucho arrastre de sedimentos y quedan estancados (Miranda-Avilés, 2009).

Para la zona de estudio, Gutiérrez & Zavala (2002) señalan que en el Campo Samaria los suelos se dividen en “Barriales” y “Arenillas”, según la clasificación que manejan los campesinos. Los Barriales (Gleysols) tienen ligeras a altas concentraciones de hidrocarburo, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre, son susceptibles a inundaciones y la actividad biológica arrastra los hidrocarburos a través de los canales, lo que origina su fragmentación y las condiciones oxidantes para la precipitación de hierro; mientras que las Arenillas (Fluvisols) presentan una textura media, baja concentración de hidrocarburos, a pesar de estar sometidas a derrames de petróleo, debido a que se encuentran en relieves altos, exentos de inundaciones y tienen un buen drenaje interno que facilita el lavado de hidrocarburos (Zavala, 1993).

Mientras que Ordoñez & Schroeder (2011) determinaron la influencia de la geomorfología en la distribución de hidrocarburos en el bordo derecho del río Samaria, en el cual, identificaron que las zonas bajas inundables (suelo Gleysol) son mayormente susceptibles de provocar una mayor migración de los hidrocarburos en época de avenidas, ya que por las características propias de los hidrocarburos al ser inmiscibles en el agua se desplazan por encima de ellos llegando a los mismos lugares a donde el agua está presente y en el caso contrario en las llanuras altas aluviales se presenta una infiltración sobre una migración, debido a que suelos de esta zona son del tipo Fluvisols y estos poseen un buen drenaje así que se favorece su infiltración.

Determinar la cantidad de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) permite conocer si la concentración de estos se encuentra por debajo o por encima del Límite Máximo Permissible (LMP); así como las fracciones SARA para conocer la familia de hidrocarburos y sus posibles efectos, estas herramientas combinadas con los parámetros especificados en la NOM-021-RECNAT-2000 permiten tener una mayor visión de los cambios que provocan las actividades antropogénicas en éste. Por último, los estudios geoquímicos representan una mejor perspectiva sobre el grado de contaminación en las diferentes matrices edafológicas, estos pueden ser los estudios de Difracción de Rayos X (DRX), que nos indican el tipo de minerales presentes y como tal su comportamiento en la absorción de contaminantes, así como la Petrografía Microscópica que nos

ayuda a determinar cómo se encuentran distribuidos estos contaminantes en la superficie del suelo.

2. Marco metodológico

Hasta el momento, pocos estudios examinaron la relación entre la geomorfología, mineralogía, tipos de suelo y la contaminación relacionada con hidrocarburos y los metales pesados. En este estudio, buscamos analizar la relación entre la influencia de todos estos factores a través de la revisión y el análisis de artículos científicos y tesis de investigación.

3. Resultados y discusiones

En la Tabla 1, se muestran los resultados de parámetros físicos y químicos en suelos en la zona de Samaria en Cunduacán Tabasco. En este contexto, para el caso de pH en los suelos estudiados en Samaria (Yzquierdo Ruiz, 2022), al comparar con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 se observaron cuatro grupos: 1) fuertemente ácido (P16), 2) moderadamente ácido (P13, P14, P15, P23, 3) neutro (P8, P9, P10, P11, P12, P17, P18, P19, P20, P22, 4) medianamente alcalino (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7), estos valores de pH no representan un problema de fertilidad en los suelos ya que el pH alrededor de 6.5 han sido considerado como el más favorable (Hartemink & Barrow, 2023).

Con respecto a la CE, de acuerdo con la clasificación propuesta por la NOM-021-RECNAT-2000, la mayoría de nuestras muestras presentan efectos despreciables de la salinidad, pero se identificaron dos grupos: a) muy ligeramente salino (P15, P20, P23) y b) moderadamente salino (P13, P16).

Por otro lado, uno de los parámetros más afectados por el hidrocarburo es la textura. Se ha reportado que el porcentaje de arenas aumenta en un suelo con la presencia de hidrocarburo y paralelamente, el porcentaje de arcilla disminuye, la mayoría de los estudios coinciden en que esto se debe a que el hidrocarburo recubre las partículas del suelo provocando que el diámetro de estas aumente y por tanto su peso (Morales-Bautista et al., 2016; Yzquierdo-Ruiz et al., 2022).

Lo anterior concuerda con la tabla 1 en la que se observa un bajo porcentaje de arcillas (%R) y un alto porcentaje de limos (%L) y arenas (%S).

Por otra parte, en la figura 1, se observa que a partir de concentraciones mayores a 15000 mg/kg de hidrocarburo el porcentaje de arenas (%S) aumenta y por debajo de esa concentración tiende a disminuir, siendo el caso contrario con el porcentaje de limos (%L) que disminuye a partir de esa concentración y aumenta a concentraciones por debajo de 15000 mg/kg.

Tabla 1. Parámetros físicos y químicos en suelos en la zona de Samaria en Cunduacán Tabasco.

PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS					
ID	pH	CE	%A	%R	%L
		dS m ⁻¹			
P1	7.733 ± 0.057 ^h	0.070 ± 0.010 ^a	10.100 ± 0.000 ^a	5.400 ± 0.000	84.500 ± 0.000 ^f
P2	7.966 ± 0.057 ⁱ	0.093 ± 0.005 ^a	50.741 ± 1.414 ^d	5.400 ± 0.000	43.859 ± 1.414 ^c
P3	7.633 ± 0.057 ^h	0.063 ± 0.005 ^a	38.177 ± 1.414 ^d	4.300 ± 0.000	57.523 ± 1.414 ^c
P4	7.766 ± 0.057 ^h	0.073 ± 0.005 ^a	59.536 ± 0.000 ^c	3.960 ± 0.000	36.504 ± 0.000 ^b
P5	7.966 ± 0.057 ⁱ	0.173 ± 0.011 ^b	41.279 ± 1.414 ^d	4.680 ± 0.000	54.041 ± 1.414 ^c
P6	8.000 ± 0.000 ⁱ	0.310 ± 0.010 ^d	26.382 ± 1.414 ^c	9.157 ± 0.000	64.461 ± 1.414 ^c
P7	7.533 ± 0.057 ^h	0.073 ± 0.005 ^a	16.318 ± 0.707 ^b	4.680 ± 0.000	79.002 ± 0.707 ^e
P8	7.233 ± 0.057 ^g	0.073 ± 0.005 ^a	88.741 ± 1.414 ^f	5.400 ± 0.000	5.859 ± 1.414 ^a
P9	6.866 ± 0.057 ^f	0.046 ± 0.005 ^a	29.741 ± 0.000 ^c	6.823 ± 0.000	63.436 ± 0.000 ^c
P10	7.300 ± 0.000 ^g	0.196 ± 0.005 ^b	47.100 ± 1.414 ^d	5.400 ± 0.000	47.500 ± 1.414 ^c
P11	7.233 ± 0.057 ^g	0.076 ± 0.004 ^a	27.459 ± 1.414 ^c	3.240 ± 0.000	69.301 ± 1.414 ^d
P12	7.066 ± 0.057 ^g	0.163 ± 0.005 ^b	96.818 ± 0.000 ^g	3.182 ± 0.000	0.000 ± 0.000 ^a
P13	5.933 ± 0.057 ^c	2.297 ± 0.000 ^l	34.600 ± 0.000 ^d	5.400 ± 0.000	60.000 ± 0.000 ^c
P14	5.233 ± 0.057 ^b	0.376 ± 0.005 ^c	43.177 ± 0.000 ^d	5.040 ± 0.000	51.783 ± 0.000 ^c
P15	6.000 ± 0.000 ^c	1.873 ± 0.005 ^k	34.022 ± 1.414 ^d	7.182 ± 0.000	58.796 ± 1.414 ^c
P16	4.833 ± 0.057 ^a	2.346 ± 0.005 ^m	43.459 ± 1.414 ^d	7.541 ± 0.000	49.000 ± 1.414 ^c
P17	7.166 ± 0.057 ^g	0.596 ± 0.005 ^g	50.880 ± 1.414 ^d	6.120 ± 0.000	43.000 ± 1.414 ^c
P18	7.266 ± 0.057 ^g	0.543 ± 0.005 ^f	52.880 ± 1.414 ^d	6.120 ± 0.000	41.000 ± 1.414 ^c

P19	7.066 ± 0.057 ^g	0.596 ± 0.005 ^g	50.880 ± 1.414 ^d	6.120 ± 0.000	43.000 ± 1.414 ^c
P20	7.066 ± 0.057 ^g	1.296 ± 0.005 ⁱ	92.600 ± 0.000 ^f	5.400 ± 0.000	2.000 ± 0.000 ^a
P21	6.533 ± 0.000 ^d	0.630 ± 0.000 ^h	60.818 ± 0.000 ^e	5.040 ± 0.000	34.142 ± 0.000 ^b
P22	6.700 ± 0.000 ^e	0.543 ± 0.005 ^f	8.459 ± 0.000 ^a	5.400 ± 0.000	86.141 ± 0.000 ^f
P23	5.300 ± 0.000 ^b	1.343 ± 0.004 ^j	24.284 ± 0.000 ^c	6.120 ± 0.000	69.596 ± 0.000 ^d
SWc	0.889	0.748	0.943	1.766	0.929
<i>p-value</i>	<i>p</i> < 0.05				
HSD	0.160	0.020	2.583	0	2.583

Nota: Identificación de muestras que no presentan diferencias significativas entre sí: ^a, ^b, ^c, ^d, ^e, ^f, ^g, ^h, ⁱ, ^j, ^k, ^l, ^m.
Donde: CE es conductividad eléctrica en dS/m, %A es arenas, %L es limo y %R es arcilla.

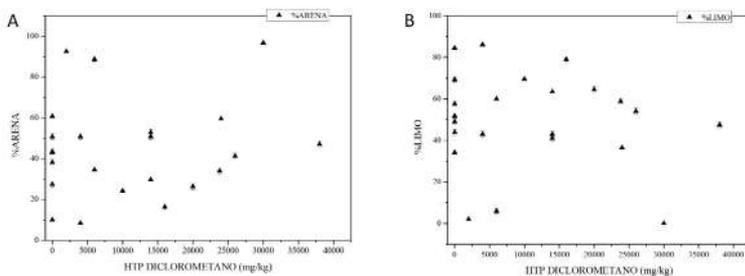


Figura 1. Relación entre las concentraciones de HTP, % arena (A) y % limo (B).

Por otro lado, de acuerdo con la literatura, autores como Martínez-Chávez et al. (2017) e Yzquierdo-Ruiz et al. (2022) mencionan que en los suelos tropicales se ha observado una mayor eficiencia por parte del diclorometano para extraer hidrocarburo a diferencia del hexano. Cabe destacar que, para el caso de los suelos de Samaria la máxima extracción fue con diclorometano, mientras que con hexano y metanol las concentraciones difieren (tabla 2), en el caso de hexano para el P5, P6, P7, P8 y P9 se llegan a tener concentraciones nulas con respecto a los otros dos solventes en los que se presentan concentraciones de hidrocarburos (Yzquierdo-Ruiz et al., 2022), por lo que la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 que establece que el solvente a utilizar es el hexano podría causar confusión a la hora de emitir si un suelo está contaminado o no de acuerdo al Límite Máximo Permisible (LMP). Por ejemplo, se observó que para 7 (P1, P2, P3, P11, P14, P16 y P21) de 23 muestras, no se encontró presencia de hidrocarburo, para el resto en

todas se rebasa el LMP para la fracción media (1200 mg/kg, P7, y P20) y pesada (3000 mg/kg, P4, P5, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15, P17, P18, P19, P22, P23) según la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Por su parte, el análisis SARA se cuantificó que las fracciones son medias y pesadas, las primeras relacionadas con la toxicidad por bioacumulación las muestras P7 (66%) y P20 (62%) son las que presentan mayor porcentaje de aromáticos y las segundas con la reducción de potencial hídrico (cambios en texturas, capacidad de campo y densidades) y con mayor porcentaje de asfaltenos son las muestras P4 (73%), P5 (71%), P6 (71%), P8 (71%), P9 (72%), P10 (67%), P12 (72%), P13 (75%) P15 (58%), P17 (75%), P18 (75%), P19 (75%), P22 (75%), P23 (68%). Teniendo el resto de los puntos con mayor porcentaje de fracción pesada (repelente), estudios como el de Marín-García et al. (2016) mencionan que los hidrocarburos de composición media presentan ligera repelencia, y los de fracción pesada son los que presentan una alta repelencia al agua.

Tabla 2. Concentraciones de HTP utilizando tres solventes diferentes y porcentajes de fracciones SARA.

ID	HTP			Fracciones SARA			
	Diclorometano	Hexano	Metanol	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
	mg/kg			%	%	%	%
P4	24000	6380	6000	2	25	25	48
P5	26000	0	6500	4	25	0	71
P6	20000	0	5000	4	25	0	71
P7	16000	0	10000	4	62	0	34
P8	6000	0	1500	4	25	0	71
P9	14000	0	3500	3	25	0	72
P10	38000	22000	12000	2	31	58	9
P12	30000	24000	7500	3	25	70	2
P13	6000	4907	1500	0	25	57	18
P15	23800	11900	10000	0	42	50	8
P17	14000	13641	3500	0	25	72	3
P18	14000	13776	3500	0	25	72	3

P19	4000	3668	1000	0	25	73	2
P20	2000	1822	1250	0	62	29	9
P22	4000	3196	1000	0	25	55	20
P23	10000	9450	3158	0	32	63	5
SWc	0.948	0.853	0.898	0.762	0.574	0.825	0.785
<i>p-value</i>	-----			<i>p</i> < 0.05		-----	

Estudios de suelo utilizando Petrografía Microscópica con Luz Polarizada y DRX

Es importante destacar que para el campo petrolero Samaria se describieron las secciones delgadas (figura 2) de los dos suelos presentes, Gleysoles (P1, P4, P7 y P15) y Fluvisoles (P10) (Yzquierdo Ruiz, 2022). Haciendo énfasis en la descripción de los agregados esferoidales, minerales, pedorrasgos de hierro y los atributos que dejan los hidrocarburos. Dentro de los rasgos que pudieron observar en las láminas fueron hipo- revestimientos de óxidos de hierro (P1, P4, P7, P10 y P15) que están relacionados con los organismos como las lombrices y los canales que forman las raíces de las plantas. Por ejemplo, en el P10 tenemos la presencia de un cristal fantasmal con nódulo típico (G) con impregnación pura de óxido de Fe (color marrón) y lo que pudiera ser hidrocarburo (marrón fuerte), de igual forma en la microfotografía observamos una textura granular, rica en cristales de cuarzos, plagioclasas con maclas polisintéticas y anfíboles.

Con respecto al análisis mineralógico (figura 3) se encontró que los minerales están asociados a la absorción de contaminantes como metales pesados, como la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), alunógeno $(\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$), almadino ($(\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) y cuarzo (SiO_2), de los cuales la caolinita e ilita son los de mayor importancia por ser minerales de la arcilla (filosilicatos). Se encontró la presencia de filosilicatos en el P1 y P4, para la zona de Samaria se ha reportado que los suelos Gleysoles presentan superficies activas lo que ocasiona la acumulación de hidrocarburos (Gutiérrez & Zavala, 2002). La caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), es un filosilicato del tipo 1:1 por lo que su capacidad de absorber contaminantes (hidrocarburos o metales pesados) es menor que en el caso de la ilita (arcilla 2:1) $(\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$.

En este contexto, los filosilicatos se encuentran en los primeros horizontes debido a que nuestros perfiles fueron de ~50 cm de largo provocando que los contaminantes queden retenidos en las capas superficiales, han reportado que los Gleysols se encuentran en su mayoría en las zonas bajas aluviales, las cuales presentan una oportunidad de migración de hidrocarburos por la capacidad de retener agua, por el comportamiento del flujo hidrológico que puede presentar, y más que nada por las características del hidrocarburo que lo hacen inmiscibles y con menor densidad que el agua, se pueden desplazar por encima de esta hacia mayores áreas probablemente lejanas o hasta donde se empiece a ganar elevación (Ordóñez y Schroeder, 2011), por lo que su migración está condicionada por la mineralogía del suelo.

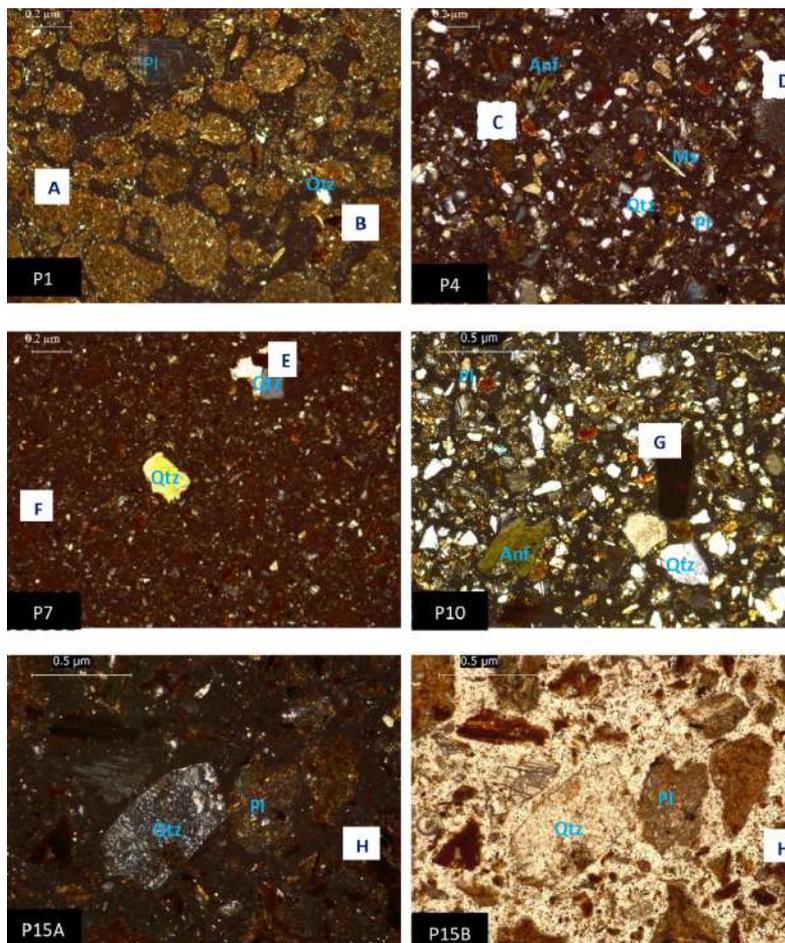


Figura 2. Microfotografías de suelo, la simbología que presenta PA son con luz polarizada y con PB están representadas con luz natural. P1, P4, P7 y P15 suelo del tipo gleysol; P10 suelo del tipo Fluvisol. *Simbología:* A nódulo nucleado moderadamente impregnado, B nódulo típico fuertemente impregnado, C nódulos de textura nucleada, D nódulos del tipo morfológico agregado, E nódulo típico con impregnación pura, F hiporevestimiento de arcilla, G nódulo típico con impregnación pura y H intercalaciones de óxido de Fe. Qtz: Cuarzo, Pl: Plagioclasa, Anf: Anfíbol y Ms: Moscovita.

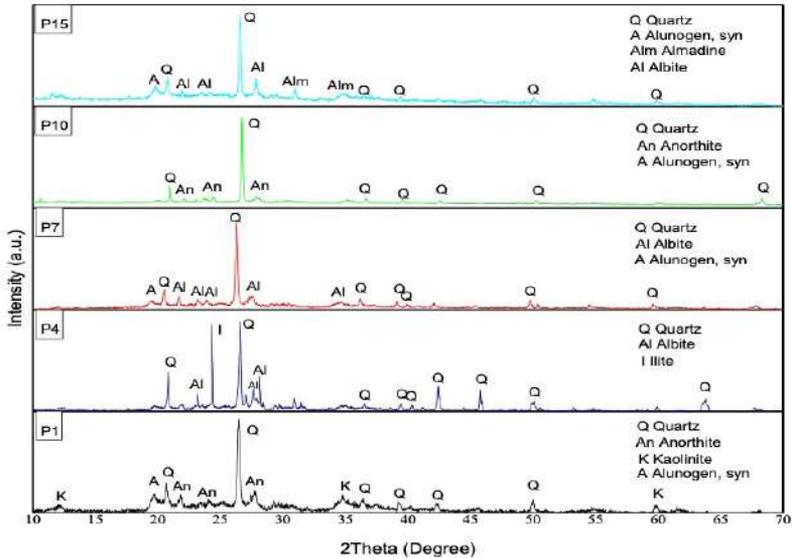


Figura 3. Difractograma de muestras de suelo de cinco muestras (P1, P4, P7, P10 y P15). Cartas cristalográficas: Cuarzo (Q) PDF 01-070-7344, Caolinita (K) PDF 00-014-0164, Illita (I) PDF 01-078-5136, Anortita (An) PDF 00-020-0528, Alunogeno (Al) PDF 00-022-0022, Albite (Al) PDF 01-072-8434, Almadino (Alm) PDF 00-002-1007.

Contaminación por elementos potencialmente tóxicos en suelos

Con respecto a la subcuenca del río Samaria, Yzquierdo-Ruiz (2022) menciona la presencia de metales pesados como Ba, Ni, V, Cr y Pb cuyas concentraciones más altas de las cinco muestras analizadas son 231.212, 72.655, 31.511, 40.521 y 20.601 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) respectivamente, se encontró una relación entre la textura media (grupo de los limos) y las concentraciones más altas (tabla 3), en el caso del límite permisible para Ni se rebasa para tres muestras para el caso de la normativa rusa ($40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y canadiense ($45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), no siendo el caso con respecto a las tres normas mexicanas NOM-021-RECNAT-2000 ($100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), NOM-004-SEMARNAT-2002 ($420 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 ($1600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), en las que se encuentran por debajo de lo establecido y que solo se tienen LMP para Pb, Cr, Ni y V.

Tabla 3. Relación de los metales pesados con la textura, mineralogía y pH.

ID	Textura	Pb	Cr	Ni	Ba	V
<i>mg.kg⁻¹</i>						
P1	Limosa	20.601	28.537	52.283	231.212	30.678
P4	Franco arenosa	0.000	16.083	32.625	116.125	22.058
P7	Franco limosa	8.683	40.521	71.380	154.615	29.460
P10	Franco arenosa	1.729	16.497	28.703	115.521	21.596
P15	Franco limosa	7.020	25.163	72.655	66.196	31.511

ID	AS de Ca	Tectosilicato	Sulfato de Al	Filosilicato	Nesosilicato	Silicato
P1	Anortita		Alunógeno	Caolinita 1:1		Cuarzo
P4		Albita		Ilita 2:1		Cuarzo
P7		Albita	Alunógeno			Cuarzo
P10	Anortita		Alunógeno			Cuarzo
P15		Albita	Alunógeno		Almadino	Cuarzo

Para el caso de micronutrientes se analizaron Fe, Mn, Zn y Cu cuyas concentraciones más altas en mg.kg^{-1} son 17065.209, 519.501, 80.095 y 33.619 respectivamente (tabla 4). Siendo el Mn (180 mg.kg^{-1}) el único que rebasa el límite según la normativa estadounidense, las altas concentraciones de Fe están asociadas a óxidos e hidróxidos de Fe debido a los rasgos hidromórficos presentes en los suelos característicos del área de estudio, por su importancia en la retención de elementos potencialmente tóxicos se asocian a las altas concentraciones de metales pesados. En este contexto, la alta concentración de Fe en suelos afectados por la industria petrolera está relacionada con texturas con mayor presencia de limos, por un lado, las concentraciones más bajas se relacionan con suelos con mayor presencia de arenas (Moskovchenko et al., 2017).

Cabe destacar que, la presencia de hidrocarburos podría ser la responsable de los cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos, y la principal fuente de emisión de EPT. Por otro lado, la mayoría de los puntos (P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P12, P13, P15, P17, P18, P19, P22 y P23) rebasan el LMP en concentración de fracción pesada en residencial (3000 mg/kg), agrícola (3000 mg/kg) e industrial (3000 mg/kg).

Tabla 4. Relación de los metales con la textura, mineralogía y pH.

ID	Textura	Fe	Mn	Zn	Cu	pH
			<i>mg.kg⁻¹</i>			
P1	Limosa	16550.330	519.501	71.930	20.913	M. Alcalino
P4	Franco arenosa	9391.350	200.792	38.067	10.125	M. Alcalino
P7	Franco limosa	13188.620	324.059	55.954	17.782	M. Alcalino
P10	Franco arenosa	8954.837	194.339	41.476	11.748	Neutro
P15	Franco limosa	17065.209	154.641	80.095	33.619	M. Acido

4. Conclusiones

La contaminación del suelo por elementos potencialmente tóxicos ya sea causada por factores naturales o antrópicos es la principal causante de una degradación de este, ocasionando problemas en la fertilidad y en la salud pública. En este caso en particular, se atribuye a las actividades humanas, como las actividades petroleras, debido a que en la cuantificación de HTP la mayoría de las muestras (P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P12, P13, P15, P17, P18, P19, P22 y P23) presentan hidrocarburo y rebasan el LMP para la normativa mexicana (> 3000 mg/kg agrícola y residencial).

De acuerdo con el análisis SARA se cuantificó que las fracciones son medias como el P7 (66%) y P20 (62%) con mayor contenido de aromáticos (toxicidad por bioacumulación) y pesadas como el P4 (73%), P5 (71%), P6 (71%), P8 (71%), P9 (72%), P10 (67%), P12 (72%), P13 (75%) P15 (58%), P17 (75%), P18 (75%), P19 (75%), P22 (75%), P23 (68%), relacionadas con la reducción de potencial hídrico (cambios en texturas, capacidad de campo y densidades).

No obstante, no se presentaron efectos negativos significativos en los parámetros físicos y químicos de fertilidad en los suelos como pH (fuertemente ácido, moderadamente ácido, neutro y medianamente alcalino) y CE (efectos despreciables de la salinidad, muy ligeramente salino y moderadamente salino) con respecto a las concentraciones de HTP. En lo que respecta a la textura se presencié una disminución del contenido de limo (%L) al aumentar las concentraciones de HTP y un aumento del contenido de arena (%A).

Siguiendo con el análisis mineralógico encontramos minerales como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), alunógeno, $\text{H}_3\text{O}(\text{Al, Mg, Fe})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}$), almadino ($(\text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) y cuarzo (SiO_2), de los cuales la caolinita e illita son los de mayor importancia por ser minerales de la arcilla (filosilicatos), los cuales están asociados a la absorción de contaminantes como metales pesados.

Se presentaron concentraciones de elementos potencialmente tóxicos y cuyas concentraciones fueron comparadas con las tres normas mexicanas NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-147- SEMARNAT-SSA1-2004 y NOM-004-SEMARNAT-2002 para conocer el LMP para Pb (100, 400 y 840 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cr (280 y 3000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Ni (100, 1600 y 420 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y V (78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), en las cuales no se rebasa el límite para ninguna de estas cuatro. Comparándolas con normas de otros países se encontró que para Ni el P1 (52.283 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P7 (71.380 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y P15 (72.655 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se rebasa el LMP para Rusia (40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), y Canadá (45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Sin embargo, al igual que con el principio del cuidado y conservación de los recursos suelo y agua, la prevención de la presencia de metales pesados en el suelo debe ser mayor que y antes de algún tratamiento debido a los posibles daños en la salud de la población; lo más urgente es controlar el manejo y distribución de la descarga excesiva de fuentes de contaminación y monitorear su control para que no existan derrames futuros. Aunque cabe destacar, que los estudios sobre la geoquímica y mineralogía de suelos son de suma importancia, ya que nos ayudan a delimitar hasta qué horizonte quedan retenidos los contaminantes y la utilización de la mineralogía nos permite conocer qué minerales se encuentran presentes y si estos actúan como retenedores de algunos elementos tóxicos.

Referencias bibliográficas

- Barsova, N., Yakimenko, O., Tolpeshta, I., & Motuzova, G. (2019). Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation. A review. *Environmental pollution*, 249, 200-207.
- Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D. (2020). Bounding global aerosol radiative forcing of climate

- change. *Reviews of Geophysics*, 58, e2019RG000660. <https://doi.org/10.1029/2019RG000660>
- CENAPRED. (2014). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*.
- Fei, X., Lou, Z., Christakos, G., Ren, Z., Liu, Q., & Lv, X. (2018). The association between heavy metal soil pollution and stomach cancer: a case study in Hangzhou City, China. *Environmental geochemistry and health*, 40(6), 2481-2490.
- García de León, Armando (2017): *Estado de Tabasco: Población, Estructura Económica, Petróleo y Opciones e Reconfiguración Territorial*. En: *Dinámica Económica y Procesos de Innovación en el Desarrollo Regional*. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, México. ISBN UNAM: 978-607-30-0000-0, AMECIDER: 978-607-96649-7-8
- Gutiérrez, M., & Zavala, J. (2002). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana*, 20(2), 101-111.
- Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J.-I., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R., & Zhang, Q. (2018). Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the community emissions data system (ceds). *Geoscientific Model Development*, 11(1), 369– 408.
- Marín-García, D. C., Adams, R. H., & Hernández-Barajas, R. (2016). Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0838-6>
- Martínez-Chávez, C. G., Morales-Bautista, C. M., & Alor-Chávez, M. D. J. (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(1), 9-16.

- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., & Caudillo-González, M. (2009). Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(3), 564–574.
- Moskovchenko, D. V., Kurchatova, A. N., Fefilov, N. N., & Yurtaev, A. A. (2017). Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5), 210. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5928-0>
- Morales-Bautista, C. M., Adams, R. H., Hernández-Barajas, J. R., Lobato-García, C. E., & Torres-Torres, J. G. (2016). Characterization of fresh and weathered petroleum for potential impacts to soil fertility. *International journal of environmental science and technology*, 13(11), 2689-2696.
- Ordóñez, A. D. L., & Schroeder, R. H. A. (2011). Influencia de la geomorfología en la dispersión de hidrocarburos en caso de fuga en ductos del bordo derecho del Campo Samaria. *Kuxulkab'*, 17(33).
- Ramos-Hernández, J.G. (2008). Capítulo 1: Introducción. En 11UNAM (Ed.), Programa Hídrico Integral de Tabasco (pp. 1-24). D.F., México: UNAM.
- Rodríguez-Padilla, Víctor. (2013). Sistema de estimación, certificación y aprobación de reservas de hidrocarburos en México; análisis de desempeño. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 451-460.
- Semenkov, I., & Koroleva, T. (2020). Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards. *Geoderma Regional*, 21, e00283.
- United States Environmental Protection Agency. (30 de Agosto de 2022). Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM).
- Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(1), 151 - 167.

- Yzquierdo-Ruíz, M. M., Torres-Sánchez, S. A., De la Garza-Rodríguez, I. M., Ojeda-Morales, M. E., Hernández-Nuñez, E., Lobato-García, C. E., ... & Morales-Bautista, C. M. (2022). Pre-evaluation of contaminated soil for oil field reactivation in Moloacan, Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(2), IA2753-IA2753.
- Yzquierdo Ruiz, M.M. (2022). Evaluación geoquímica-ambiental de actividades antropogénicas en una zona aledaña al bordo samaria, Cunduacán, Tabasco. [Tesis de maestría no publicada]. UJAT.
- Zavala C., J. (1993). Evaluación de los cambios de uso del suelo como un proceso de degradación en el campo petrolero Samaria, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. De México. México.

Capítulo 5

Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental

Importancia ambiental, sanitaria y social del manejo de RSU en sitios de transferencia

Environmental, sanitary and social importance of msw management at transfer sites

Montejo-Custodio Diana Laura^{1,3}, Morales-Bautista Carlos M^{1,4}, Laines-Canepa José R.^{2,4}, Alor-Chávez Maricela de J.¹, Lunagómez-Rocha María A.^{3,4}, Márquez-Herrera Ciro E.⁵, Pérez-Vidal Hermicenda^{3,4}

¹Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental, ²Cuerpo en Evaluación y Tecnología Ambiental, ³Cuerpo Académico Ciencia de los Materiales y ⁴Comisión Institucional de Residuos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

⁵Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Autor de correspondencia: hermicenda.perez@ujat.mx

Resumen

El confinamiento y manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos o RSU es uno de los principales problemas que afectan a la población, y se han convertido gradualmente en una amenaza significativa para la salud ambiental y humana. En este contexto, la mayoría de los sitios de transferencia de residuos sólidos han sido establecidos para el depósito temporal, pero estos carecen de vigilancia y control, y los residuos son expuestos fuera de las áreas controladas, como resultado, contaminan suelo y agua. El presente capítulo expone una recopilación de las aportaciones en el tema de residuos sólidos urbanos (RSU) por miembros y colaboradores del Cuerpo Académico de Química Aplicada a la Gestión Ambiental, los cuales, se han enfocado a realizar diagnósticos de la generación y características de los residuos, con la finalidad de la implementación de planes de manejo en la gestión integral de estos. Además, se ha permitido determinar la generación promedio y per cápita, el contenido energético, la composición elemental, así como, la estimación de tendencias de generación para años próximos. Finalmente se aborda parte del trabajo realizado en el sitio de transferencia de residuos del municipio de Centro, Tabasco y zonas aledañas, así como, la urgente

necesidad de evaluación de la calidad actual de las diferentes matrices como son suelo, agua, aire y salud. Con la intención de evidenciar la necesidad de tomar medidas estrictas en cuestiones del manejo y deposición final de los residuos.

Palabras clave: metales, lixiviados, tiraderos a cielo abierto.

Abstract

The confinement and inadequate management of urban solid waste or MSW is one of the main problems affecting the population and has gradually become a significant threat to environmental and human health. In this context, most solid waste transfer sites have been established for temporary deposit, but these lack surveillance and control, and the waste is exposed outside the controlled areas, as a result, contaminating soil and water. This chapter presents a compilation of contributions on the topic of urban solid waste (MSW) by members and collaborators of the Academic Body of Chemistry Applied to Environmental Management, which have focused on carrying out diagnoses of the generation and characteristics of waste, to implement management plans in their comprehensive management. In addition, it has been possible to determine the average and per capita generation, the energy content, the elemental composition, as well as the estimation of generation trends for coming years. Finally, part of the work carried out at the waste transfer site in the municipality of Centro, Tabasco and surrounding areas is addressed, as well as the urgent need to evaluate the current quality of the different matrices such as soil, water, air and health. With the intention of demonstrating the need to take strict measures in matters of waste management and final disposal.

Keywords: Metals, leachates, open dump sites.

1. Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son definidos de acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos como aquellos que se originan en las viviendas a partir de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas y los que provienen también de cualquier otra actividad que se realiza en establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias y los resultantes de lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (DOF, 2003; LGPGIR, 2007).

A nivel mundial, hace una década las cifras sobre los niveles de generación de residuos sólidos urbanos son de aproximadamente 1.3 billones de toneladas por año, y se espera que este volumen aumente a 2.2 billones de toneladas para el año 2025 (Hoorweg y Bhada, 2012). Esta tendencia creciente es contradictoria a los diversos lineamientos establecidos para el manejo adecuado de los residuos sólidos a nivel mundial, tales como el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su eliminación (DOF, 1990), el Protocolo de Montreal Relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (DOF, 1988) y el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (DOF, 2002).

En México, desde la década de los 70's, la atención de los gobiernos mexicanos fue dirigida a temas ambientales, empezando con la creación de la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (1971), la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente (1972-1976), más tarde, se concretó el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) encargados en conjunto de generar, normar, dirigir y vigilar el cumplimiento de dichas normas. No obstante, con la publicación de los documentos de Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos, la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y con la puesta en marcha del Programa de Medio Ambiente 1995-2000, se estableció la ordenación entre Federación, Estados y Municipios; en lo referente al manejo de residuos sólidos para mejorar las prácticas de manejo y disposición final (INE/SEMARNAT, 2006).

Posteriormente, en materia de regulación para el manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos (RSU), de manejo especial (RME) y peligrosos (RP), se establecieron diferentes lineamientos, tales como, la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental (LGEEPA) (DOF, 2000) y sus respectivos reglamentos, la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (DOF, 2001), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (DOF, 2003), que permiten la clasificación de los residuos y sus generadores, estableciendo mecanismos de coordinación institucional y especificaciones de protección ambiental para la selección, diseño, operación y monitoreo de sitios de disposición final de residuos sólidos urbano.

Además, las Normas Oficiales Mexicanas como la NOM-083-SEMARNAT-2003, que permiten la clasificación de los residuos y sus generadores, estableciendo mecanismos de coordinación institucional y especificaciones de protección ambiental para la selección, diseño, operación y monitoreo de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, y las normas NOM-021-SEMARNAT-2000, NMX-AA-132-SCFI-2006, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, NOM-053-SEMARNAT-1993 que establecen los criterios de muestreo, identificación y cuantificación de metales en suelos y solución acuosa, así mismo, establecen los límites permisibles de concentraciones contaminantes de metales como arsénico, bario, cadmio, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. De esta manera, se estima la probabilidad de los efectos a la salud de la población y medio ambiente, como consecuencia de su exposición a suelos contaminados.

Sin embargo, debido a la falta de sitios para la disposición final de los residuos, principalmente en zonas marginadas, se crean espacios conocidos como tiraderos a cielo abierto que dan lugar a problemas de contaminación. Por ejemplo, a través de los lixiviados liberados por la descomposición de los propios residuos que llevan consigo elevadas cantidades de sustancias orgánicas e inorgánicas que tienen como destino final los suelos y cuerpos de agua, una fracción de estos son degradados por microorganismos que producen sustancias ácidas o básicas, como ácidos orgánicos y amonio (NH_4^+), que provocan desbalance en el pH del medio, los lixiviados al ser desplazados afectan la productividad de los suelos y provocan alteración de su composición física y química (Smith et al., 1996; Urbina y Zúñiga, 2015).

Por otro lado, la quema incontrolada de los residuos provoca la liberación y arrastre de polvo y materiales ligeros (Köflusi y Aguilar, 2006), los cuales, además de contener material orgánico, llevan consigo altas concentraciones de metales pesados como el plomo, cobre, níquel, cadmio, arsénico, mercurio, cromo y zinc (Bretzel y Calderisi, 2011), que causan efectos en la salud humana (Smith et al., 1996; Mojiri et al., 2016). En particular, en el estado de Tabasco, se ha reportado la existencia de lugares de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial que no se encuentran ubicados ni regulados debidamente por las autoridades federales, estatales y municipales, debido a que los tiraderos a cielo abierto y algunos rellenos sanitarios se encuentran instalados cerca de centros de población, comunidades, ejidos y rancherías que corren el riesgo inminente de ser afectadas tanto en la salud, calidad de vida y medio ambiente (SERNAPAM, 2016).

Con base en lo anterior, el presente trabajo aborda de manera específica, un diagnóstico cualitativo del centro de transferencia de residuos sólidos urbanos del municipio de Centro, ubicado en la R/a Anacleto Canabal 3ra. Secc. Con la información recaba, se propondrá un plan de muestreo para evaluar los posibles acumulamientos de contaminantes en matrices de agua, suelo y aire.

2. Marco metodológico

El presente capítulo expone una recopilación de las aportaciones en tema de RSU por el Cuerpo Académico de Química Aplicada a la Gestión Ambiental, así como de colaboradores e integrantes de la comisión institucional de residuos de la UJAT. Cabe mencionar, que dichos trabajos han sido enfocados a realizar diagnósticos de la generación y características de los residuos sólidos, determinación de la generación promedio y per cápita, del contenido energético de los RSU, de la composición elemental de los RSU, así como, de la estimación de tendencias de generación para años próximos, buscando como objetivos finales la implementación de planes de manejo en la gestión integral de estos por parte de las autoridades correspondientes.

Es importante mencionar que son escasas las investigaciones sobre los efectos contaminantes y su comportamiento en sitios donde existe disposición de RSU;

si bien, existen trabajos aislados que investigan por separado cada matriz, no existen reportes en los que se consideren las tres matrices básicas como suelo, agua y aire, lo cual permitiría comprender los impactos negativos por biomagnificación, especialmente en zonas urbanas aledañas a estos sitios.

La parte metodológica en la que el Cuerpo Académico ha trabajado es la caracterización de suelos en tres vertientes: Fertilidad según la NOM-021-SEMARNAT-2000, contenido de hidrocarburos o HTP mediante los métodos establecidos en la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 con las modificaciones de Martínez-Chávez et al. (2017) y el contenido de metales considerados como tóxicos, los cuales están especificados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y la NOM-127-SSA1-2021. Además de la evaluación de la calidad del aire ambiente respecto a las partículas suspendidas siguiendo la metodología descrita por la NOM-035-SEMARNAT-1993 Y NOM-025-SSA1-2021, así como la caracterización morfológica del material particulado de los filtros ambientales por medio de Microscopía Electrónica de Barrido con EDS (SEM-EDS).

En este sentido, se realizó una revisión de los reportes científicos referente a la zona, así como la identificación de zonas de acumulación con base en los diagramas de altura que permiten entender el comportamiento hídrico de la zona.

3. Resultados

De acuerdo con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el estado de Tabasco genera un promedio de dos mil 471 toneladas de residuos sólidos urbanos al día, ocupando el lugar 20 a nivel nacional, (SEMARNAT, 2020). Además, solo el 65% es cubierto por los servicios de recolección, y el 35% restante tiene como destino final los cuerpos de agua, el drenaje o es depositado en terrenos baldíos. Evidentemente, el problema, es que en menos de una década la generación de RSU en Tabasco se ha incrementado en más de un 20%. Por ejemplo, en el 2010 cada uno de los 2 millones de habitantes producía entre 750 y 850 g de RSU, mientras que para el 2021, con una población de 2 millones 402 mil 598 habitantes, la generación de basura diaria per cápita se elevó a 1 kg, de

acuerdo con estadísticas de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2022)

Cabe mencionar que el estado cuenta con leyes y reglamentos como la Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco (LPAET), la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Tabasco (LPGIRET), el Reglamento de la LPGIRET (RLPGIRET), la NOM-083-SEMARNAT-2003 que da Especificaciones de Protección Ambiental para la Selección del Sitio, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura y Obras complementarias de un Sitio de Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial y la NOM-161-SEMARNAT-2011 que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado, así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. Sin embargo, estudios como Balcázar et al. (2020) evidenciaron el inadecuado manejo de los desechos que generan diariamente los ciudadanos, así como la actividad empresarial e industrial dentro de la zona. Por lo que, es común observar diferentes tipos de residuos depositados en tiraderos a cielo abierto, a esto se suma que no existen suficientes sitios de disposición final que cumplan con las condiciones para las que fueron destinados.

Por su parte mediante el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales realizado en el 2021 por el INEGI se determinó que solo el municipio de Centro, Tabasco, cuenta con una estación de transferencia cuya función es la de solo trasvase bajo un régimen de gestión pública, y el municipio de Huimanguillo que cuenta con una estación de transferencia cuya función es la selección o separación, compactación y trituración, bajo un régimen de gestión social. Este municipio, genera un promedio aproximado de 600 a 650 toneladas de basura, la que es llevada al Centro de Transferencia, ubicado en la R/a Anacleto Canabal 3ra. Secc., el cual cuenta con una superficie de 12 hectáreas, que se encuentra en comodato con el Gobierno del Estado y es utilizado por la Coordinación de Limpia para transferir los residuos sólidos de los camiones recolectores para ser trasladados al Relleno Sanitario ubicado en la carretera Villahermosa-Teapa Km.25 R/a Alvarado Santa Irene y es de alta compactación. Este es un servicio concesionado a la empresa PASA (Promotora Ambiental de

la Laguna S.A. de C.V.) iniciando su funcionamiento desde 2007, por lo que el confinamiento es responsabilidad de esta.

Cabe mencionar que, dentro de los trabajos realizados para el estado de Tabasco, en especial para el municipio de Centro, se encontraron reportes de Ocaña et al. (2008) quienes calcularon la generación promedio (1,058 Ton/día) y generación per cápita de RSU (1.68 kg/hab/día), la composición elemental de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, azufre mediante los análisis que se establecen las Normas Técnicas Mexicanas para el análisis de Residuos Sólidos Municipales (GAM, 2000), el contenido energético de RSU (4000 kcal/kg) a través de la ecuación Dulong (Tchobanoglous et al., 1994), así mismo, se realizaron la estimación de la tendencia de generación de residuos para el 2020 (2200 Ton/día) a través del modelo de Malthus, logístico y aritmético.

Más tarde, autores como Campechano y Morales (2013) realizaron en Bosques de Saloya de Nacajuca, Tabasco un diagnóstico de la generación y caracterización de RSU. Para lo anterior, utilizaron el método de muestreo estadístico aleatorio de la NMX-AA-61-1985 (SECOFI,1985), del cual obtuvieron un promedio de RSU generado de 99.4285 kg/día y una proyección per cápita de 1.657 kg/hab/día, la cual está por encima de lo publicado en la SEMARNAT que fue de ~0.76 para 2008 y ~0.916 para el 2010. Además, se determinó que el residuo que representa el mayor porcentaje de generación es el orgánico (50.80 %) el cual se asocia a que la zona de estudio se encuentra muy cercana a la central de abasto por lo que los productos de este tipo son de fácil acceso. Por otro lado, los diferentes tipos de plásticos representan ~13% y el vidrio el ~5%. Se concluye que la generación de residuos domiciliarios está directamente relacionada con el estrato social de las personas.

Otra vertiente que se ha comenzado a estudiar es la de los efectos contaminantes en los suelos que han tenido contacto con RSU en el estado de Tabasco, en los que se encontraron trabajos de autores como Sosa-Oliver et al. (2015), quienes realizaron una evaluación de la toxicidad puntual en un sitio de disposición final de residuos municipales con presencia de lixiviados, lo anterior en la R/a. Arroyo Sector San Cipriano, del Municipio de Nacajuca, Tabasco. Se determinaron propiedades fisicoquímicas del suelo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 como pH (8.15 a 8.79), conductividad eléctrica (85.67 a 245.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial oxido-reducción (-1.47 a 49.40 mV) y salinidad (0.04 a

0.1psu), también, se determinaron metales pesados Cu (6.67 a 63.33 mg/kg), Fe (30 a 536 mg/kg), Zn(33.33 a 140 mg/kg), Cr(4.33 a 13.33 mg/kg) y Ni(23333 a 26667 mg/kg), este último elemento supero los límites permisibles (1600-20000 mg/kg) indicados en la NOM-147-SEMARNAT-2004). Por otro lado, realizaron un bioensayo a través de la aplicación de lombrices para conocer el grado de toxicidad del suelo presentándose una evasión >70%, confirmando la existencia de contaminación.

De igual manera, Balcázar et al., (2020) evaluaron los efectos contaminantes que se presentan por la disposición de residuos a cielo abierto en Tenosique, Tabasco. Determinaron que la generación de residuos era de 63 Ton/día, con una generación per cápita de 1.82 kg/hab/día y un aprovechamiento energético de 6793.5 Btu/Lb. Además, se encontraron niveles de concentración en el agua y suelo de elementos como el Cd (1.2 y 2.8), Cr (6.8), Ni (48.1 y 92.2), y Pb (0.5 y 128.6) respectivamente, los cuales todos superaban los límites permisibles propuestos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 y NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004. Además, la simulación del desplazamiento del caudal de lixiviados demostró que se están desplazando al norte en donde se encuentra el arroyo Poleva de Villahermosa, Tabasco, afectando un área de 50, 000 m².

Considerando lo anterior y con la intención de evaluar el posible impacto generado en las diferentes matrices (suelo, agua, aire) el estudio se realiza en el sitio de transferencia de RSU y las zonas aledañas de la R/a Anacleto Canabal 3ra. Secc, Centro, Tabasco, donde se ha identificado las siguientes áreas; la zona de residuos (UTM 15Q 500916.00 m E 1990746.00 m N), una afectada por derivados de hidrocarburos (UTM 15Q 501335.00 m E 1990963.00 m N), otra zona donde habita parte de la población (UTM 15Q 500151.00 m E 1990069.00 m N) y las zonas agrícolas (Figura 1).

En primera instancia se observó que en la zona urbana los pobladores residentes continúan con la recolección y clasificación de los residuos para su venta, por lo que es común presenciar la incineración y el confinamiento en sus propios hogares. Por otro lado, en el sitio de transferencia de RSU existe el acumulamiento de residuos sin control, el encharcamiento de aguas residuales y posibles lixiviados generados por los residuos, que por su propia dinámica de descomposición e interacción con el agua de lluvia, podrían estarse desplazando a zonas bajas inundables logrando infiltrarse y contaminar tanto el suelo como las aguas

subterráneas. Otra preocupación que se encontró en el sitio de transferencia de RSU fue la disposición de derivados de hidrocarburos a la intemperie, así como celdas utilizadas anteriormente para el depósito de estos.

Como parte de la metodología planteada, de la caracterización física y química de los suelos aledaños al sitio de transferencia de RSU de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 se obtuvieron en su mayoría pH neutros (6.6-7.3), medianamente alcalinos (7.4-8.5), y moderadamente ácidos (5.1-6.1), la textura de los suelos corresponde a areno-francosa, franco-arenosa y franco-limosa, la conductividad eléctrica de los suelos en su mayoría presentó efectos despreciables de salinidad (<1.0 dS/m a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) a moderadamente salinos (2.1 – 4.0 dS/m a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por su parte, los valores de densidad aparente se encontraron entre ($1.0 - 1.9\text{ g/cm}^3$, $1.20-1.32\text{ g/cm}^3$, $> 1.32\text{ g/cm}^3$), así mismo los valores de porosidad fueron de muy bajos a medios ($< 40 - 55\%$), en lo que respecta a materia orgánica en los sitios agrícolas fue de baja a media (0.6 – 3.5 %).

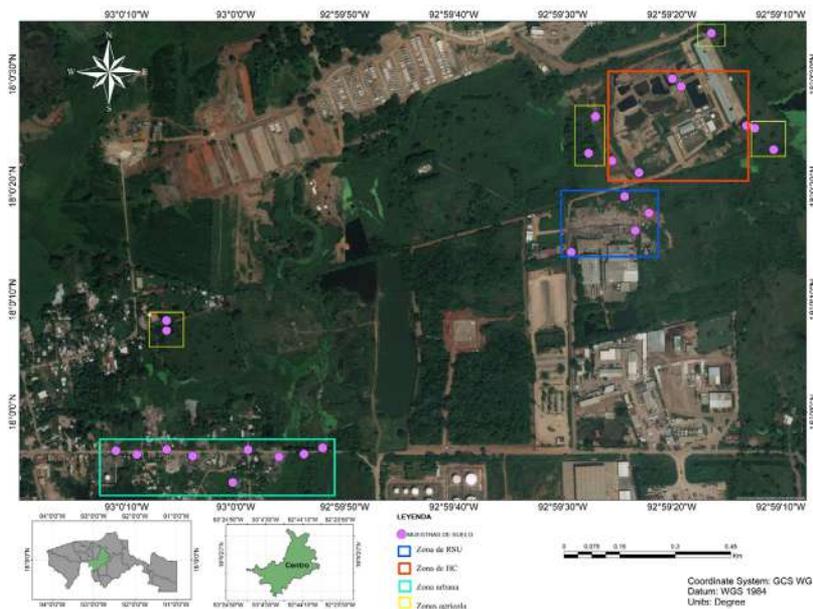


Figura 1. Áreas identificadas en la zona de estudio. Elaboración propia, utilizando el software ArcMap versión 10.5.

En cuanto a la determinación de HTP y considerando la norma mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, todas las muestras de suelo rebasaron los límites máximos permisibles de HC en el suelo de uso industrial (6000 mg/kg) y agrícola (3000 mg/kg). Cabe mencionar que los valores de extracción con los diferentes solventes utilizados son distintos, aunque la normativa indica que se debe realizar con hexano se observa que al realizarlo con otros (diclorometano y cetona) ocurre una mayor extracción, en especial con diclorometano, esto mismo ocurrió con Martínez-Chávez et al. (2017).

Actualmente se continúa trabajando en la determinación de las características mineralógicas de la zona de estudio y el análisis de la presencia de metales pesados en suelos aledaños a los vertederos de RSU y en agua de pozos de uso humano (EAA/IPC-OES) (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, NOM-127-SSA1-2021). Además de la evaluación de la calidad del aire ambiente mediante el monitoreo de las partículas suspendidas siguiendo la metodología descrita por la NOM-035-SEMARNAT-1993 Y NOM-025-SSA1-2021. Así como la caracterización morfológica del material particulado de los filtros ambientales por medio de Microscopía Electrónica de Barrido con EDS (SEM-EDS).

Lo anterior, tiene la finalidad de evaluar y caracterizar las diferentes matrices suelo, agua y aire, que permita establecer el estado actual del sistema impactado, con relación a patrones nacionales o internacionales vigentes, además, de evidenciar el grado de alteración ambiental, que se ha convertido en una problemática que repercute severamente en el medio ambiente, así como en la salud.

4. Discusiones y conclusiones preliminares

Como resultado, las diferentes clases texturales de los suelos encontradas permiten inferir sobre la existencia de un cambio en la estructura del suelo por el manejo, homogenización de horizontes y el tránsito de camiones de carga, así mismo por las actividades antropogénicas como la ganadería, la presencia de maquinaria pesada para el amontonamiento de RSU, la liberación de contaminantes al suelo, así como, la expansión urbana presente. Además, se conoce que la retención de contaminantes depende de la textura, debido a que, las texturas correspondientes a partículas más finas son más reactivas y tienen un área de super-

ficie mayor que el material más grueso, por lo tanto, habrá una mayor retención de contaminantes. Además, en el caso de HC al ser hidrofóbicos estos tienden a tener una menor solubilidad en el agua y por lo tanto se pueden absorberse con mayor facilidad a las partículas del suelo (García et al., 2012).

Por su parte, el pH de los suelos es de suma importancia, debido a que es un indicador de la disponibilidad y movilidad de los metales pesados. Por su parte, la mayoría de los metales pesados se absorben fuertemente en las partículas del suelo, lo que limita su movilidad, esto es a razón de que en los suelos existen una gran cantidad de sitios superficiales químicamente activas. Además, las reacciones de los metales con los componentes del suelo dependerán en gran medida del pH de la solución (Allen, 2000). En presencia de pH bajos (ácidos) los metales son más solubles en la solución del suelo, por lo tanto, tienden a estar más bio-disponibles en las plantas, presentándose problemas de toxicidad por elementos como Al, Mn y Fe (Castellanos et al., 2000; Magra y Ausilo, 2004).

Aunque el sitio de transferencia de RSU no es de vocación de uso agrícola, sí tiene zonas ganaderas muy cercanas al mismo, por lo que, existe preocupación debido a que los metales pesados tienden a bioacumularse en diferentes cultivos y pueden llegar a biomagnificarse, incorporándose a la cadena trófica y por ende afectar a la salud humana (Hu et al., 2020). Además, el sitio es afectado por la presencia de derivados de hidrocarburos (lodos y recortes de perforación) que quedaron expuestos a la intemperie, que son considerados de manejo especial y por lo tanto deben de tener control y manejo tal como lo marca la Guía para la gestión integral de residuos provenientes de las actividades del Sector Hidrocarburos, con el fin de reducir el nivel de impacto negativo en la salud de la población, aire, suelo, agua y fauna evitando la afectación de los ecosistemas (ASEA, 2020).

En general, la contaminación del suelo con hidrocarburos provoca afectaciones como la reducción del desarrollo de la cobertura vegetal, cambios en la dinámica poblacional de la fauna y la biota microbiana, además de la contaminación por infiltración hacia cuerpos de agua subterráneos (Pardo et al., 2004; Zamora et al., 2012). Por lo que una de las preocupaciones es la toxicidad que puede presentarse, en la cual intervienen factores como la cantidad y composición del petróleo, la frecuencia y tiempo de exposición, el estado físico

del derrame, temperaturas, humedad, así como, las características del sitio donde sucedió el derrame (Brito y Gavilán, 2003).

Es importante mencionar que los solventes trabajan dentro de la matriz de los suelos a través del fenómeno de difusión en cada uno de sus componentes, es decir, la capacidad de difusión de un líquido sobre un sólido va a depender de su viscosidad, la cual varía de acuerdo con su temperatura, es decir, a mayor temperatura menor viscosidad y una mayor capacidad de fluir. La capacidad de extracción de un solvente depende de la polaridad de éste y del componente que se esté extrayendo, por lo que es ideal que exista compatibilidad química entre el solvente y el analito (Ortiz & García, 2003).

De igual forma, las diferentes concentraciones en los suelos están en función de la textura, debido a que tienen diferentes componentes, además, por la fisiorción y quimisorción que tienen las arcillas con el HC el solvente no es capaz de arrastrar esos componentes y sacarlos. Esto es lo que se observa con el hexano, el cual no tiene compatibilidad química o no es capaz de arrastrar esos componentes como lo hacen el diclorometano y cetona.

Considerando los valores de concentraciones de HTP, que en su totalidad rebasan los límites máximos permisibles, se puede inferir que las zonas aledañas al sitio de transferencia de RSU se encuentran altamente contaminadas, y estos contaminantes están migrando y siendo transportados por lixiviación o arrastre, además, en las zonas de incineración las altas concentraciones en HTP extraídas sugieren que las partículas tóxicas recaen sobre los suelos y a su vez por la propia degradación que hay en el sitio los componentes son similares al petróleo, por eso se extraen, pero puede que sean grasas o aceites, mismos que pueden infiltrarse a las aguas subterráneas y contaminarlas.

Referencias bibliográficas

Aguilar-Virgen, Q., Armijo-de Vega, C., & Taboada-González, P. (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Ingeniería*, 13(1), 59-62.

- Aguilar Virgen, Q., Armijo-de Vega, C., Taboada González, P., & Aguilar, X. M. (2010). Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. *Revista de ingeniería*, (32), 16-27.
- Armijo, C., Aguilar, Q., Taboada, P., Lozano, G., & Buenrostro, O. (2009). Comparación de la composición de residuos sólidos en una comunidad urbana y una rural de Baja California, México: retos para su manejo adecuado.
- Armijo, C.D., Benítez, S. O., & Barreto, M. E. R. (2008). Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste management*, 28, S21-S26.
- Ávila Lázaro, I., Laines Canepa, J. R., Magaña Magaña, L. A., Sosa Olivier, J. A., Hernández Jerónimo, G., & Núñez Rodríguez, E. (2020). Residuos sólidos en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco: una estimación y potencial de aprovechamiento. https://revistatediq.azc.uam.mx/Docs/Revista_TeDIQ_2020.pdf.
- Balcazar, I. R., Rodríguez, A. G., & Ocaña, J. G. (2020). Efectos de contaminantes en suelo por un vertedero a cielo abierto en Tabasco. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 4(1), 1-18.
- Best practices database. 2003. Gestión Integral Municipal de Residuos en Ramnicu Valcea - Rumania.
- Bosmans, A. y Helsen, L. (2010). Energía a partir de residuos: revisión de tecnologías termoquímicas para el tratamiento de combustibles derivados de residuos (RDF). En Simposio Internacional sobre Energía a partir de Biomasa y Residuos, Fecha: 2010/11/08-2010/11/11, Lugar: Venecia, Italia.
- Calva-Alejo, C. L., & Rojas-Caldelas, R. I. (2014). Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos urbanos en el municipio de Mexicali, México: retos para el logro de una planeación sustentable. *Información tecnológica*, 25(3), 59-72.

- Campechano, P. B., & Bautista, C. M. M. (2013). Diagnóstico de la generación de residuos sólidos urbanos en el fraccionamiento Bosques de Saloya de Nacajuca, Tabasco. *Kuxulkab'*, 19(37).
- Chen, X., Geng, Y. y Fujita, T. (2010). Una visión general de la gestión de residuos sólidos municipales en China. *Gestión de residuos*, 30 (4), 716-724.
- Cobos Sanchez, P. F. (2018). Propuesta de diseño de una estación de transferencia de residuos sólidos inorgánicos municipales generados en los distritos de Soritor, Habana y Calzada–San Martín–2016.
- Das, S., Lee, SH, Kumar, P., Kim, KH, Lee, SS y Bhattacharya, SS (2019). Gestión de residuos sólidos: Alcances y el reto de la sustentabilidad. *Revista de producción más limpia*, 228, 658-678.
- DOF. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos*. DOF. México. 2003 (8 de octubre).
- Eriksson, O., Reich, MC, Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, JO, y Thyselius, L. (2005). La *gestión* de los residuos sólidos municipales desde una perspectiva de sistemas. *Revista de producción más limpia*, 13 (3), 241-252.
- García-Valerio, A., & Martínez, S. A. (2021). Manejo de residuos sólidos urbanos en grandes metrópolis: una revisión. *Medio Ambiente (Brasil)*, 2(5).
- Guerrero, P. S. (2004). *Manejo y gestión de los residuos sólidos municipales en la ciudad de Ensenada*. Tesis del programa de Maestría en Administración Integral del Ambiente.
- Hgaig, B. M. A. (2021). Evaluación económica y ambiental de un sistema de tratamiento y eliminación de los RSU en Misurata (Libia) utilizando la metodología coste/beneficio. Proyecto de vertedero controlado.
- IMIP (Instituto Metropolitano de Investigación y Planeación de Ensenada, Baja California) (2021). Inventario de vertederos a cielo abierto de las zonas de Ensenada, Sauzal y Maneadero. Comunicación directa.
- Jiménez-Martínez, N.M. 2015. La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 17: 29-56.

- Kulkarni, BN y Anantharama, V. (2020). Repercusiones de la pandemia de COVID-19 en la gestión de residuos sólidos municipales: Desafíos y oportunidades. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 743, 140693.
- Luna, M. C. R. (2002). Caracterización de los residuos sólidos domésticos y su diferenciación por estrato socioeconómico: un estudio de caso para Tijuana, BC.
- Mian, MM, Zeng, X., Nasry, AANB y Al-Hamadani, SM (2017). Gestión de residuos sólidos municipales en China: un análisis comparativo. *Revista de ciclos de materiales y gestión de residuos*, 19 (3), 1127-1135.
- Moratorio, D., Rocco, I., & Castelli, M. (2012). Conversión de residuos sólidos urbanos en energía. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (10), 115-126.
- Nanda, S. y Berruti, F. (2021). Gestión de residuos sólidos municipales y tecnologías de relleno sanitario: una revisión. *Cartas de química ambiental*, 19(2), 1433-1456.
- Ocaña, G. L., Barajas, J. R. H., Nava, J. G. C., & Margulis, R. G. B. (2008). La Generación de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio del Centro, Tabasco. *Kuxulkab'*, 14(26).
- Puerta Echeverri, S. M. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos.
- Psomopoulos, CS y Themelis, Nueva Jersey (septiembre de 2014). Una guía para la gestión sostenible de residuos en América Latina. En *Actas del Congreso Internacional de Recuperación de Recursos Waste-to-Energy*, Viena, Austria (págs. 8-9).
- Rúa-Orozco, D., Palacio, J., Melo, A., Reyes, A., Barros, R., & Lora, E. (2015). Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*, 1, 275-296.
- SEMARNAT (2019). *Visión nacional hacia una gestión sustentable: cero residuos*. Gobierno de México.
- Sotelo, S. E. C., & Benítez, S. O. (2013). Gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 7-8.

- Taboada González, P. A., Virgen, Q. A., & Ojeda-Benítez, S. (2010). Apreciación social sobre la problemática de los residuos en comunidades rurales de Ensenada, México. In João Pessoa, Brazil, Tercer Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, September (pp. 8-10).
- Taboada-González, P. A., Aguilar-Virgen, Q., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Análisis estadístico de residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo de México. *Avances en ciencias e ingeniería*, 2(1), 9-20.
- Torri, S. (2017). ¿Qué es un relleno sanitario? *Centro de Estudios y Desarrollo de Políticas Públicas Urbina-Reynaldo, M. O., & Zúñiga-Igarza, L. M.* (2016). Metodología para el ordenamiento de los residuos sólidos domiciliarios. *Ciencia en su PC*, (1), 15-29.
- Varón Valencia, K., Orejuela Cabrera, J. P., & Manyoma Velásquez, P. C. (2015). Modelo matemático para la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos. *Revista ELA*, (23), 61-70.
- Zafra Mejía, C. A. (2009). Metodología de diseño para la recogida de residuos sólidos urbanos mediante factores punta de generación: sistemas de caja fija (SCF). *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 119-126

Capítulo 6

Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental

Enmiendas orgánicas a partir de residuos agroindustriales para aplicación a suelos con derrames de hidrocarburos

Organic amendments from agro-industrial waste for application in soils with oil spills

Fuentes-Domínguez Irene^{1,2}, Ojeda-Morales Marcia Eugenia², González-Garrido José A.³, López-Victorio Carlos J.³ y Morales-Bautista Carlos Mario^{1*}.

¹Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. Tabasco.

²Laboratorio de Biotecnología. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

³Cuerpo Académico Bioquímica y Biología Molecular. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. Tabasco.

Autor de correspondencia: carlos.morales@ujat.mx

Resumen

En la actualidad, los suelos se están degradando cada vez más debido a la intensificación de la industrialización al extraer materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población en aumento con patrones de consumo cambiantes y cada vez más demandantes. Por ende, la generación de diferentes residuos provoca problemas ambientales en ecosistemas y en el suelo y el agua, así como afectaciones a la salud humana. El presente trabajo tuvo como objetivo utilizar el reciclaje de los residuos orgánicos generados por diferentes procesos agroindustriales del estado de Tabasco y convertirlo en enmiendas orgánicas como insumo para la bioaumentación del crecimiento microbiano en la aplicación de suelos contaminados con hidrocarburos, los residuos orgánicos a usar son: suero leche, melaza y pez diablo (*Hypostomus plecostomus sp*). De este último se utilizaron vísceras y esqueleto con escama para elaboración de la harina, por otra parte se realizó su caracterización de valores proximales (pH, CE, densidad específica, cenizas y relación Carbono/Nitrógeno (C:N)) para cada una de las enmiendas orgánicas por triplicado. La finalidad de este trabajo en

los cuerpos académico es multidisciplinar lo cual representa un abanico de posibilidades en diferentes áreas como el sector agrícola y biorremediación principalmente, dando como resultado suelos sostenibles y ampliar o fortalecer el conocimiento científico.

Palabras clave: bacterias, enmiendas orgánicas, Hypostomus plecostomus sp, residuos agroindustriales, suelo.

Abstract

Currently, soils are becoming increasingly degraded due to the intensification of industrialization by extracting raw materials to satisfy the growing consumption of goods and services of a growing population with changing and increasingly demanding consumption patterns. Therefore, the generation of different waste causes environmental problems in ecosystems, such as soil and water pollution, as well as human health. This work aims to use the recycling of organic waste generated by different agroindustrial processes in the state of Tabasco and convert it into organic amendments as an input for the bioaugmentation of microbial growth in the application of soils contaminated with hydrocarbons, the organic waste to be used: whey milk, molasses, and devilfish (*Hypostomus plecostomus* sp) of the latter was used (visors, skeleton with scale for flour production), on the other hand, its characterization of proximal values was carried out (pH, EC, specific density, ash, and carbon-nitrogen relation (C:N)) for each of the organic amendments in triplicate. The purpose of this work in the academic body is multidisciplinary, which represents a range of possibilities in different areas, such as the agricultural sector and bioremediation mainly, resulting in sustainable soils and expanding or strengthening scientific knowledge.

Keywords: bacteria, organic amendments, Hypostomus plecostomus sp, agroindustrial waste, soil.

1. Introducción

Los suelos son la base de los ecosistemas en el planeta, estos recursos naturales tienen propiedades físicas, químicas y biológicas que interactúan entre sí. Sin embargo, los suelos se han deteriorado por actividades antropogénicas, como el uso inadecuado de plaguicidas y fertilizantes, o la sobreexplotación de los recursos naturales. En algunas zonas industriales, es común la contaminación relacionada con los derrames de hidrocarburos. Estos problemas han afectado la producción de alimentos en la última década, por lo que se ha enfatizado la necesidad de restaurar y conservar los suelos (Roma et al., 2013). La calidad del suelo tiene una estrecha relación con la materia orgánica (MO), pues provee nutrientes como C, N, F, P y O que son vitales para el desarrollo de las plantas. Asimismo, la MO contribuye a la captura de carbono, la regulación de la temperatura y mejora de la porosidad, lo cual, reduce el riesgo de erosión y aumenta la capacidad de retención de la humedad, creando así un ambiente propicio para la biodiversidad de la micro y macrofauna. Por estas razones, se sugiere añadir enmiendas orgánicas derivadas de materiales carbonados vegetales o animales a los suelos para favorecer y potenciar la microbiota (Paballo, 2017).

Las enmiendas orgánicas a partir de residuos generados por agroindustrias han demostrado ser alternativas a las de origen sintético, esto se debe a que son más económicas y amigables con el medio ambiente; además, su propio origen las hace una fuente inmediata de macro y micronutrientes que son más fáciles de transformar y mineralizar por microorganismos del suelo. La adición de enmiendas promueve la competencia de la microbiota, reduciendo la presencia de microorganismos patógenos, generando sinergias que impiden la liberación de gases de efecto invernadero como CO_2 y N_2O a través de la formación de micorrizas que fijan el nitrógeno atmosférico. Algunos reportes mencionan que las enmiendas orgánicas mejoran la reproducción vegetativa de los cultivos agrícolas y su producción, convirtiéndose en una alternativa para el desarrollo sostenible (Murillo et al., 2020).

Las enmiendas orgánicas se clasifican en: turba, abonos verdes, estiércol los lodos de depuración, residuos de las cosechas, residuos orgánicos industriales, desechos orgánicos urbanos, composta, vermicomposta, bocashi entre otros. Existen gran número de residuos agroindustriales que han sido empleados como

enmiendas, algunos de ellos son bagazo de caña (*Saccharum* spp.), cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.), cascarilla de arroz (*Oryzativa* L.), aserrín, melaza, residuos de pescados, suero de leche, entre otros (Santos et al., 2016).

Una forma de mejorar la gestión de los residuos orgánicos es transformarlos en enmiendas naturales que puedan ser usadas para restaurar suelos contaminados. Sin embargo, muchos de estos residuos se depositan en vertederos sin control, o se usan para alimentar animales domésticos o para hacer composta en viveros. Por eso, es importante impulsar las investigaciones que desarrollen enmiendas basadas en microorganismos nativos que produzcan biotensioactivos, los cuales son útiles para la biorremediación de suelos (Recalde et al., 2013; Campo Martínez et al., 2014; Vinces, 2014).

En este sentido, una de las grandes limitantes de la implementación de enmiendas orgánicas en las biorremediaciones ha sido las diversas rutas de mineralización del hidrocarburo, ya que este proceso está en función de la disponibilidad del contaminante hacia los organismos.

Existen diversos microorganismos que se producen en las enmiendas orgánicas tales como *Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia*, *Bacillus subtilis*, que son capaces de producir biotensioactivos, los cuales promueven la disponibilidad del hidrocarburo, haciéndole disponible para los microorganismos del suelo y con ello, se reduce su concentración (Verma et al., 2020).

Los biotensioactivos son moléculas anfífilas de origen biológico con la capacidad de disminuir la tensión superficial del hidrocarburo-suelo. Poseen ventajas como: baja toxicidad, alta biodegradabilidad, capacidad para funcionar a pH en rangos de 2 a 12, buena actividad en condiciones extremas de temperatura, en salinidades altas y representan una alternativa no nociva a los surfactantes sintéticos, sobre todo pueden producirse a partir de materias primas renovables. Además, actúan como excelentes detergentes, emulsificantes, espumantes y dispersantes, y han sido empleados en los sectores de agricultura, farmacéutica, alimentos, cosméticos, medio ambiente y en la industria del petróleo (Riojas et al., 2010; Mondragón, 2011).

Los biotensioactivos pueden ser clasificados con base en la estructura química como: glucolípidos, lipopéptidos, ácidos grasos, surfactantes particulados, poliméricos y fosfolípidos (Ojeda Morales et al., 2015; Bohórquez et al., 2021).

Sin embargo, es importante recalcar que existen diversos factores que afectan a la producción y estructura del biotensioactivos entre los que destacan el sustrato, el microorganismo, las condiciones ambientales: pH, temperatura, presión, salinidad, oxígeno disuelto, agitación y factores nutricionales que involucran concentración, tipo de fuente de carbono, nitrógeno y la proporción C/N. (Bohórquez et al., 2021; Gamarra et al., 2017; Fuentes-Domínguez, 2022).

2. Marco metodológico

El análisis consistió en tres etapas: 1) muestreo de recolecta de los residuos orgánicos, 2) procesamiento de las enmiendas orgánicas y 3) caracterización de los valores proximales de cada uno de los sustratos con base en normas AOAC 1990, elaboración propia (Fuentes-Domínguez, 2022).

2.1. Etapa I: Recolecta de los residuos orgánicos

El muestreo consistió en la recolecta de tres residuos orgánicos del estado de Tabasco: 1) suero de leche del municipio de Huimanguillo 17°83'28" N, 93°39'40" W, 2) melaza del Ingenio Benito Juárez, Cárdenas 18°00'59" N, 93°58'17" W y 3) Pez diablo (*Hypostomus plecostomus sp*) Simón Sarlat del municipio Centla 18°34'40" N, 92°80'83" W. Cada una fue conservada en una hielera (4 fueron trasladadas y procesadas en el laboratorio (Figura 1).



Figura 1. Enmiendas orgánicas a) melaza, b) suero leche y c) residuo pez diablo.

2.2. Etapa II: Procesamientos de las enmiendas orgánicas

Se consideraron las enmiendas según su estado: líquida (suero de leche), semi-sólida (melaza) y sólida (residuos de *Hypostomus plecostomus sp.*). A las muestras se les realizó un pretratamiento: a) la melaza se centrifugó a 5500 rpm durante 20 min, se obtuvo sobrenadante (centrifuga marca CHERMLE, modelo Z 230 A), b) su estado debe ser sustituido por: el estado de agregación (Adriana et al., 2015; Verma et al., 2020) (Figura 2).

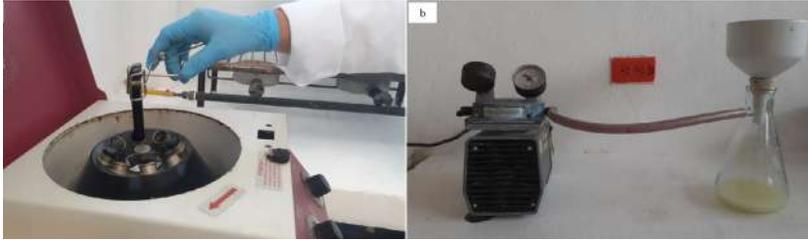


Figura 2. Enmiendas orgánicas: a) melaza y b) suero de leche.

En el caso del pez diablo (*Hypostomus plecostomus sp.*) se preparó una harina. Para esto, se recolectaron 12 ejemplares frescos procesando víseras, esqueletos, escamas, cabezas con medidas aproximadamente 40-50 cm. Fueron procesados de la siguiente forma:

1. Los ejemplares se lavaron individualmente con agua potable para eliminar sedimentos y residuos de sangre.
2. Posteriormente se retiró excedente agua, fueron medidos (cm) y pesados (g).
3. Los ejemplares fueron cortados en fracciones de 4 cm para facilitar y, luego se realizó una molienda-mezclado en una licuadora y se obtuvo una pasta homogénea.
4. La pasta se colocó en charolas de aluminio y se secó en un horno de convección ECOSHEL-9053^a por 8 d a 50 °C.
5. Una vez seca la muestra, se molió (molino manual para granos) y tamizó (malla 2 mm) hasta obtener una harina, la cual se resguardó en recipientes estériles (2 °C) (Figura 3).



Figura 3. Proceso de elaboración de harina de pez diablo (*Hypostomus plecostomus*): a) medir, b) cortar, c) secar, d) moler, e) tamizar y f) conservar. Elaboración propia.

2.3. Etapa III: Caracterización fisicoquímica de las enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas se colocaron en un desecador durante 15 d para eliminar humedad y ser analizadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL Mod JSM-6010-LA; lo anterior con la finalidad de observar elementos presentes y determinar la relación C/N (Chui et al., 2017) (Figura 4).



Figura 4. Tratamiento de enmiendas orgánicas: a) desecador, b) equipo SEM-JEOL-JSM-6010-LA.

Así mismo, a cada una de las enmiendas se les determinó % Ceniza, pH, Conductividad eléctrica (CE) y densidad específica (DE). Las metodologías se describen a continuación:

a) pH: se realizó con base en la NOM-021-RECNACT-2000 a través del método (AS-02), con un potenciómetro marca HANNA modelo HI8633. Empleando vasos de precipitados ($n=3$), se disolvió la melaza (1 g) en 9 mL de agua destilada, por su parte, se vertieron 10 mL de suero de leche y, en un tercer lote, se mezclaron harina de pez diablo (5 g) en 30 mL de agua destilada. Cada lote se mezcló durante 5 min (con ayuda de una varilla de vidrio) y se dejó reposar por 5 min más, esta operación se realizó tres veces, posteriormente se midió el pH con el potenciómetro (Figura 5).

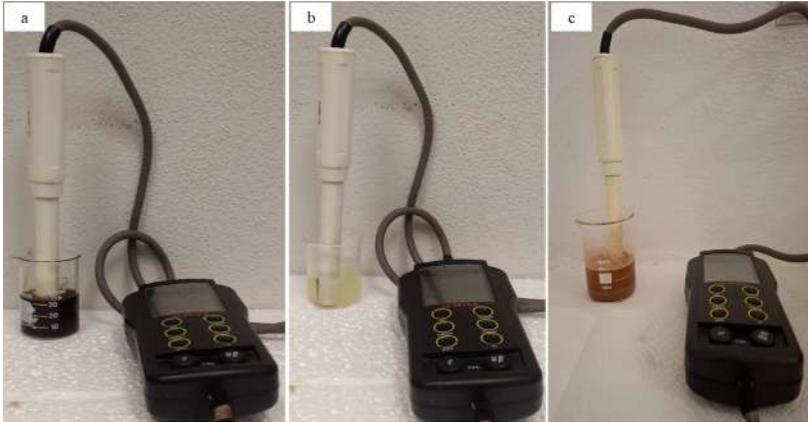


Figura 5. Determinación pH. a) melaza, b) suero de leche y c) harina de *Hypostomus plecostomus*.

b) Conductividad eléctrica: esta se realizó con base en la NOM-021-RECNACT-2000 a través del método (AS-02) empleando un potenciómetro marca HANNA modelo HI8633. Después de la lectura del pH, las muestras se dejaron reposar por 24 h, luego se filtraron cada una para obtener un extracto, al cual se tomó lectura de CE (Figura 6).

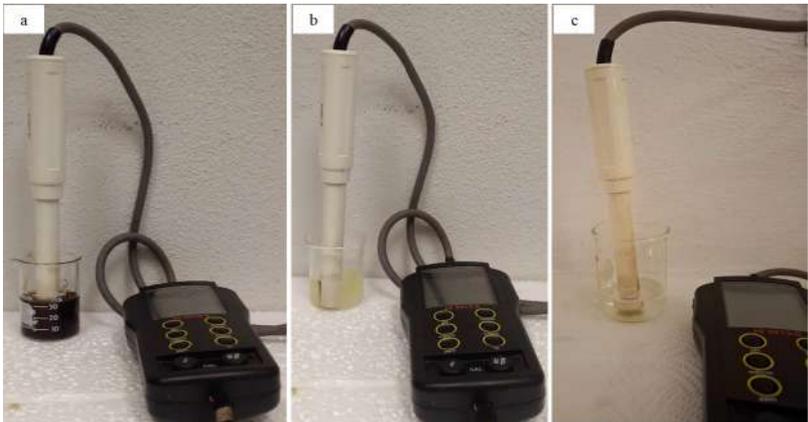


Figura 6. Medición de conductividad eléctrica: a) melaza, b) suero leche y c) harina de *Hypostomus plecostomus*.

c) Densidad específica: se determinó de acuerdo con el método AS-03 de la NOM-021-RECNACT-2000 y de Ojeda Morales et al. (2015). Los equi-

pos empleados fueron una balanza semianalítica marca Velab mod. VE-300. Primero, se registró el peso de un micro picnómetro vacío, posteriormente, este se llenó con agua destilada y se registró el peso; posteriormente se retiró el agua destilada con apoyo de una jeringa estéril y el micropicnómetro se colocó en un horno de secado convencional marca ECOSHEL mod. 90553- A, a 100 °C a 10 min para eliminar el excedente de agua destilada por 24 h. Transcurrido este tiempo, el micropicnómetro nuevamente fue pesado y llenado con las muestras de las enmiendas líquidas y semisólidas (por triplicado). Finalmente, con la harina se utilizó el método del cilindro, en el cual se registra el peso de una probeta y su peso con la muestra, a volumen constante. En todos los casos, los datos capturados se calculan mediante a la ecuación (1, 2 y 3) (Tabla 1 y Figura 7).

Tabla I. Ecuaciones para calcular densidad específica (DE) para las enmiendas.

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Donde
$\rho = \frac{w_m - w_{pv}}{w_{pH2O} - w_{pv}}$ $* 0.998 \frac{g}{cm^3}$	$V_c = \frac{p * Di^2 * h}{4}$	$\rho = \frac{W_s}{V_c}$	<p>ρ= densidad g/cm³ W_m = peso de la muestra (g) W_{pv} = peso micropicnómetro vacío (g) w_{pH2O} = peso del micropicnómetro del agua (g) V_c=volumen del cilindro (cm³) Di= diámetro interno (cm) h=altura (cm) W_s=peso muestra (g)</p>

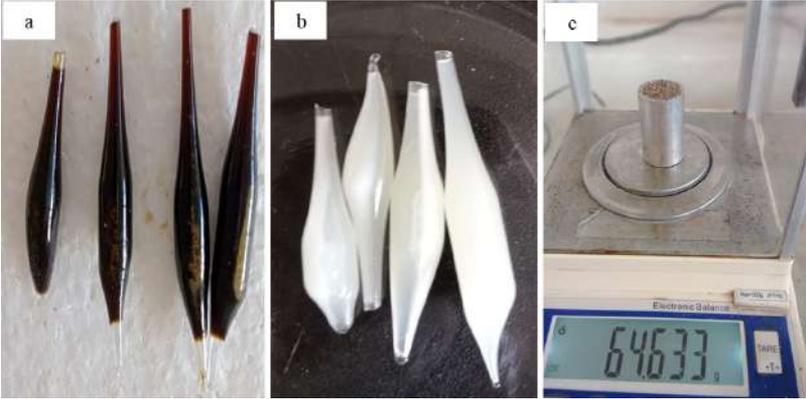


Figura 7. Determinación de densidad específica (D): a) melaza, b) suero de leche, c) harina *Hypostemus plecostomus* sp.

d) Porcentaje de cenizas: este parámetro se determinó con base AOAC 1990 por método de calcinación. Consistió en pesar 2 g de melaza, 15 mL de suero de leche y 5 g de harina 5 g (n=3). Primero, las muestras fueron colocadas en crisoles (previamente establecidos a peso constante, n=3) y, posteriormente, llevados a una mufla a 550 °C por 5 h (Tabla 2 y Figura 8).

Tabla 2. Ecuación empleada para calcular % Cenizas de las enmiendas orgánicas.

Ecuación 1	Donde
$\%cenizas = \frac{w_c - w_{cv}}{w_m - w_{cv}} * 100$	% cenizas w_c = peso de crisol ceniza (g) w_{cv} = peso del crisol vacío (g) w_m = peso muestra (g)

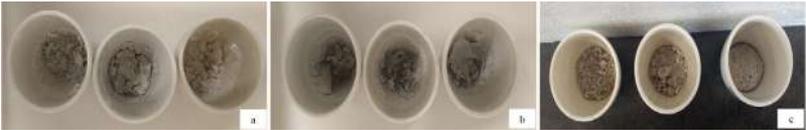


Figura 8. Muestras calcinadas: a) melaza, b) suero de leche c) harina de pez diablo.

3. Resultados y discusiones

En la Tabla 3, se muestran los valores obtenidos en los análisis realizados a las enmiendas orgánicas. En este sentido, se observa que el promedio de pH de las enmiendas orgánicas analizadas varía entre 4.26 y 6.20, en el que la harina de pez diablo es más alto en comparación con las otras dos muestras. Se ha reportado que el pH puede influir en el crecimiento bacteriano, de modo que un pH alto lo inhibe y un pH bajo lo favorece. El contenido de proteínas y azúcares de los alimentos también afecta al pH, ya que las proteínas lo aumentan y los azúcares lo disminuyen al ser degradados a ácidos carboxílicos (Vele et al., 2021). Según Cabello et al., la melaza tiene ácidos orgánicos que le dan un pH de 3.5 a 5.5. Esto puede afectar su composición química, su valor nutricional y su actividad microbiana. El ácido más abundante es el aco-glucónico, que se forma por la enzima glucosa oxidasa (Cabello et al., 2023).

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de enmiendas orgánicas.

Muestras	C/N	%Ceniza	pH	CE (mS/cm)	DE (g/cm ³)
Melaza	45:3 ± 0.08	5.89 ± 0.100	5.36 ± 0.057	0.58 ± 0.090	1.291 ± 0.021
Suero leche	4:5 ± 0.02	1.30 ± 0.011	4.26 ± 0.05	3.92 ± 0.005	1.025 ± 0.155
Harina <i>Hypostemus plecostomus</i>	2:1 ± 0.05	36.65 ± 0.028	6.20 ± 0.005	7.66 ± 0.070	0.527 ± 0.040

El porcentaje de ceniza indica la cantidad de minerales que quedan después de incinerar la materia orgánica. En nuestros resultados, la harina de pez diablo tiene el mayor porcentaje de ceniza (36.6%) porque contiene partes sólidas como vértebras, aletas e intestinos, que son ricas en minerales. La melaza tiene el segundo mayor porcentaje (5.8%) porque contiene azúcares que también se queman parcialmente. El suero de leche tiene el menor porcentaje (1.3%) porque está compuesto principalmente por agua, que se evapora completamente con el calor. La melaza y el suero de leche son similares en su composición, pero el suero de leche es más líquido y tiene más agua que la melaza, lo que explica su menor %Ceniza (Cabello et al., 2023).

Por su parte, la Conductividad Eléctrica o CE, es una técnica indirecta que representa la salinidad presente en la muestra, la cual está relacionada con la concentración de sales minerales, principalmente sodio, así como con ácidos

orgánicos y proteínas por lo cual es una medición útil para establecer el aumento de salinidad que tendrán las matrices en las que son agregadas; por ejemplo, en suelos es un factor determinante para que las plantas puedan desarrollarse adecuadamente. En este sentido, se observa que la melaza es la que posee menor CE y la harina la de mayor contenido, por lo que se evidencia que el pescado contiene mayor cantidad de minerales (Cabello et al., 2023).

Es importante resaltar que las soluciones de electrolito se caracterizan por la capacidad de conducir una corriente eléctrica o por la migración de iones bajo la influencia de un campo eléctrico. Por tanto, la melaza se considera un conductor eléctrico secundario por su contenido de azúcares, agua, minerales, ácidos orgánicos y aminoácidos. El contenido de minerales varía en relación con el origen botánico, se pueden encontrar minerales como el potasio, calcio, hierro, magnesio y aluminio (Ulloa et al., 2012).

Por otro lado, el nitrógeno (N) en las enmiendas es muy variable, pero se observa una relación directamente proporcional con el pH, se ha reportado que, si el pH es bajo, se retardan los procesos de hidrólisis de los compuestos nitrogenados, reduciendo la volatilidad amoniacal (Ulloa et al., 2012; Cabello et al., 2023). Además, se debe considerar que la relación CE y pH permite la disponibilidad de nutrientes en suelo. En ese contexto, cuando el cociente C/N es de 10 a 14, se favorece la proliferación de microorganismos que mineraliza la materia orgánica, es decir cuentan con suficiente carbono para utilizarlo como fuente de energía y nitrógeno para sintetizar sus proteínas, lo que estimula la mineralización de dicho elemento para ser aprovechado.

Es importante mencionar que la mayor presencia de nitrógeno puede ocasionar inhibición de carga microbiana por lo que siempre es importante tener equilibrio (Gamarrá et al., 2017). Por último, se observó que la DE es mayor en la melaza y suero de leche con respecto a la harina de pez diablo, lo cual no está en función del estado físico de la muestra. Por lo que se deduce que si bien, la harina está en estado sólido, los componentes son de baja densidad y alto volumen (Proveda, 2013).

4. Conclusiones

El empleo de material orgánico como sustrato en la remediación de suelos contaminados, así como de suplementos en el sector primario, es una práctica que ha ido en aumento en la última década, siendo un área de oportunidad aquellos residuos que son generados por la industria o pequeños productores del sector agroalimentario. Algunos de los principales parámetros a evaluar en estas aplicaciones son la relación C/N, pH y % Materia Orgánica. Los resultados obtenidos muestran que la harina de pescado a partir de sus residuos es una excelente alternativa para la aplicación en biorremediación, debido que representa una especie invasora que afecta a las especies endémicas y se usan partes que no sirven para el consumo humano directo. Las claves para obtener una harina de alta calidad podrían resumirse a partir de una materia prima fresca, su procesamiento manejando secado a baja temperatura, envasado a baja temperatura y almacenamiento.

La importancia de este trabajo es la valorización de los residuos orgánicos para que sean aplicados en el área de biorremediación, contribuyendo el ahorro energético y/o el cuidado del medio ambiente. Así mismo se estableció una metodología adecuada para la elaboración de harina para cualquier residuos orgánicos sólidos sin alterar sus propiedades químicas y sin desnaturalizarla e igual se propone que esta harina se podría usar para el área agropecuaria ya que esta enmienda se podría combinar con la melaza para el uso en la alimentación bovina, por lo que se recomienda se realicen más pruebas como toxicidad principalmente por posibles metales que podrían contener ya que estos podrían quedar absorbidos en el hígado del pescado.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por la manutención para la realización de los estudios de posgrado. También a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por los equipos e instalaciones donde estoy realizando la parte experimental de este proyecto de investigación, en los laboratorios de Biotecnología y Análisis de Suelos e Hidrocarburos.

Referencias bibliográficas

- Bohórquez, A., Castiblanco, O. (2021). Uso de biosurfactantes para su implementación en los procesos de recuperación mejorada de petróleo. *Revista Inventum*. vol. 16, no. 31. pp. 4-14. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.4-14.
- Cabello, A., García A., Figuera B., Higuera, Y., Vallenilla O. (2013). Calidad fisicoquímica de la harina de pescado venezolana (physical and chemical quality of the venezuelan fish meal). Universidad de Oriente. Venezuela. Vol. 25 N° 4: 414-422. ISSN: 1315-0162 / Depósito Legal pp 198702SU187.
- Campo Martínez, A.D, Acosta Sanchez, R., & Morales-Velasco, S. (2014). Evaluación de microorganismos de montaña (MM) en la producción de acelga en la meseta de Papayán. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2(1), 79-87. <http://revista.unicauca.edu.co/index.php/biotecnología/article/view/322>.
- Chui Betancur, H. N., Acosta Najarro, D. R., & Roque Huanca, B. (2017). Identificación del material de partículas finas (pm_{2.5}) mediante microscopía electrónica de escaneo cerca de la planta de cemento de cesur del distrito de Caracoto, Puno, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 34(3), 72-78.
- Dasai, J. y Banat, I. (1997). Microbial Production of Surfactants and Their Commercial Potential. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, vol. 61, n.o 1, pp. 47- 64.
- Fuentes Domínguez, I. (2015). Biotensioactivos producidos por cepas bacterianas del género *Azospirillum*. *Tesis de maestría*.
- Gamarra Lezcano C.C, Díaz Lezcano M.I., Vera de Ortiz M. Galeano M.P. Antero J., Cabrera Cardús N. (2017 15 de diciembre). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. 9 (46).
- Hernández, H.R., & Torres, L. (2010). Efecto de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Química viva*, 9, 120-145.

- Jiménez-Delgadillo, R., Valdés-Rodríguez, S. E., Olalde-Portugal, V., Abraham-Juárez, R., & García-Hernández, J. L. (2018). Efecto del pH y temperatura sobre el crecimiento y actividad antagónica de *Bacillus subtilis* sobre *Rhizoctonia solani*. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(2), 256-275.
- Madigan, M.M (2021). *Biología de los microorganismos*. Madrid, México, Santaté Bogotá: Pearson, Pretince Hall.
- Mondragón Mora, L. (2011) Aislamiento y caracterización de cepas bacterianas aerobias autóctonas de yacimientos petroleros productoras de biosurfactantes para su aplicación en técnicas de MEOR. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Profesional Ticomán, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., & Fadul-Vasquez, C. J. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y producción agrícola. *Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68. doi:http://doi.org/10.23850/24220582.2503
- Ojeda Morales, M. E., Domínguez-Domínguez, M. (2015). Biosurfactant Production by Strains of *Azospirillum* Isolated from Petroleum-Contaminated Sites. *Soil and Petroleum*, 226, 1-15.
- Paballo T. (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. Roma, Italia: FAO.
- Proveda E. (2013 diciembre). Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad. Área de Nutrición y Salud, Instituto Alpina de Investigación, Colombia. *Rev Chil Nutr* Vol. 40, N°4.
- Riojas, H. H., Torres, L. G. (2010). Efecto de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Química viva*, 9, 120-145.
- Recalde, C., & Echeverría, M. y. (2014). Descomposición de materia orgánica con. *Información Tecnológica*, 24(6), 9-16. doi.: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600003>

- Rojas A. M., Montaña L.P., Bastidas M. J., (2015). Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. *Rev. Colomb. Quim.* 2015, 44(3), 5-10.
- Román P., Martínez M.M., Pantoja A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Santiago de Chile. <http://www.fao.org/publications>.
- Santos-Trinidad, A., & Velasco-Velasco, J. (agosto de 2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52-58.
- Verma, R., Sharma, S., Kundu, L., & Pandey, L. (2020). Investigación experimental de la melaza como único nutriente para la producción de metabolitos alternativos. *Elsevier*(38). doi:10.1016/jwpe.2020.101632
- Vinces-Moreira, E. (2014). Incidencia de los microorganismos eficientes en el tiempo descomposición de abonos de origen animal. *La técnica*, 13, 18-25. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6087634>
- Ulloa, J.A., Mondragón P. M, Rodríguez R. (2010 septiembre). La miel de abeja y su importancia. *Revista Fuente*, No. 4. Universidad Autónoma de Nayarit (UAN). Nayarit, México.
- Vele Salto, A. M., Abril González, M. F., Zalamea Piedra, T. S., & Pinos Vélez, V. P. (2021). Mini revisión: aplicación de líquidos iónicos en hidrólisis ácida de material lignocelulósico para la obtención de azúcares. *Ciencia en Desarrollo*, 12(1), 55-67.
- Verma, R., Sharba S. Mohan L. (2020). Experimental investigation of molasses as a sole nutrient for the production of an alternative metabolite bio-refactant. *Journal of Water Process Engineering* 38 101632.

Conclusiones generales

Los Cuerpos Académicos de Química Orgánica, Química Aplicada a la Gestión Ambiental, así como el de Bioquímica y Biología Molecular, a través del trabajo colaborativo desarrollan diversas líneas de investigación, en las cuales destaca la multidisciplinariedad. A lo largo de esta obra, se han destacado y demostrado la importancia de tres temas.

Primero, se han enlistado nuevas fuentes alternativas de energía de activación, así como rutas de síntesis que promueven energías renovables y sostenibles. Así mismo, el desarrollo de métodos para aislar componentes fitoquímicos de productos naturales de la región, estas pruebas combinan la química orgánica y bioquímica, las cuales contribuyen al avance científico y promueven el desarrollo tecnológico y la creación de nuevo conocimiento en materia de salud y bienestar.

Segundo, se demostró la importancia del análisis transcriptómico, el cual permite la identificación de genes de fusión en el cáncer de mama, lo cual es de suma importancia para la selección de estrategias y tratamientos eficaces para este padecimiento. Destaca que la información presentada es de cánceres de mama más agresivos y, por lo tanto, estos resultados contribuyen en los procesos de identificación de pacientes que requieren un tratamiento y vigilancia más intensivos.

Tercero, se estimó la relevancia de las caracterizaciones geoquímicas de sitios contaminados como base para los métodos de remediación, tales como las enmiendas orgánicas, las cuales han sido cruciales para mejorar la calidad ambiental de las comunidades vulnerables. Por lo tanto, los diagnósticos geoquímicos, permiten reducir los impactos ambientales de los metales e hidrocarburos en la región.

En conclusión, el trabajo colaborativo entre los Cuerpos Académicos refleja la importancia de las alianzas para abordar desafíos complejos de la región, por lo que este libro muestra cómo la investigación y la colaboración en disciplinas como la química orgánica, la gestión ambiental y la biología molecular contribuyen directamente a varios objetivos de la Agenda 2030, promoviendo el desarrollo sostenible a través de la innovación científica, la gestión ambiental responsable y el uso eficiente de recursos.

Acerca del coordinador

Carlos Mario Morales Bautista

Es profesor investigador en la División Académica de Ciencias Básicas (DACB) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Licenciatura en Química, Maestría en Ingeniería y Protección y Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistema Tropicales. Perfil PRODEP y Líder del Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental.

Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel 1. Ha publicado en revista indexadas en JCR, Scopus y CONAHCYT, así como de divulgación científica. Responsable técnico de diversos proyectos científicos y de vinculación, ambos con financiamiento externo e internos a la UJAT.

En 2015 la UJAT le otorgó el mérito académico de la DACB y en 2024 el mérito científico consolidado para el área 1 del CONAHCYT.

Wilfrido Miguel Contreras Sánchez
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Pablo Marín Olán
Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

Analuís Kú Ortíz
Jefa del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas