

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LAGUNA DE LAS ILUSIONES DE TABASCO USANDO NANOBIOADSORBENTES SINTETIZADOS CON RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS

POLLUTANTS REMOVAL AT LAGUNA DE LAS ILUSIONES, TABASCO USING NANOBIOADSORBENTS SYNTHESIZED WITH LIGNOCELLULOSIC WASTES

Zenaida Guerra Que¹, Kristal de María Jesús de la Cruz², Hortensia Eliseo Dantés³,
Adib Abiu Silahua Pavón⁴, Pedro García Alamilla⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i1.361>

¹ Doctora en Ciencias con orientación en Materiales. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Villahermosa, Laboratorio de Investigación 1 Área de Nanotecnología, zenaida.gq@villahermosa.tecnm.mx, ID Orcid: 0000-0001-8389-7930, 99330461111, Km. 3.5 Carretera Villahermosa-Frontera, Cd. Industrial, C.P. 86010 Villahermosa, Tabasco, México.

² Doctora en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Villahermosa, Laboratorio de Investigación 1 Área de Nanotecnología, kristal.jd@villahermosa.tecnm.mx, ID Orcid: 0000-0003-4102-1193, 993 217 1091, Km. 3.5 Carretera Villahermosa-Frontera, Cd. Industrial, C.P. 86010 Villahermosa, Tabasco, México.

³ Doctora en Ciencias de la Administración. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Villahermosa, hortencia.ed@villahermosa.tecnm.mx, ID Orcid: 0000-0003-4006-4669, 9933110762 Km. 3.5 Carretera Villahermosa-Frontera, Cd. Industrial, C.P. 86010 Villahermosa, Tabasco, México.

⁴ Doctor en Ciencias con orientación en Materiales. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Villahermosa, Laboratorio de Investigación 1 Área de Nanotecnología, adib.sp@villahermosa.tecnm.mx, ID Orcid: 0000-0001-5344-1430, 993 102 9658, Km.1 carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México

⁵ Doctor en Ciencias en Alimentos. División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). pedro.garciaa@ujat.mx, ID Orcid: 0000-0002-5325-1327, 9932150675, Carretera Villahermosa-Teapa Km 25 Ra. La Huasteca. Centro, Tabasco. C.P. 86280, México.

Resumen – Este estudio experimental desarrollo y aplicó nanomateriales, es decir materiales a escala nanométrica, con dimensiones menores a 100 nm, usando residuos lignocelulósicos (biomasa residual) como materia prima para la síntesis, por ello se consideran bionanomateriales, con propiedades adsorbentes. El método de síntesis ocupado está basado en un proceso de deslignificación, promovido por agentes químicos, usamos NaOH y HCl, lo que generó carbón activado o parcialmente carbonizado dependiendo las condiciones experimentales, a partir de corona de piña y cáscara de cacao.

Estas propiedades les confieren aplicaciones en remoción o eliminación de contaminantes, en particular, lo demostramos en muestras líquidas tomadas de Laguna de las Ilusiones de México, considerada un área Natural Protegida de nuestro Estado, Tabasco, para probar la capacidad de los nanomateriales bioadsorbentes sintetizados coadyuvando con tecnologías eficientes, modernas y de bajo costo para disminuir el impacto ambiental de nuestros sistemas acuosos eutrofizados y generando a su vez, una alternativa de valorización para una economía circular apropiada en el manejo de residuos, ya que estos contribuyen a la generación de Gases de Efecto Invernadero por descomposición microbiana, cuando llegan a los vertederos.

Palabras Clave: nanomateriales bioadsorbentes, impacto ambiental, manejo de residuos, remoción, contaminantes acuosos, residuos lignocelulósicos.

Abstract – This study was developed and applied nanomaterials, that is, materials on a nanometer scale, with dimensions less than 100 nm, using lignocellulosic waste (residual biomass) as raw material for the synthesis, which is why they are considered bionanomaterials, with adsorbent properties. The synthesis method used is based on a delignification process, promoted by chemical agents, we used NaOH and HCl, which generated activated or partially carbonized carbon depending on the experimental conditions, from pineapple crown and Cocoa Pod Husk.

These properties give them applications in the removal or elimination of contaminants, in particular, we demonstrate it in liquid samples taken from Laguna de las Ilusiones from México, considered a Protected Natural Area of our State, to test the capacity of synthesized bioadsorbent nanomaterials by contributing with efficient, modern and low-cost technologies to reduce the environmental impact of our eutrophicated aqueous systems and generating, in turn, a recovery alternative for an appropriate circular economy in waste management, since these contribute to the generation of Greenhouse Gases from microbial decomposition, when they reach landfills.

Keywords – bioadsorbent nanomaterials, environmental impact, waste management, remotion, aqueous pollutants, lignocellulosic wastes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en muchos Estados de la República Mexicana, en particular en Tabasco, existen lagunas y ríos eutrofizados, lo que implica que el agua dulce pierde sus propiedades de incolora, inodora e insípida y la más importante su inocuidad, lo que involucra que no podrá ser ocupada como fuente de agua de consumo humano [1-2]. En Tabasco vemos características de sistemas eutrofizados en la Laguna de las Ilusiones, la Laguna el Negro, y en el Río Grijalva [3-4] (Figura 1).

Los sistemas eutrofizados en México son consecuencia de vertidos de aguas residuales domésticas y/o industriales, sin un tratamiento eficaz o que no fueron tratados previamente, por lo que aún poseen exceso de Materia Orgánica Biodegradable y/o sintética que causa este desastre ecológico [1-2]. Los tratamientos convencionales actuales de aguas residuales, incluyen los tratamientos fisicoquímicos y biológicos; es decir, el tratamiento primario (químico), secundario (biológico) y terciario (desinfección), los cuales presentan entre sus desventajas que son costosos, ya que requieren consumibles operativos que deben ser suministrados continuamente los 365 días del año, lo que puede ser difícil de proveer; como ejemplo de estos consumibles operativos podemos mencionar a los coagulantes, floculantes ($\text{Al}(\text{SO}_4)_3$), desinfectantes (NaClO), resinas sintéticas de intercambio iónico y cepas de microorganismos [5-6].



Figura 1. Aguas residuales vertidas en La Laguna de las Ilusiones y apariencia color verdoso de un cuerpo de agua característico de sistemas eutrofizados. Fuente El Heraldo de Tabasco.

En México, así como en diversas partes del mundo, no se aplican tecnologías eficientes para eliminar contaminantes de las aguas residuales domésticas llamadas aguas negras, para que estas puedan ser vertidas sin generar impacto al ambiente, o incluso no se aplica tratamiento a las aguas residuales de ningún tipo por la falta de cobertura. En el desarrollo de la discusión del Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024, detallan que a consecuencia del crecimiento sin control de las principales ciudades del Estado como: Villahermosa, Cárdenas, Huimanguillo, Comalcalco, Paraíso, así como la metropolización del municipio de Centro con

Nacajuca, se han presentado problemáticas como, la saturación de la infraestructura urbana, la aparición de asentamientos humanos irregulares, la contaminación de cuerpos de agua, la alta concentración de población en zonas insalubres, entre otros problemas sociales. Este crecimiento demográfico sin control complica la situación porque se necesita recursos suficientes para dotar de servicios a una población extensa, representa un enorme reto y una gran inversión de recursos financieros aunado a los altos costos de potabilización y tratamiento de aguas residuales [3].

Nuestra solución ambiental está alineada con los 17 Objetivos del Desarrollo Sustentable (ODS), propuestos en los Objetivos de la Agenda 2030, en especial con el Objetivo 6: Agua y Saneamiento que establece “garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento”. Existe una preocupación mundial por el reto del agua y se refleja en acciones específicas de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [7]. Es una realidad triste que las Aguas Residuales Domésticas en la mayoría de los países en vías de desarrollo, como el nuestro, son generalmente directamente descargadas sin tratamiento, siendo un porcentaje alto, del total generado a Nivel Estatal y Nacional, como lo afirman, el mismo Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024 (PLED), así como en el Programa Sectorial de Medio ambiente y Recursos Naturales 2020-2024 emitido por la Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)[3,8]. Es por ello, que la prestación de servicios adecuados de Agua y Saneamiento es esencial para lograr los ODS, necesitando PTAR funcionando al 100% de cobertura, en el Estado y en el País. El agua dulce es imprescindible para el desarrollo de la vida humana y de todos los seres vivos del planeta, por lo que en la actualidad el acceso a agua dulce inocua, el saneamiento e higiene es prioritaria, pero este proceso está ligado a la prestación de tratamientos adecuados de agua y saneamiento, esencial para lograr la ODS 6 [9].

La eliminación de contaminantes a tamaño coloidal se lleva a cabo en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), en fase de coaguladores/floculadores, pero requieren consumibles operativos muy costosos como el $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$, resinas sintéticas, para el proceso de espesamiento/clarificación de Aguas Negras. Además, estas sustancias deben ser suministradas continuamente los 365 días del año, lo que puede ser difícil por la situación económica de nuestro estado, escenario que ha derivado en que un 35 a 40% de aguas negras lleguen directo a ríos y caudales [9-10]. Sin embargo, este grupo de investigación, que ya ha trabajado previamente con métodos para generar nanomateriales bioadsorbentes, ha tenido éxito, en generar propiedades superficiales óptimas, para la remoción o eliminación de contaminantes. En particular, logramos remover o eliminar azul de metileno con un 90% de remoción,

usando biomasa lignocelulósica tratada alcalinamente, en pH 6, cercana al neutro, a temperatura de 35 °C [11]. El Sistema de Agua Potable en Tabasco de acuerdo al PNEC 2019-2024, cuenta con 20 plantas potabilizadoras, 355 pozos, 527 subsistemas, y 16 cisternas de rebombeo; de igual manera, el Sistema de Alcantarillado está integrado por 201 subsistemas, 84 estaciones de bombeo (cárcaos), finalmente el Sistema de Saneamiento, tiene 76 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Sin embargo, es un hecho que en el Estado la población ha tenido que padecer la mala calidad y escasez del agua, debido a que un 68% de las aguas no han sido tratadas correctamente en los últimos años; situación que ha derivado en que aproximadamente un 32% de las aguas negras lleguen directo a ríos, lagunas y caudales, sin el debido tratamiento. Este vertido de Aguas Residuales Domésticas provenientes del drenaje de las casas habitación, vulnera los ecosistemas acuáticos, al poner en peligro de extinción, especies endémicas con el manatí o el pejelagarto, y pone en riesgo las reservas de agua dulce para las futuras generaciones [12].

En países en desarrollo, alrededor del 90%, de aguas residuales se descargan sin tratamiento a diferentes cuerpos de agua dulce y aproximadamente dos millones de toneladas de residuos industriales, domésticos y agrícolas, son desechados de igual forma [7].

En el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos naturales emitido por la Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de nuestro país, menciona esta problemática “en el caso de la contaminación del agua, una gran parte de las cuencas en el territorio reciben volúmenes importantes de aguas residuales sin tratamiento provenientes de las zonas urbanas e industriales, así como las que escurren de las zonas agrícolas cargadas de agroquímicos, afectando la biodiversidad y reduciendo la disponibilidad del líquido, lo que se traduce en que la capacidad nacional de tratamiento de aguas residuales es aún insuficiente, ya que cubre tan sólo el 63% de las aguas recolectadas en los sistemas de alcantarillado” [8].

Por lo que, para contribuir a disminuir esta problemática, implementamos un tratamiento de bajo costo, basado en residuos lignocelulósicos (materia prima gratis que es desechada en tiraderos de cielo abierto), que tienen el potencial ser aprovechados como consumible operativo para suplir los materiales convencionales ocupados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en la etapa de Espesamiento de Aguas Negras. Esta tecnología propuesta por nuestro grupo pretende mejorar el rendimiento en operación continua y relación costo/beneficio del proceso; o, incluso en PTAR de nueva creación, con la ventaja de su bajo costo y alta eficiencia en remoción o eliminación de contaminantes. Estos residuos lignocelulósicos son la materia prima de los llamados bioadsorbentes y a partir de métodos de síntesis

de nanomateriales, generamos las propiedades texturales y estructurales ideales para que remuevan Materia Orgánica Biodegradable.

En especial probamos a los nanomateriales bioadsorbentes en un Área Natural Protegida de nuestro Estado la Reserva Ecológica “Laguna de las Ilusiones”. La aplicación de métodos de tratamiento eficientes en las aguas residuales representa un beneficio para México y el resto del mundo, por la disminución del impacto ambiental que sufren nuestros cuerpos de agua dulce.

DESARROLLO

Metodología

A) Síntesis de los Nanomateriales

El método de síntesis se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación I, que forma parte del Área de Nanotecnología en el Tecnológico Nacional de México, específicamente en el Instituto Tecnológico de Villahermosa, ubicado en el km 3.5 de la carretera Villahermosa-Frontera.

Se reunió y examinó la información relevante en la literatura científica para comprender los métodos de preparación y los parámetros que afectan más significativamente las propiedades estructurales y texturales de los materiales nanoadsorbentes basados en biomasa. Existen diversas técnicas, incluyendo inmersión en soluciones químicas ácidas y/o alcalinas, así como tratamientos térmicos, ultrasónicos, por microondas, entre otros.

Para la síntesis del nanomaterial, escogimos residuos de productos agroindustriales de gran impacto económico en nuestro Estado Tabasco y en la Región Sur-sureste, derivado del cacao y de la piña. Para el proceso de preparación se realizó un paso preliminar, que incluía deshidratado y pulverizado, tanto para la cáscara de cacao, como para la corona de piña.

El paso preliminar para la cáscara de cacao incluyó eliminar el pericarpio y endocarpio para solo mantener el mesocarpio y exocarpio. Con este proceso quedo expuesta la cáscara de cacao a partir de su vaina, estos residuos fueron obtenidos de un productor local, que vende al menudeo, grano seco para preparación de pozol en el municipio de Nacajuca, Tabasco.

Se redujo en tamaño las cáscaras de la vaina de cacao cortándolas en trozos para un lavado eficiente y que, al momento del secado, la transferencia de calor sea lo más homogéneo posible. El lavado se hizo en tres tiempos, el primero con agua purificada, el segundo con agua destilada y el tercer lavado con agua desionizada a 40°C. Después del lavado fue secado por convección forzada para retirar el agua superficial de la vaina. Posterior a la eliminación del agua superficial se pesó la muestra y se

llevó a un proceso de secado en horno a 100°C durante un periodo de 24 horas.

Para los residuos de la piña, se recolectó la materia prima, en particular una parte que se desecha llamado corona. Estos materiales los conseguimos del Walmart City Center, con dirección Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 1450, Atasta de Serra, 86100 Villahermosa, Tab. En repetidas ocasiones se asistió para conseguir la cantidad en masa de materia prima necesaria para llevar a cabo todos los experimentos necesarios. Posteriormente, igual se aplicó un paso preliminar de lavado, reducción de tamaño y deshidratado.

El proceso de deslignificación para la síntesis de los nanomateriales fue llevado a cabo con el procedimiento de inmersión en soluciones alcalinas y ácidas. El tratamiento alcalino y/o ácido fue llevado a cabo usando una relación de 1/10 (residuo lignocelulósico: solución ácida o alcalina p/v) a temperatura ambiente por 12 h, se proponen 2 diferentes niveles de concentración. Los polvos de cáscara de cacao o corona de piña que fueron secados al horno, posteriormente fueron sumergidos en una solución de hidróxido de sodio o de ácido clorhídrico respectiva (relación sólido-liquido de 100 g/l) a temperatura ambiente por 12 h. La suspensión se filtró al vacío y se lavó a fondo con agua desionizada hasta que se obtuvo un pH neutro del filtrado y luego se lavó con acetona el material. Se secó en un horno a 80 °C hasta alcanzar el peso constante, se consideró un tiempo prudente de 24 h.

Tabla 1. Residuos lignocelulósicos ocupados en el estudio junto con su tratamiento de síntesis aplicado.

Método	Tratamiento ocupado	Residuo lignocelulósico ocupado
Alcalino-Cacao	Blanco	Cáscara de Cacao
	Tratado con NaOH 0.1 M	Cáscara de Cacao
	Tratado con NaOH al 5M	Cáscara de Cacao
Ácido-Piña	Blanco	Corona de Piña
	Tratado con H ₂ SO ₄ 0.5M	Corona de Piña
	Tratado con H ₂ SO ₄ al 5M	Corona de Piña
	Tratado con H ₂ SO ₄ al 10M	Corona de Piña

B) Caracterización de los nanomateriales sintetizados por Microscopia Electrónica de Barrido y Espectrofotometría de Infrarrojo

La Microscopia Electrónica de Barrido también conocida como SEM (del inglés, Scanning Electron Microscopy), o MEB por sus siglas en español, es una técnica de obtención de imágenes ampliamente utilizada en investigación de materiales debido a su alta resolución y capacidades de analizar características morfológicas, estructurales y químicas de las muestras bajo estudio. Los estudios de MEB se llevaron a cabo utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (modelo Hitachi S-3000N) a una tensión de aceleración de electrones de 20 kV. Este análisis se realizó por parte del Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco de la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, así como la colaboración de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), en la facultad de Ciencias Químicas en el Laboratorio de Pruebas Analíticas no destructivas, con el apoyo del Dr. Gerardo Enrique Córdova Pérez.

Se seleccionó el método de Espectrofotometría de Infrarrojo, también conocida como IR, por sus siglas en inglés. Se basa en la interacción de la radiación infrarroja con la materia por absorción, emisión o reflexión. De esta forma, los espectrofotómetros de infrarrojo (IR) se utilizan ampliamente para identificar sustancias químicas con determinados grupos funcionales. Este análisis se llevó a cabo en el laboratorio especializado ingeniería de procesos, ubicado en la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la UJAT, con la colaboración del Dr. Pedro García Alamilla.

C) Experimentos de remoción de contaminantes en muestras líquidas tomadas en la Laguna de las Ilusiones

Se identificó el sitio idóneo para la toma de muestras, en este caso fue el Vaso Cencali ya que se considera la zona más contaminada de la Laguna de las Ilusiones. El procedimiento de muestreo se basó en la Norma NMX-AA-003-1980 Aguas residuales-Muestreo. Para el proceso de muestreo se usó guantes de nitrilo, cubrebocas y una bata limpia, en recipiente muestreador se enjuagó 10 veces antes de efectuar el muestreo, el enjuague se hizo llenando por completo el recipiente y sumergido totalmente.

El recipiente muestreador se sujetó a un tubo de PVC, dicho tubo nos brindaba una profundidad de muestreo de 30 cm, el muestreo se realizó con guantes en cada mano y cubrebocas, se extrajo aproximadamente 1 litro. La muestra fue etiquetada para ser identificada de manera correcta en cualquier momento, se introdujo en una hielera a 277K (4°C) para el transporte al lugar de los experimentos de adsorción o remoción de contaminantes.

Para nuestra solución problema se midió 15 ml de muestra del agua tomada de la Laguna de las Ilusiones y

se aforó con 135 ml de agua desionizada agitar y se midió el pH de esta muestra, siendo el pH alcanzado con estas condiciones de 6. En un vaso de precipitado de 250 mL se le adicionó 0.6 g de nanomaterial bioadsorbente específico (nanocarbón activado de biomasa de cáscara de cacao o de corona de piña) y 150 mL de la solución problema con pH 6, sobre una Parrilla de calentamiento con agitación magnética, regulando la velocidad de agitación constante a 250 rpm y la temperatura a 35°C. El tiempo del proceso fue de 180 min. Se tomaron muestras cada media hora y a tiempo cero. Previo análisis estas fueron filtradas para evitar presencia de residuos del bionanoadsorbente y luego depositadas en tubos eppendorf, envueltas con papel aislante de la luz y guardadas en refrigerador, para su posterior análisis. Luego se hizo la medición de Demanda Química de Oxígeno, usando viales Hanna de rango alto de 0 a 15000 mg/L, con un espectrofotómetro visible Hanna iris modelo HI801-01 de 115 V.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A) Caracterización de los nanomateriales sintetizados por Microscopía Electrónica de Barrido y Espectrofotometría de Infrarrojo

La propiedades morfológicas y texturales de la biomasa de la cáscara de la mazorca de cacao ocupando tratamientos químicos de hidrólisis ácida y alcalina se investigaron mediante Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). La Figura 1, muestra las micrografías MEB de una zona de la muestra tomada aleatoriamente de la Cáscara de Cacao, deshidratada y pulverizada sin tratamiento alcalino y/o ácido. La estructura lignocelulósica presenta cristales amorfos, posiblemente por la presencia de hemicelulosa, pectina, lignina [13-14]. La superficie se observa lisa, sin elevada porosidad.

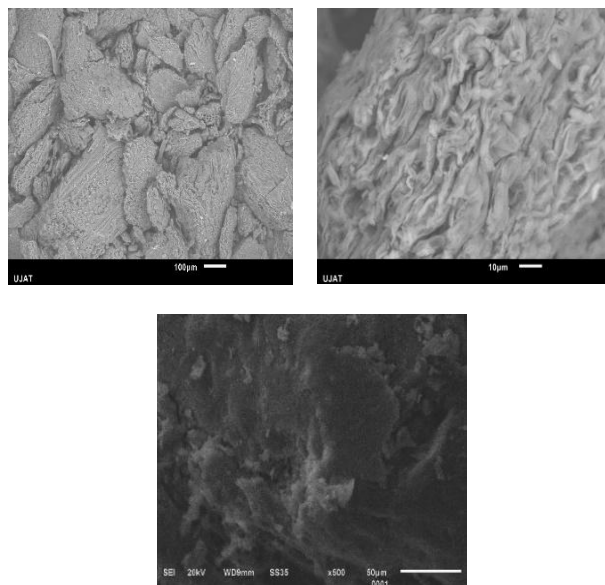


Figura 1. Micrografías de Cáscara de Cacao (CC) deshidratada y pulverizada sin tratamiento con agente químico alcalino.

La Figura 2 muestra las micrografías MEB de una zona de la muestra tomada aleatoriamente de la Cáscara de Cacao, deshidratada y pulverizada con tratamiento alcalino al 0.1 M. La estructura lignocelulósica presenta aun luego del tratamiento cristales amorfos, posiblemente por la presencia de hemicelulosa, pectina, lignina (Iyabode-Akinjokun y otros, 2021), además de poca porosidad. Lo que indica que esta concentración, no promueve una eficiente hidrólisis en la biomasa residual del cacao.

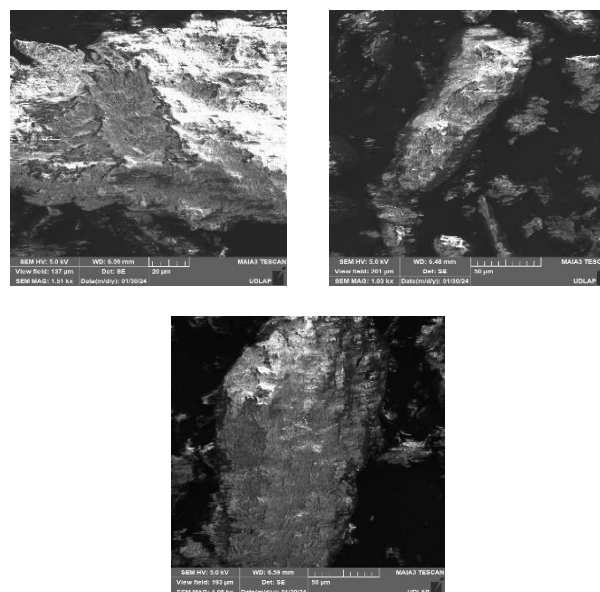


Figura 2. Micrografías de Cáscara de Cacao (CC) tratada con agente de NaOH al 0.1M.

La Figura 3 muestra las micrografías MEB de una zona de la muestra tomada aleatoriamente de la Cáscara de Cacao, deshidratada y pulverizada con tratamiento alcalino al 5 M. La estructura lignocelulósica presenta aun luego del tratamiento cristales amorfos, posiblemente por la presencia de hemicelulosa, pectina, lignina [14], pero, igual presenta cierta periodicidad además de más porosidad. Se observan estructuras individuales alargadas tipo fibra, barras y esféricas en los nanocristales que se logran apreciar, debido a la aglomeración y a los cristales amorfos, en algunas áreas no se logra apreciar claramente la estructura que adquieren. Lo que indica que esta concentración, promueve una parcial hidrólisis en la biomasa residual del cacao y genera un material policristalino [13].

La Figura 4 muestra las micrografías MEB de una zona de la muestra tomada aleatoriamente de la Corona de Piña, deshidratada y pulverizada con tratamiento ácido al 0.5 M. La estructura lignocelulósica presenta aun luego del tratamiento cristales amorfos, posiblemente por la

presencia de hemicelulosa, pectina, lignina [14], pero, igual presenta zonas con periodicidad además de gran porosidad. Se observan estructuras individuales alargadas tipo nanofibra en los nanocrisales que se logran apreciar. Debido a la aglomeración y a los cristales amorfos, en algunas áreas no se logra apreciar claramente la estructura que adquieren. Lo que indica que esta concentración, promueve una parcial hidrólisis en la biomasa residual del cacao [13].

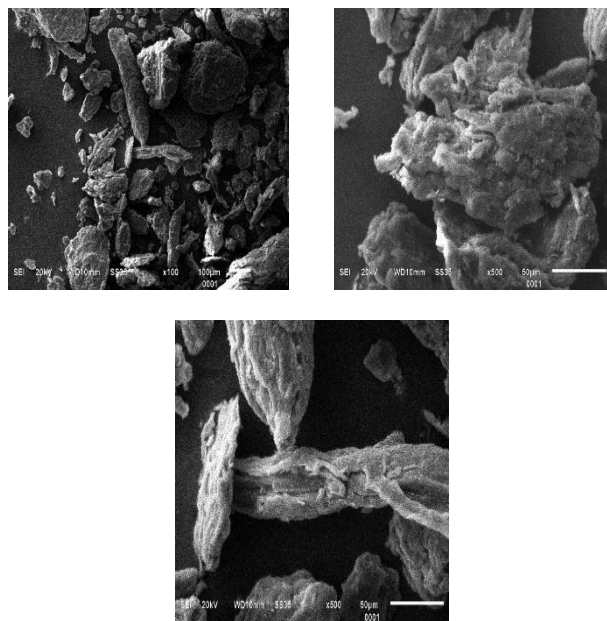


Figura 3. Micrografías de Cáscara de Cacao (CC) tratada con agente de NaOH al 5 M.

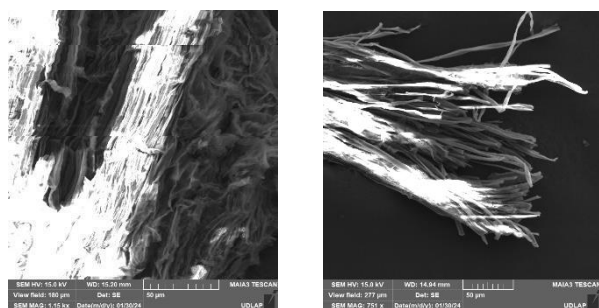


Figura 4. Micrografías de Corona de Piña (CP) tratada con agente de H_2SO_4 al 0.5 M.

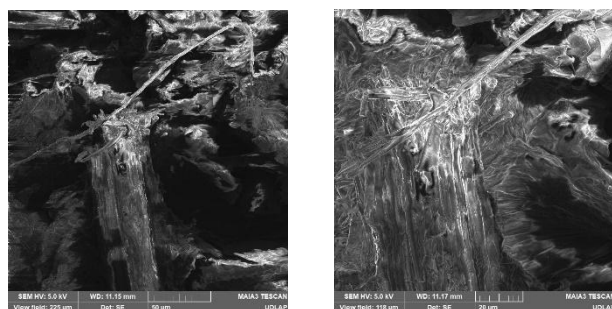


Figura 5. Micrografías de Corona de Piña (CP) tratada con agente de H_2SO_4 al 5 M.

Con este análisis se observó que los tratamientos alcalinos y ácidos, mejoran la estructura nano cristalinidad del material, incluso la superficie o textura ya que destapó más cavidades en la cáscara de sandía y en la corona de piña, en comparación al blanco, favoreciendo el desarrollo de aberturas con mayor profundidad. Estas fosas son dispersas, heterogéneas y amorfas. Estos cambios morfológicos podrían atribuirse a la destrucción parcial de la celulosa, hemicelulosa y lignina producto del tratamiento del hidróxido y el del ácido sulfúrico, estos cambios son más severos, en concentraciones de 5M, que en la de 0.1M para Cáscara de Cacao.

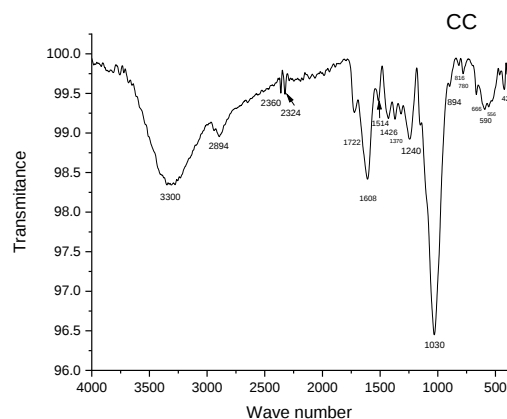


Figura 6. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de CC deshidratada y pulverizada, sin tratamiento.

Los resultados de Análisis de Espectroscopia De Infrarrojo con Transformada de Fourier para muestras de Cáscara de Cacao tratada alcalinamente con soluciones de Hidróxido de Sodio variando la concentración desde 0.1 hasta 5M se presentan en las Figuras 6-8.

La Figura 7, se observa una banda a 1722 cm^{-1} la cual se atribuye a la vibración de estiramiento de los grupos acetilo y urónico del éster en pectina, mientras que los ácidos carboxílicos de hemicelulosas o al enlace éster del grupo carboxílico de los ácidos ferúlico y p-cumárico de lignina, se asocia 1515 cm^{-1} [13-15]. La banda a 1515 cm^{-1} y 1244 cm^{-1} en el espectro de la Figura 7, de Cáscara de Cacao deshidratada y pulverizada tratada alcalinamente al 0.1 M se atribuye al $C=C$ en vibraciones aromáticas planas debido a la presencia de lignina y éter $C-O-C$ que se extiende desde el enlace éter que se encuentra en la lignina. La presencia de estas bandas en el espectro, aunque con intensidad reducida, muestra que el tratamiento alcalino a esta concentración no eliminó eficazmente la lignina en este material. La presencia de lignina en la fibra después del tratamiento químico de hidrólisis alcalina pudiera ser responsable de la baja cristalinidad obtenida a partir de cálculos futuros de XRD. Los picos a 2, 985 y 702 cm^{-1} se deben a las vibraciones de estiramiento y flexión del $C-H$ en las cadenas de celulosa. El amplio pico con un máximo de

3,316 cm^{-1} que corresponde a la vibración del grupo OH resultante de los enlaces inter e intramoleculares de compuestos poliméricos como ácidos carboxílicos y alcoholes, así como de la molécula de agua adsorbida, para el nanomaterial de cáscara de Cacao tratada alcalinamente con soluciones de Hidróxido de Sodio al 0.1 M.

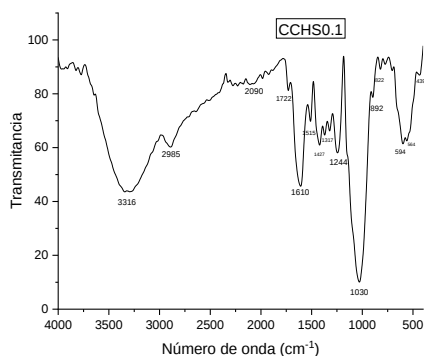


Figura 7. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de CC tratada alcalinamente con solución de Hidróxido de Sodio al 0.1M

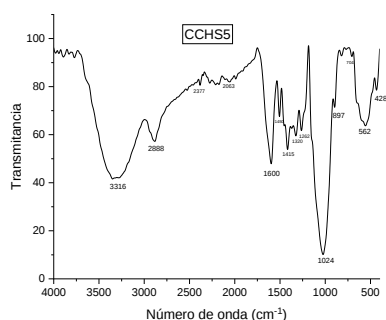


Figura 8. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de CC tratada alcalinamente con solución de Hidróxido de Sodio al 5M.

La Figura 8 para el nanocarbón activado tratado con una mayor concentración de Hidróxido de Sodio al 5M, la banda a 1722 cm^{-1} que se vio en el nanocarbón activado a 0.1 M de Hidróxido de Sodio no está presente. La desaparición de esta banda demostró que todos los enlaces éster de las hemicelulosas fueron escindidos por el tratamiento alcalino. Sin embargo, este tratamiento no afecta los enlaces éter entre la lignina y las hemicelulosas. La desaparición de esta banda, acorde a Outtara et al., 2023 justifica la ruptura de todos los enlaces éster de las hemicelulosas tras el tratamiento alcalino, los cambios en esta región se atribuyen a la vibración de estiramiento C=O con el anillo de benceno (lignina) y los grupos carbonilo y acetilo en el componente xilano de las hemicelulosas.

Se observa en la Figura 8 que las bandas a 1317 cm^{-1} , 1515 cm^{-1} , 790 cm^{-1} , 594 cm^{-1} desaparecen completamente y 1244 cm^{-1} disminuye de intensidad, por lo que, en los materiales tratados alcalinamente al 5 M, la eliminación de lignina fue más efectiva. Una banda intensa de 1024 y 1030 cm^{-1} se identificó en ambos materiales preparados alcalinamente a 0.1 y 5M, se debe a la piranosa C–O–C que estira la vibración esquelética, lo que confirma la presencia de celulosa. Se puede observar que la intensidad de esta banda aumenta con la intensidad progresiva de los tratamientos químicos, lo que podría indicar un aumento en la cristalinidad de las muestras. Los picos a 2,888 y 704 cm^{-1} se deben a las vibraciones de estiramiento y flexión del C-H en las cadenas de celulosa.

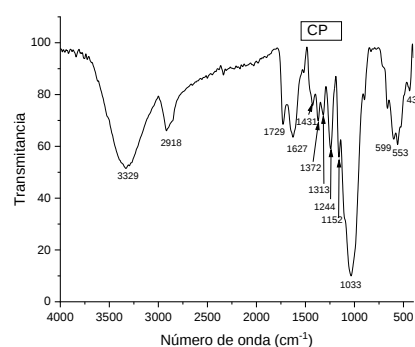


Figura 9. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de Corona de Piña (CP) deshidratada y pulverizada, sin tratamiento.

Los resultados de Análisis de Espectroscopia De Infrarrojo con Transformada de Fourier para muestras de Corona de Piña (CP) tratada ácidamente con soluciones de Ácido Sulfúrico (AS) variando la concentración desde 0.1 hasta 5M se presentan en las Figuras 9-11.

Figura 10. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de CP tratada con agente de H_2SO_4 al 0.5 M.

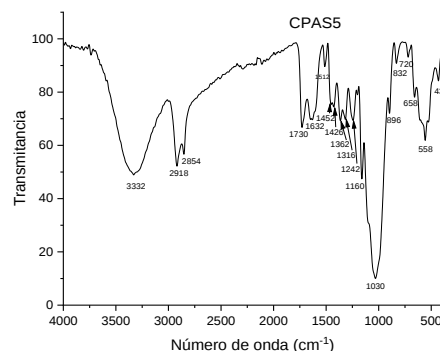


Figura 11. Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de CP tratada con agente de H_2SO_4 al 0.5 M.

El espectro de Infrarrojo de CP tratada ácidamente mostro una banda intensa y ancha de 3300 a 3335 cm^{-1} debido a la vibración del hidrógeno enlazado al grupo hidroxilo en la estructura celulósica de CP. Una banda fuerte y aguda alrededor de 2910 cm^{-1} es atribuida a la vibración del enlace de estiramiento del C-H debido a los grupos de celulosa y hemicelulosa. El pico alrededor de 1735 cm^{-1} es debido al estiramiento del C=O de grupos carbonilo (C=O) en hemicelulosa. Los picos alrededor de 1420 y 1230 cm^{-1} indican la existencia de estructuras de lignina y hemicelulosa. A partir del espectro IR, no se puede concluir que el tratamiento ácido haya eliminado eficientemente hemicelulosa y lignina, así como grupos funcionales superficiales y específicos no están claro [16].

C) Experimentos de remoción de contaminantes en muestras líquidas tomadas en la Laguna de las Ilusiones

El parámetro Demanda Química de Oxígeno, lo usamos en este estudio para determinar la eficiencia en los tratamientos de remoción de contaminantes presentes en una matriz compleja de muestra líquida tomada en Laguna de las Ilusiones, en el Vaso Cencali, de la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, México.

Con el objetivo de hacer un proceso más amplio en discusión, primero probamos los nanomateriales adsorbentes sintetizados con Cáscara de Cacao, tratada alcalinamente, para hacer un estudio comparativo en próxima publicación, de la eficiencia con los nanomateriales sintetizados térmicamente y los tratados con agentes químicos.

La Tabla 2 muestra los valores de DQO de concentración inicial de 5,000 mg/l y diferentes valores de DQO tomados cada 30 minutos, hasta alcanzar un tiempo total de proceso de 180 min. Para el experimento con el material blanco, es decir, CP, solo deshidratada y pulverizada, luego de 30 min alcanzó un 8% de remoción, y luego de 180 min obtuvo un valor de 58%. Para la cinética de remoción usando la CP tratada ácidamente a 5M, luego de 30 min, alcanzó un valor promedio entre el experimento original y réplica de 98% remoción de DQO, y luego de 180 min obtuvo un valor de promedio de 100%, pero el equilibrio másico lo alcanzó aproximadamente a 90 min de proceso.

Tabla 2. Resultados de Demanda Química de Oxígeno y % de remoción de contaminantes en Laguna de las Ilusiones de Tabasco, México, usando nanocarbón activado derivado de CP.

Experimentos	T (tiempo en min)	DQO	Remoción de DQO (%)
Experimento Blanco	0	5,000	0
	30	4,600	8
	90	4,200	16
	150	3,100	38
	180	2,100	58
Experimento 1 (polvo con solución de H_2SO_4 a 5M)	0	5,000	0
	30	100	98
	90	0	100
	150	0	100
	180	0	100
Experimento 1 Réplica (polvo con solución de H_2SO_4 a 5M)	0	5,000	0
	30	100	98
	90	0	100
	150	100	98
	180	0	100

La Tabla 3 muestra los valores de DQO de concentración inicial de 2,000 mg/l y diferentes valores de DQO tomados cada 30 minutos, hasta alcanzar un tiempo total de proceso de 180 min. Para el experimento con el material blanco, es decir, Cáscara de Cacao, solo deshidratada y pulverizada, luego de 30 min alcanzó un 5% de remoción, y luego de 180 min obtuvo un valor de 60%. Para la cinética de remoción usando la Cáscara de Cacao tratada alcalinamente al 5M, luego de 30 min, alcanzó un valor promedio entre el experimento original y réplica de 50% remoción de DQO, y luego de 180 min obtuvo un valor de promedio de 73 %, pero el equilibrio másico lo alcanzó aproximadamente a 150 min de proceso.

Tabla 3. Resultados de Demanda Química de Oxígeno y % de remoción de contaminantes en Laguna de las Ilusiones de Tabasco, México, usando nanocarbón activado derivado de CC.

Experimentos	T (tiempo en min)	DQO	Remoción de DQO (%)
Experimento Blanco	0	2000	0
	30	1900	5
	90	1400	30
	150	1200	40
	180	800	60
Experimento 1 (polvo tratado con solución de NaOH a 5M)	0	2000	0
	30	1000	50
	90	1000	50
	150	1000	50
	180	600	70
Experimento 1 Réplica (polvo con solución de NaOH a 5M)	0	2000	0
	30	1000	50
	90	600	70
	150	600	70
	180	500	75

CONCLUSIONES

Esta tecnología innovadora de bajo costo usando residuos lignocelulósicos es viable técnicamente, ha demostrado una eficiencia alta en la remoción de contaminantes derivados de actividades sanitarias, es decir, compuestos orgánicos que son oxidables como, materia orgánica biodegradable: Heces fecales, orina (urea) y restos alimenticios (proteínas (carne), carbohidratos (pan, tortilla), lípidos (grasas)).

En particular a un pH 6 ligeramente ácido durante los experimentos de adsorción, la Corona de Piña tratada ácidamente ha mostrado, valores más que destacados. La

mazorca de cacao alcanzó entre un 70 a un 75% luego de 180 min de adsorción. Además, se destaca que a 90 min la corona de piña ya habría logrado su equilibrio másico, mejorando los tiempos de proceso, al quedar en menor tiempo. Aunque en ambos casos, los resultados de transparencia y cristalinidad no fueron alcanzados a simple vista.

Sin embargo, cuantitativamente hablando es un resultado óptimo y deseado en el tratamiento de aguas residuales, ya que indica que el agua tratada cumple con los estándares de calidad requeridos y puede ser descargada al medio ambiente sin representar riesgos para la salud pública o el ecosistema circundante.

Es importante destacar que lograr una remoción del 100% de los contaminantes con nanobiadsorbentes puede depender de la naturaleza de los contaminantes presentes en el agua y de las características específicas del proceso de tratamiento. Por lo tanto, es necesario realizar un monitoreo continuo y ajustar las condiciones de operación según sea necesario para mantener la eficiencia y eficacia del tratamiento a lo largo del tiempo. Este proyecto buscará mejorar la factibilidad económica del proceso de remoción ahora trabajando con Cáscara de Cacao tratada térmicamente con flujo de Nitrógeno a temperaturas de calcinación de 500 y 700 °C.

Este trabajo de investigación da pauta para el estudio en otras matrices contaminadas, incluyendo efluentes industriales con alta carga de compuestos orgánicos e inorgánicos del estado de Tabasco.

Asimismo, sería pertinente el diseño y optimización de sistemas de filtración basados en este material, con el objetivo de ofrecer soluciones accesibles y eficientes para el tratamiento de agua en comunidades con recursos limitados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chapa-balcorta C, Guerrero-Arenas R. Eutrofización : abundancia que mata. ¿cómo ves? 2014;(January 2010).
- [2] Arana Ravell JM. Comunidades de microalgas en cuerpos de agua eutrofizados de Yucatán [Tesis de Maestría]. Yucatán:Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.; 2023.
- [3] López Hernández AA, Gobernador Constitucional. Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024. Tabasco, México: Gobierno de Tabasco; 2019.
- [4] Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático. Dictamen Técnico Ambiental de la Laguna de las Ilusiones. Villahermosa, Tabasco, México: Gobierno de Tabasco; 2022.
- [5] Seetasang S, Iwai CB. Enhancing domestic wastewater treatment: Integrating vermifiltration and biochar for heavy metal and microplastic reduction and by-product utilization. Case Stud Chem Environ Eng

[Internet]. 2025;11(November 2024):101025. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.10102>

[6] Guerra Que Z. Diseño y optimización de catalizadores bimetalicos a base de Ni, Cu, Au y Ag soportados en $Al_2O_3-CeO_2$ sintetizados por el método de la recarga destinados para el control de residuos peligrosos en efluentes industriales [Tesis de Doctorado]. Cunduacán, Tabasco: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; 2019.

[7] Organización de las Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023 Edición Especial, Por un plan de rescate para las personas y el planeta. Nueva York, Estados Unidos de América: Departamento de Derechos de Autor de la Organización de las Naciones Unidas; 2023.

[8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024. Cd. De México, México: Gobierno de México; 2020.

[9] Reynolds KA. Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica *Identificación del Problema*. Agua Latinoamérica; 2002

[10] Chiavola A, Di Marcantonio C, D'Agostini M, Leoni S, Lazzazzara M. A combined experimental-modeling approach for turbidity removal optimization in a coagulation-flocculation unit of a drinking water treatment plant. J Process Control [Internet]. 2023;130:103068. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103068>

[11] Guerra Que Z, García Alamilla P, Urrieta Saltijeral JM, Torres Torres JG. REMOVAL OF METHYLENE BLUE IN INDUSTRIAL WASTEWATER USING LOW COST BIOABSORBENTS. Ipsumtec.2023;6(5):

[12] Dong Y, Cheng X, Li C, Xu L, Lin W. Characterization of nitrogen emissions for freshwater eutrophication modelling in life cycle impact assessment at the damage level and urban scale. Ecol Indic [Internet]. 2023;154(May):110598. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110598>

[13] Zambrano-Mite LF, Villasana Y, Bejarano ML, Luciani C, Niebieskikwiat D, Álvarez W, et al. Optimization of microfibrillated cellulose isolation from cocoa pod husk via mild oxalic acid hydrolysis: A response surface methodology approach. Heliyon. 2023;9(6)

[14] Akinjokun AI, Petrik LF, Ogunfowokan AO, Ajao J, Ojumu TV. Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from cocoa pod husk (CPH) biomass wastes. Heliyon [Internet]. 2021;7(4):e06680. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06680>

[15] Ouattara LY, Kouassi EKA, Soro D, Yao KB, Fanou GD, Drogui AP, et al. Optimization of thermochemical hydrolysis of potassium hydroxide-delignified Cocoa (Theobroma cacao L) pod husks under low combined severity factors (CSF) conditions. Sci African [Internet].

2023;22(October 2022):e01908. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01908>

[16] Weng CH, Lin YT, Tzeng TW. Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pineapple leaf powder. J Hazard Mater. 2009;170(1):417-24.

ROL DE CONTRIBUCIÓN	AUTOR (ES)
Conceptualización	Zenaida Guerra Que
Curación de datos	Zenaida Guerra Que
Metodología	Zenaida Guerra Que (principal), Kristal de María Jesús de la Cruz
Administración del proyecto	Zenaida Guerra Que (principal), Pedro García Alamilla
Recursos	Zenaida Guerra Que, (principal), Hortensia Eliseo Dantés
Software	Hortensia Eliseo Dantés
Supervisión	Kristal de María Jesús de la Cruz
Validación	Adib Abiu Silahua Pavón
Visualización	Pedro García Alamilla
Redacción- preparación borrador original	Zenaida Guerra Que (principal), Kristal de María Jesús de la Cruz
Redacción- revisión y edición del trabajo	Pedro García Alamilla



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución