


<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v72i1.55957>

Residuo de *Elaeis guineensis* (Arecaceae) como absorbente de combustibles para aplicación pasiva en ingeniería contra incendios

Hazel Aragón^{1*};  <https://orcid.org/0000-0002-8919-3894>

Paula Calderón-Mesén²;  <https://orcid.org/0000-0002-6243-8054>

Julio F. Mata-Segreda³;  <https://orcid.org/0000-0002-2356-4699>

1. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica; hazel.aragon@ucr.ac.cr (*Correspondencia)
2. Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica; paula.calderonmesen@ucr.ac.cr
3. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, Costa Rica; julio.mata@ucr.ac.cr

Recibido 25-VII-2023. Corregido 17-X-2023. Aceptado 08-II-2024.

ABSTRACT

Elaeis guineensis (Arecaceae) residue as a fuel sorbent for passive application in fire-fighting engineering

Introduction: Spills of flammable liquids can lead to serious accidents, mainly in industrial plants and on roads. To prevent the spread of spills, various forms of collection are used, such as absorption with porous solids. Agroindustrial waste can be used as sorbent materials for flammable liquids.

Objective: To determine the sorption capacity of the residual empty-fruit bunch of oil-palm (*Elaeis guineensis*) and the macaw palm (*Acrocomia* sp.) nutshell for four organic flammable liquids.

Methods: The residual biomasses of *E. guineensis* and *Acrocomia* sp. were assessed as sorbents for spilled fuels (diesel, jet fuel, commercial kerosene, and gasoline). Volumetric measurement of liquid-fuel absorption at 24 °C was taken during a week. Desorption was measured at 50 °C as the drying kinetics, by using moisture scales.

Results: The sorption capacity of the *Acrocomia* sp. material was not satisfactory, compared to the *E. guineensis* residual material, due to differences in the residual architecture of the organic material. This last can absorb $2.4 \pm 0.2 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ at 24 °C, during a one-week period. Diatomite absorbs greater quantities of the organic liquids but, the fluids diffusion at 50 °C is 0.26 ± 0.09 times more slowly in the mineral matrix, because of the greater pore tortuosity in this mineral matrix.

Conclusions: The oil-palm empty fruit bunch of *E. guineensis*, showed lesser but adequate performance than the sorbing behavior for fire hazard mitigation of diatomite. The nutshell of macaw palm (*Acrocomia* sp.) did not prove to be useful for this recovery operation.

Key words: biomass fuel sorbent; *Acrocomia* sp.; diesel fuel; fuel spills; kerosene.

RESUMEN

Introducción: Los vertidos de líquidos inflamables pueden producir accidentes graves, principalmente en plantas industriales y en carretera. Para prevenir la dispersión de derrames, se utilizan diversas formas de recolecta, como la absorción con sólidos porosos. Residuos agroindustriales pueden ser aprovechados como materiales sorbentes de líquidos inflamables.

Objetivo: Determinar la capacidad de absorción de las biomásas residuales del pedúnculo de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) y del endocarpio del fruto de coyol (*Acrocomia* sp.) para cuatro líquidos orgánicos inflamables.



Métodos: Las biomasas residuales de *E. guineensis* y de *Acrocomia* sp. se evaluaron como sorbentes para combustibles derramados (diésel, queroseno de aviación, queroseno comercial y gasolina). Se midió la cantidad de líquido absorbida por las biomasas a 24 °C durante una semana, y su cinética de desorción a 50 °C, usando balanzas de secado.

Resultados: La propiedad sorbente del material de *Acrocomia* sp. no fue satisfactoria, comparada con el pedúnculo de *E. guineensis*, debido a diferencias en arquitectura residual del material orgánico. Esta última biomasa muestra una capacidad de absorción para los combustibles de $2.4 \pm 0.2 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ a 24 °C. La diatomita absorbe mayor cantidad de los combustibles estudiados, pero la difusión de estos fluidos a 50 °C por la matriz mineral es solo 0.26 ± 0.09 veces lo observado para el material de *E. guineensis*, como resultado del mayor grado de tortuosidad de los poros de la diatomita.

Conclusiones: El pedúnculo de palma aceitera (*E. guineensis*) mostró un adecuado potencial desempeño para la aplicación pasiva en la mitigación de los riesgos de incendio, con respecto a la diatomita. El endocarpio del fruto de *Acrocomia* sp. no resultó útil para esta operación de recuperación.

Palabras clave: biomasa absorbente de combustibles; *Acrocomia* sp.; diésel automotriz; derrame de combustibles; queroseno.

INTRODUCCIÓN

Los vertidos de líquidos inflamables son relativamente frecuentes en el lugar de trabajo y ocurren accidentes tecnológicos graves tanto en plantas industriales como en carretera (Díaz-Díaz et al., 2013). Con el fin de prevenir que los derrames se dispersen, se han utilizado diversas formas de recolección, siendo la más utilizada la sorción (absorción/adsorción) por sólidos porosos como la tierra de diatomeas (diatomita) (Alfaro, 2007; Betancur, 2014; Verdeja González et al., 1990).

Los materiales lignocelulósicos representan también una opción como mecanismo para la recolección de vertidos líquidos y contaminantes, ya que presentan buenas propiedades de sorción para distintos residuos (Oviedo Chávez & Vinueza Galárraga, 2020), remoción de metales y tintes (Brizi Neris et al., 2019; Parra Reyes & Pérez, 2023; Roa et al., 2021; Supanchaiyamat et al., 2019) y, al mismo tiempo, tienen el potencial de ser utilizados posteriormente como combustibles sólidos en equipos térmicos estacionarios como hornos y calderas de biomasa (Coto, 2013; De Bhowmick et al., 2018). Además, el aprovechamiento de material lignocelulósico de desecho proveniente de la industria representa una gran oportunidad, ya que es generado por diversas fuentes y usualmente se descarta en grandes cantidades,

conllevando a un problema ambiental, si no se da un adecuado manejo.

Varias fuentes de fibras lignocelulósicas provenientes de residuos agroindustriales pueden servir como materiales sorbentes, tal es el caso de la cascarilla del arroz, el bagazo de la caña de azúcar y el aserrín (Chacón et al., 2018). Sin embargo, estos materiales no se utilizan para este fin, ya que son necesarios para generar calor de proceso, una necesidad más imperiosa que la aplicación pasiva en la recolección de derrames (Doshi et al., 2018; Ortiz González et al., 2006).

La cascarilla o endocarpio del fruto del coyol (*Acrocomia* sp.) es un producto que se usa comúnmente como material para macetas y horticultura y podría considerarse como otro posible material sorbente con diversos propósitos. Este material ha sido probado de forma eficiente como absorbente de tintes (Vieira et al., 2012) y como material para la generación de carbón activado y su uso en la absorción de residuos agroindustriales, entre otros (Vieira et al., 2021). Por tanto, es un material con oportunidad de uso para la absorción de líquidos inflamables.

Otro material lignocelulósico de descarte de la industria que puede resultar aprovechable es el pedúnculo o pinzote de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), ya que este desecho se genera en grandes cantidades luego de la

extracción de los productos para la industria alimentaria y cosmética. En Costa Rica, para el 2015, Chacón et al. (2018) reportaron un total 125 664 t en la región Brunca, 10 771 t en la región Huetar Atlántica y en el Pacífico Central 43 085 t, para un total de 179 520 t.

El objetivo de este estudio ha sido medir la capacidad de absorción de los líquidos orgánicos de prueba (diésel, queroseno de aviación, queroseno comercial y gasolina) por las dos biomásas residuales en estudio. Para lograr la eventual minimización del impacto ambiental derivado del descarte de sorbentes minerales impregnados de combustibles líquidos en verederos y rellenos sanitarios a través del uso y aprovechamiento de los residuos industriales de la palma aceitera *E. guineensis*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales: La biomasa residual de la palma aceitera fue obtenida de Palma Tica (Grupo Numar, Costa Rica) y se molió a un tamaño de partícula promedio de 2.49 mm. La cascarilla del coyol se obtuvo de Green Integrated Energies S. A. (Costa Rica) y se molió a un tamaño de partícula promedio de 2.70 mm. Se utilizó un molino de martillos diseñado y construido de manera *ad hoc* (Aragón et al., 2023). La diatomita utilizada como sorbente de referencia se obtuvo de Industrias Mineras (Barranca, Costa Rica). El diésel automotriz, la gasolina, el queroseno comercial y el queroseno para aviación (Jet Fuel A-1) se obtuvieron de expendios de combustibles automotrices y de Cooperativa Autogestionaria de Servicios Aeroindustriales R. L. (COOPESA, Costa Rica). Los líquidos incluidos en este estudio son relativamente volátiles: gasolina regular, diésel automotriz, queroseno comercial y queroseno para aviación, cuya volatilidad intrínseca fue estudiada en un trabajo anterior (Aragón & Mata-Segreda, 2023).

Curvas de desorción: Se utilizó una balanza de secado Ohaus MB35 para los experimentos de desorción de líquidos impregnados en las fibras biomásicas a 50 °C y la habitual presión

atmosférica de 87 kPa en el campus central de la Universidad de Costa Rica, situado a 1 229 m.s.n.m.

Absorción de líquidos: La determinación del volumen absorbido de líquido a saturación por las biomásas se realizó de manera análoga al procedimiento para medir absorción de agua por cuero ASTM D6015-21 (American Society for Testing Materials, 2022), usando frascos de Kubelka durante una semana a una temperatura promedio de 24 °C. Las mediciones se realizaron por triplicado y se reportan acompañadas de la desviación estándar.

Curvas de desorción de líquidos: La cinética del secado (desorción de fluido impregnante) de materiales porosos muestra dos fases (Fernández-Solano & Mata-Segreda, 2021; Rahimi & Ward, 2005). La primera fase muestra rapidez de secado inicial constante y la segunda fase ocurre con rapidez de secado variable y decreciente. Los parámetros cinéticos pueden calcularse del conjunto de pares de datos masa-tiempo, pero no son útiles para representar la volatilidad de los fluidos impregnantes en condiciones de emergencia de un derrame o posterior utilización de biomasa impregnada como combustible (Smith, 2001). Es de mayor utilidad determinar la rapidez inicial de secado (r_i) y el tiempo de media vida total del proceso de desorción ($t_{1/2}$), es decir, el tiempo que dura en ocurrir el 50 % del proceso total de desorción del fluido en las condiciones del ensayo. La rapidez inicial de secado de las biomásas fue calculada con la ecuación (1):

$$r_i = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{-dm/dt}{m_{\text{final}}} \quad (1)$$

En donde m es la masa del material húmedo al instante t y m_{final} representa la masa de la muestra al final del proceso de secado, a la temperatura del ensayo. Los valores de la derivada en el período inicial se obtuvieron a partir de ajuste lineal de los pares de datos $m - t$ por cuadrados mínimos, para los cuales el coeficiente



de correlación de Pearson fue $|r_p| \geq 0.9990$ (Fernández-Solano & Mata-Segreda, 2021).

Durante la segunda fase cinética, la dinámica de la desorción de fluidos que impregnan matrices porosas (secado) está determinada por la porosidad volumétrica del sólido (volumen vacío), las dimensiones de los poros y la tortuosidad de estos. Al conjunto de estas tres características se le llama porosidad dinámica, y esto se evidencia en el parámetro $t_{1/2}$.

Las fibras de biomasa de *E. guineensis*, *Acrocomia* sp. y diatomita, impregnadas con los combustibles 15 h antes de las mediciones cinéticas, se colocaron en el platillo de la balanza de secado y se siguió la pérdida de masa por desorción por períodos convenientes, de acuerdo con el fluido del caso. Para el caso de la gasolina regular, las mediciones se llevaron a cabo a 24 °C y 87 kPa, usando en este caso una balanza analítica. Todas las mediciones cinéticas se realizaron por triplicado o cinco veces, según el grado de reproducibilidad obtenido.

Microestructura y composición elemental: Para la obtención de las microfotografías, se utilizó un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3700N, con detector de rayos X marca IXRF Systems, que a su vez permite realizar un análisis elemental de las muestras por la técnica de espectroscopía por energía dispersiva de rayos X (EDX). Las muestras particuladas se colocaron en bases metálicas adheridas con cinta de carbón de doble cara. Se obtuvieron imágenes y se realizó el EDX en modo de operación de presión variable con un voltaje de 15 kV. También se obtuvieron imágenes en modo de operación de alto vacío, para el cual se recubrieron las muestras con oro con el cobertor iónico EMS-150RS y se observaron en el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-IT500.

Se tomaron varias micrografías a diferentes escalas, se eligió trabajar con la escala x 1.00k para los tres materiales. En los poros de cada micrografía se trazaron líneas en diferentes direcciones, se realizó una medición manual, con una regla rígida empleando la

escala indicada y en una muestra de 13 poros se determinó el tamaño promedio del poro.

Dureza del endocarpio de *Acrocomia* sp.:

La metodología para la medición de dureza de la biomasa de la cáscara del fruto de coyol, se utilizó un durómetro Buehler modelo Macro-met 5100R (American Society for Testing Materials, 2020).

Tamaño de partícula: Para la determinación del grado de molienda de las biomásas se usó un tamiz analítico AS 200 de Retsch.

Calor de combustión: El poder calórico de la fibra de pinzote de palma se efectuó con una bomba calorimétrica AC500 de LECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2022; International Organization for Standardization, 2020).

RESULTADOS

Los resultados muestran una capacidad adsorptiva similar para el agua y cualquiera de los líquidos orgánicos estudiados, con un valor promedio de $2.4 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. La aseveración se basa en que las magnitudes de las desviaciones estándar indican que no hay diferencia estadísticamente significativa, entre las cifras mostradas (Tabla 1). Se calculó el parámetro estadístico t de Student para la comparación líquido orgánico vs. agua, resultando en valores de t de 0.98, 0.92, 1.6 y 1.2 que al ser contrastados con t (P = 0.05, 4 g.l.) = 2.78 tabulado señalan la similitud entre los resultados numéricos.

Tabla 1

Sorción a saturación de líquidos por fibras de biomasa de *E. guineensis* a 24 °C. / **Table 1.** Saturation sorption of liquids by *E. guineensis* residual fibers at 24 °C.

Líquido	Capacidad de sorción / $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$
Agua	2.5 ± 0.3
Gasolina regular	2.34 ± 0.03
Diésel automotriz	2.8 ± 0.4
Jet fuel A-1	2.1 ± 0.3
Queroseno commercial	2.2 ± 0.1

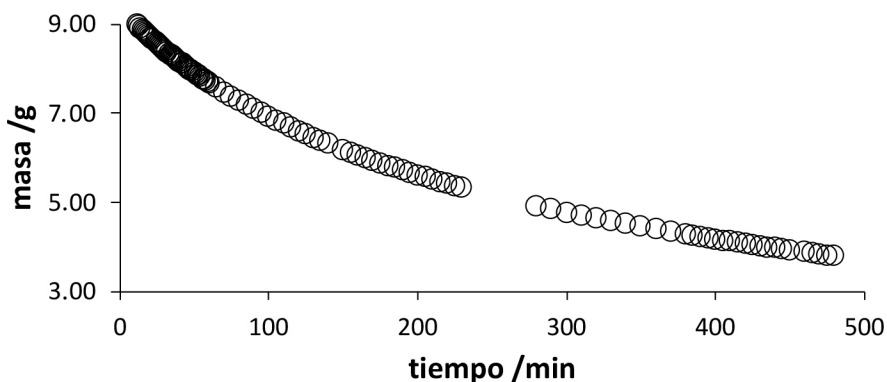


Fig. 1. Curva de secado de la biomasa de *E. guineensis* saturada en queroseno comercial a 50 °C y 87 kPa. / **Fig. 1.** Drying curve of *E. guineensis* biomass saturated with commercial kerosene at 50 °C and 87 kPa.

La Fig. 1 muestra la desorción de queroseno comercial contenido en la biomasa de *E. guineensis* a 50 °C y 87 kPa, en donde se nota la fase cinética lineal.

Los parámetros cinéticos del proceso evaporativo de los fluidos en las biomasas se muestran en la Tabla 2.

Los análisis microestructurales realizados por microscopía electrónica a la biomasa particulada muestran los restos del material en donde se observan algunas estructuras conservadas, como las fibras de *E. guineensis* (Fig. 2), el endocarpio de *Acrocomia* sp. y las valvas de especies de diatomeas que conforman la diatomita (Fig. 3).

Las dimensiones de las bocas de poros en las biomasas son en promedio 0.18 ± 0.03 mm para *E. guineensis*; 0.09 ± 0.03 mm para el endocarpio de *Acrocomia* sp. y 0.11 ± 0.03 mm para la diatomita.

Las consideraciones mecánicas esperadas del análisis de las curvas de desorción hacen prever que la fase cinética inicial lineal en el tiempo refleje la volatilidad intrínseca (Aragón & Mata-Segreda, 2023) de los fluidos impregnantes. Para evaluar esta proposición se evaluó el grado de correlación existente entre los valores de r_i y los valores observados de los parámetros cinéticos de volatilidad intrínseca de los líquidos a 50 °C y 87 kPa.

Tabla 2

Parámetros cinéticos de secado para biomasas impregnadas de combustibles líquidos a 50 °C y 87 kPa. / **Table 2.** Drying kinetic parameters for fuel-impregnated biomasses at 50 °C and 87 kPa.

Material impregnado	$t_{1/2}$ /min	r_i / min ⁻¹
H ₂ O / <i>E. guineensis</i>	19 ± 5	0.043 ± 0.001
H ₂ O / <i>Acrocomia</i> sp.	17 ± 3	0.0046 ± 0.0002
H ₂ O / diatomita	46 ± 12	0.013 ± 0.002
Diésel / <i>E. guineensis</i>	6 ± 2	0.014 ± 0.001
Diésel / diatomita	16 ± 3	0.0029 ± 0.0003
Queroseno de avión / <i>E. guineensis</i>	10 ± 3	0.049 ± 0.005
Queroseno de avión / diatomita	61 ± 2	0.0052 ± 0.0005
Queroseno comercial / <i>E. guineensis</i>	14 ± 5	0.046 ± 0.005
Queroseno comercial / diatomita	55 ± 3	0.0062 ± 0.0005
Queroseno comercial / <i>Acrocomia</i> sp.	19 ± 3	0.0014 ± 0.0001
Gasolina / <i>E. guineensis</i> , 24 °C	14.9 ± 0.8	0.024 ± 0.002
Gasolina / diatomita, 24 °C	15.8 ± 0.1	0.0093 ± 0.0008

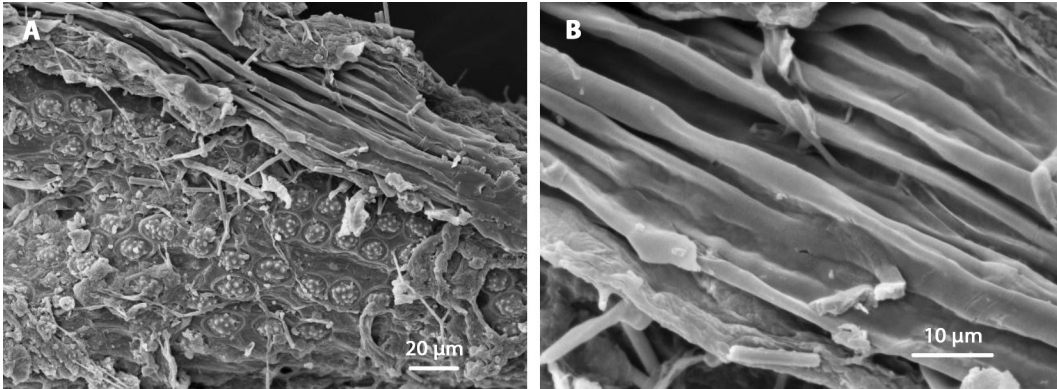


Fig. 2. A. Micrografía de fibras de biomasa de palma aceitera (*Elaeis guineensis*). B. Corte transversal de las traqueidas. / **Fig. 2.** A. Micrograph of oil palm biomass fibers (*Elaeis guineensis*). B. Cross-sectional view of the tracheids.

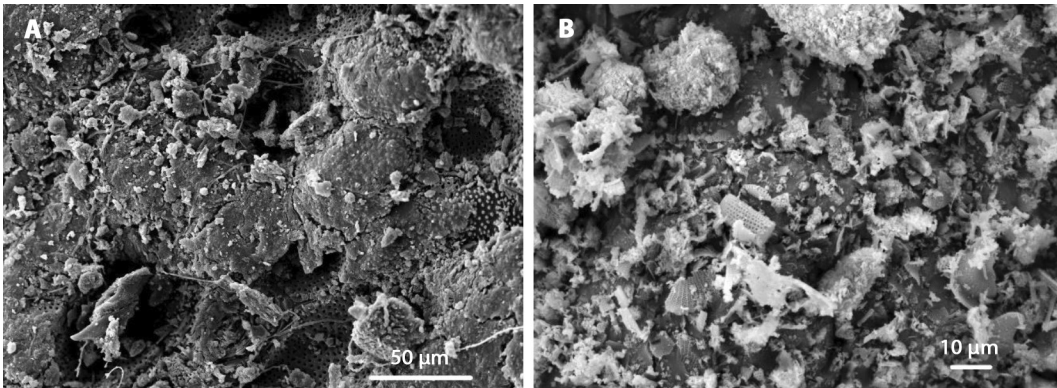


Fig. 3. A. Micrografía del endocarpio de *Acrocomia* sp. (izquierda). B. Diatomita, se observan detalles de las valvas de diatomeas (derecha). / **Fig. 3.** A. Micrograph of *Acrocomia* sp. endocarp (left). B. Diatomite, details of the diatom valves are observed (right).

Para ambos sorbentes se obtuvo la correspondiente ecuación de regresión de r_p como función de la volatilidad intrínseca del diésel, queroseno de aviación y queroseno comercial, valores obtenidos del trabajo de Aragón y Mata-Segreda (2023). Para la biomasa de *E. guineensis* resultó ser $y = (72 \pm 6) \times 10^{-4} x$, y para la de diatomita $y = (9.0 \pm 0.7) \times 10^{-4} x$. El coeficiente de correlación para ambos sorbentes es 0.99. El número reducido de datos solo da una validez cualitativa a la proposición, según se muestra en la Fig. 4.

La Tabla 3 muestra la cantidad relativa de líquido inicialmente absorbido por las biomásas, en los experimentos de curvas de sorción

de líquidos. Los valores se normalizaron a la capacidad adsorptiva de la diatomita.

Los análisis por energía dispersiva de rayos X (EDX) muestran una predominancia esperada en cada material de carbono y oxígeno en las biomásas. Sin embargo, difieren en la composición de elementos en menor concentración (Tabla 4). La composición atómica de la diatomita es típica de su naturaleza mineral.

La medición de dureza de la cáscara de coquito de la *Acrocomia* sp. dio como resultado un valor de 30.5 ± 1.7 HRA (Avner, 1988).

Los resultados para el tamaño de partículas promedio de la biomasa residual de *E. guineensis* fue de 2.49 mm y para la biomasa de

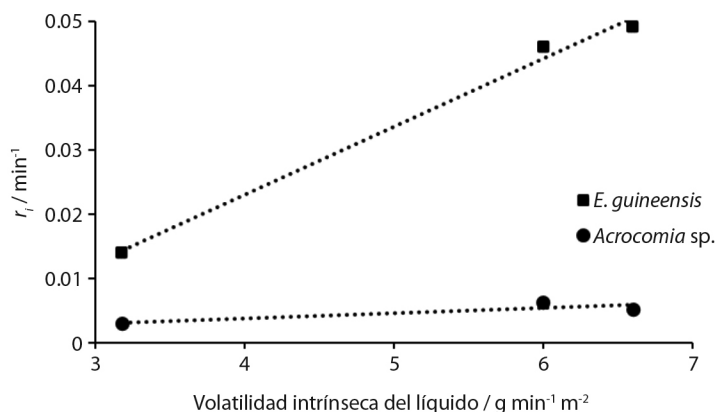


Fig. 4. Correlación de la rapidez inicial de desorción con la volatilidad intrínseca del fluido impregnante. / **Fig. 4.** Correlation of the initial rate of desorption with the intrinsic volatility of the impregnation fluid.

Tabla 3

Parámetro comparativo de la capacidad adsorptiva de líquidos por las biomásas. / **Table 3.** Comparative parameter for liquid-sorption capacity of the biomasses.

Parámetro de sorción relativa	
$\frac{\text{H}_2\text{O en } E. \text{ guineensis}}{\text{H}_2\text{O en diatomita}}$	"0.32 ± 0.04"
$\frac{\text{H}_2\text{O en } Acrocomia \text{ sp.}}{\text{H}_2\text{O en diatomita}}$	"0.10 ± 0.02"
$\frac{\text{Diésel en } E. \text{ guineensis}}{\text{Diésel en diatomita}}$	"1.2 ± 0.3"
$\frac{\text{Queroseno de avión en } E. \text{ guineensis}}{\text{Queroseno de avión en diatomita}}$	"0.8 ± 0.1"
$\frac{\text{Queroseno comercial en } E. \text{ guineensis}}{\text{Queroseno comercial en diatomita}}$	"0.9 ± 0.2"
$\frac{\text{Queroseno comercial en } Acrocomia \text{ sp.}}{\text{Queroseno comercial en diatomita}}$	"0.13 ± 0.03"

Tabla 4

Composición elemental de los materiales sorbentes. / **Table 4.** Elemental composition of sorbent materials.

Elemento Composición elemental (% atómico)	<i>Acrocomia</i> sp.	<i>Elaeis guineensis</i>	Diatomita
Carbono	48.2	50.1	-
Oxígeno	45.4	42.3	51.8
Silicio	2.6	6.3	39.9
Aluminio	1.2	-	5.6
Calcio	1.1	-	0.4
Hierro	0.5	-	1.5
Azufre	0.3	-	0.2
Potasio	-	0.6	0.2
Magnesio	-	0.1	-
Cloro	-	0.1	-



Acrocomia sp. fue de 2.70 mm. La entalpia de combustión de la biomasa *E. guineensis* resultó ser de 17.9 ± 0.4 MJ/kg.

DISCUSIÓN

La literatura comercial indica que la diatomita posee una capacidad de sorción de aceites de motor (20 a 30 átomos de carbono) en el ámbito desde 1.0 hasta $1.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ (Minera José Cholino e Hijos S. R. L., 2010). Al comparar la capacidad sorbente de la biomasa de *E. guineensis* con respecto a diatomita, se concluye que la primera es aceptable para recuperar líquidos orgánicos de tamaños moleculares medios (C_{12}), como el caso de los combustibles estudiados.

El secado de diatomita impregnada de agua es casi tres veces más lento que para las dos biomasa. Una razón es sin duda debida a la mayor afinidad de las moléculas de H_2O con los componentes inorgánicos de la pared de los poros, aunque también hay que considerar las posibles diferencias debidas a la porosidad dinámica de la diatomita (porosidad volumétrica + constricción + tortuosidad).

El valor del tiempo medio para la desorción o secado de los combustibles ($t_{1/2}$) es una medida global de la dinámica de difusión interna de éstos (transferencia interna de masa). Procesos rápidos ocurren en valores de $t_{1/2}$ más cortos y viceversa.

Las micrografías electrónicas muestran que las traqueidas existentes en el tejido *ex-vivo* de *E. guineensis* se han conservado, a pesar del tratamiento agroindustrial termo-mecánico a que es sometido el material fresco para la obtención de aceite de palma. Esto explica la mayor capacidad sorbente de la biomasa de *E. guineensis*, con respecto a *Acrocomia* sp.

Los cálculos de tamaño de bocas de poro se hicieron directamente de las magnitudes obtenidas en las micrografías electrónicas. Esta observación permite inferir que las dimensiones internas de los poros son también de mayor magnitud para la biomasa de *E. guineensis* que para el caso del material de *Acrocomia* sp., propuesta congruente con los parámetros de la

cinética de secado observados, y no contradictorios con la elevada dureza (compactación) del endocarpio de la *Acrocomia* sp.

La existencia de correlación entre r_i y la volatilidad intrínseca de los líquidos impregnantes es esperada, pues ambas cantidades físicas son consecuencia de la tendencia de un material para pasar del estado líquido a la fase gaseosa.

Otro aspecto dinámico de los resultados se relaciona con la eficacia de absorción de los líquidos impregnantes, con respecto a la diatomita. La capacidad total absorbente de las dos biomasa con respecto a la diatomita, cuando son desecados a 50°C . Como el interés de este estudio es explorar la sorción de los combustibles por las biomasa, los resultados son normalizados a la correspondiente cifra para la diatomita.

Aunque las paredes lignocelulósicas de los poros son relativamente hidrofílicas, el resultado observado indica un menor grado de adhesividad H_2O -lignocelulosa. Como la interacción molecular líquido orgánico no polar - pared lignocelulósica es de baja afinidad, la hipótesis indicada en el anterior párrafo encuentra fundamento, es decir que la porosidad dinámica de la diatomita es menor que para las biomasa, especialmente *E. guineensis*, según muestran los valores del tiempo de media vida total del proceso de desorción ($t_{1/2}$).

La baja capacidad sorbente del endocarpio de *Acrocomia* sp. llevó a desechar este residuo agroindustrial como agente para la remediación pasiva de derrames accidentales de combustibles.

Los espectros de EDX revelaron que la composición elemental de la biomasa de *E. guineensis* y del endocarpio de *Acrocomia* sp. tienen una composición elemental de carbono y oxígeno esperable de biomasa lignocelulósicas, contrario al caso de la diatomita que presenta un predominio de oxígeno y silicio.

Los resultados de composición elemental encontrados en este estudio indican una relación atómica $\text{C/O} = 1.4 \pm 0.1$ para la biomasa de *E. guineensis* y $\text{C/O} = 1.37 \pm 0.04$ para *Acrocomia* sp. Los valores reportados en la literatura

para el material de palma son $C/O = 1.92$ (Sukiran et al., 2011) y 1.36 ± 0.07 para el endocarpio de *Acrocomia* sp. (León-Ovelar et al., 2022).

La dureza de la cáscara del coquito de coyol de *Acrocomia* sp. es de 30.5 ± 1.7 HRA. Este parámetro es equivalente a la dureza que exhiben superficies de láminas delgadas de acero comerciales (Avner, 1988). El resultado numérico indica una alta resistencia a la penetración o rayadura, lo cual es congruente con el hecho de que haya sido necesario utilizar un quebrador o molino de martillos. Esto refleja que *Acrocomia* sp. presenta un alto nivel de compactación y por tanto los parámetros cinéticos de secado y el porcentaje de sorción relativa fueron bajos en comparación con la biomasa de *E. guineensis* frente a la saturación de diferentes líquidos.

El tamaño de reducción de partícula en el caso específico de la biomasa de *E. guineensis* fue de un tamaño promedio de 2.49 mm, tamaño que es manejable para ser esparcido en los derrames de líquidos y funcione como absorbente de combustibles para aplicación pasiva en ingeniería contra incendios.

El resultado obtenido en este trabajo para el poder calórico de la biomasa bruta de *E. guineensis* es de 17.9 ± 0.4 MJ kg⁻¹, valor que concuerda con lo reportado por la encuesta de biomasa de Costa Rica de 18.6 MJ kg⁻¹ (Chacón et al., 2018) y por Hussain et al. (2006) de 18.1 MJ kg⁻¹. La encuesta de biomasa residual agroindustrial para Costa Rica (Chacón et al., 2018) analiza 21 materiales lignocelulósicos, cuyo valor promedio del calor de combustión es de 17 ± 3 MJ kg⁻¹ en base seca.

Al considerar el aprovechamiento térmico del biomaterial posteriormente a la atención de un derrame, el rédito energético es aceptable, porque el poder calórico de la biomasa de *E. guineensis* embebido en alguno de los líquidos será la contribución resultante de la biomasa, más el aporte del combustible embebido, que es en promedio de 44 MJ kg⁻¹.

Un cálculo aproximado del potencial calórico esperado a partir de 1.0 g de biomasa de *E. guineensis* que contenga 1.7 g (2.4 cm³) de alguno de los combustibles, permite esperar

una cantidad de energía térmica máxima de 93 MJ por cada kilogramo de biomasa embebida.

Se colige entonces que el pedúnculo de palma aceitera muestra un potencial adecuado para ser usado como material absorbente en la aplicación pasiva para recuperar líquidos derramados, al ser comparado con diatomita. Contrario al material de *E. guineensis*, la biomasa de *Acrocomia* sp. no mostró características apropiadas para el fin estudiado.

Declaración de ética: los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

AGRADECIMIENTOS

A Rodolfo Antonio Hernández Chaverri del Laboratorio de Investigación Ambiental de la Universidad Estatal a la Distancia por su interés en este estudio y al Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA, UCR).

REFERENCIAS

- Alfaro, A. (2007). La tierra moler o "diatomita" como sistema de remoción de sustancias químicas en el laboratorio. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 25(1), 83–96. <https://hdl.handle.net/10669/14633>
- American Society for Testing Materials. (2020). *ASTM E18-22: Standard test methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials*. American Society for Testing Materials, United State of America. <https://www.astm.org/e0018-22.html>
- American Society for Testing Materials. (2022). *ASTM D6015-21 Standard Test Method for Static Water Absorption of Leather*. American Society for Testing Materials, United State of America. <https://www.astm.org/d6015-21.html>



- Aragón, H., Aragón, C., Miranda-Morales, B., & Sanabria-Sandí, F. R. (2023). Caracterización y construcción de un molino de martillos compacto para uso de laboratorio para homogeneizar fibras naturales de *Elaeis guineensis* y *Acrocomia* sp. *Ingeniería*, 33(2), 134–152. <https://doi.org/10.15517/ri.v33i2.54419>
- Aragón, H., & Mata-Segreda, J. F. (2023). Evaporation kinetics of liquid mixtures and safe handling. *ACS Chemical Health & Safety*, 30(2), 54–62. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.2c00070>
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física* (2^{da} Ed). MacGraw-Hill.
- Betancur, J. (2014). Acercamiento a los estudios realizados con microfósiles en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 2014, 73–79. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.16570>
- Brizi Neris, J., Martínez Luzardo, F. H., Paranhos da Silva, E. G., & García Velasco, F. (2019). Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 357, 404–420. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.125>
- Chacón, L., Coto, O., & Flores, M. (2018). *Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica*. EMA Energía Medio Ambiente y Desarrollo, Costa Rica. https://septea.cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/Informe_Final_Actualizacion_Encuesta_Biomasa_SEPSE_CRUSA_EMA_2018.pdf
- Coto, O. (2013). *Uso de los residuos agrícolas orgánicos como fuente de energía: aprovechamiento de recursos y reducción de gases de efecto invernadero en Costa Rica*. Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria, Costa Rica. https://docplayer.es/12647419-Proyecto-informe-de-consultoria-producto-1.html#google_vignette
- Díaz-Díaz, M. A., Rivas-Trasancos, L., Acosta-Sanchez, J., Miller-Palmer, S., Romero Silva, R., Hernández-Hernández, D., & Laffita Rodríguez, C. (2013). *Evaluación a escala de banco de materiales absorbentes para recogida de hidrocarburos en suelos* [Congreso]. IV Congreso Cubano de Petróleo y Gas (PETRO-GAS), La Habana, Cuba. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2013_Rivas_PETRO4-P5.pdf
- De Bhowmick, G., Sarmah, A. K., & Sen, R. (2018). Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. *Bioresource Technology*, 247, 1144–1154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.163>
- Doshi, B., Sillanpää, M., & Kalliola, S. (2018). A review of bio-based materials for oil spill treatment. *Water Research*, 135, 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.034>
- Fernández-Solano, B., & Mata-Segreda, J. F. (2021). Effect of molecular structure on diffusion of alcohols through type-A zeolite pores (0.5 nm). *Journal of Materials Science and Engineering A*, 11, 48–55.
- Hussain, A., Ani, F. N., Darus, A. N., Mokhtar, H., Azam, S., & Mustafa, A. (2006). Thermochemical behaviour of empty fruit bunches and oil palm shell waste in a circulating fluidized-bed combustor (CFBC). *Journal of Oil Palm Research*, 18, 210–218.
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2022). *Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir*. (INTE/ISO 17827-1:2022). Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, Costa Rica.
- International Organization for Standardization. (2020). *Coal and coke—Determination of gross calorific value*. International Organization for Standardization, Suiza. <https://www.iso.org/standard/75883.html>
- León-Ovelar, R., Fernández-Boy, M. E., & Knicker, H. (2022). Characterization of the residue (endocarp) of *Acrocomia aculeata* and its biochars as a potential source for soilless growing media. *Horticulturae*, 8(8), 739. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080739>
- Minera José Cholino e Hijos S. R. L. (2010). *Ficha técnica. Diatomita*. Minera José Cholino e Hijos S. R. L., Argentina. <http://www.mineracholino.com.ar/producto/diatomita>
- Ortiz González, D. P., Andrade Fonseca, F., Rodríguez Niño, G., & Montenegro Ruiz, L. C. (2006). Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. *Ingeniería e Investigación*, 26(2), 20–27. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v26n2/v26n2a03.pdf>
- Oviedo Chávez, A. C., & Vinuesa Galárraga, J. C. (2020). Residuos lignocelulósicos y sus usos: una revisión. *infoANALÍTICA*, 8(1), 133–147.
- Parra Reyes, J. A., & Pérez, E. H. (2023). Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 18–27. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>
- Rahimi, P., & Ward, C. (2005). Kinetics of Evaporation: Statistical Rate Theory Approach. *International Journal of Thermodynamics*, 8(1), 1–14. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijot/issue/5755/76683>
- Roa, K., Oyarce, E., Boulett, A., Al Samman, M., Oyarzun, D., Pizarro, G. D. C., & Sánchez, J. (2021). Lignocellulose-based materials and their application in the removal of dyes from water: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00320. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00320>
- Smith, R. L. (2001). Predicting evaporation rates and times for spills of chemical mixtures. *Annals of*

- Occupational Hygiene*, 45(6), 437–445. <https://doi.org/10.1093/annhyg/45.6.437>
- Sukiran, M. A., Kheang, L. S., Bakar, N. A., & May, C. Y. (2011). Production and characterization of Bio-char from the pyrolysis of empty fruit bunches, *American Journal of Applied Sciences*, 8(10), 984–988.
- Supanchaiyamat, N., Jetsrisuparb, K., Knijnenburg, J. T. N., Tsang, D. C. W., & Hunt, A. J. (2019). Lignin materials for adsorption: Current trend, perspectives, and opportunities. *Bioresource Technology*, 272, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.139>
- Verdeja González, L. F., Sancho Martínez, J. P., Barranzuela Queneche, J. L., & Vásquez Arrieta, E. R. (1990). Características fisicoquímicas de las diatomitas de Bayovar (Perú). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 29(2), 87–93. <http://hdl.handle.net/10651/31438>
- Vieira, S. S., Magriotis, Z. M., Santos, N. A. V., Cardoso, M., & Saczk, A. A. (2012). Macauba palm (*Acrocomia aculeata*) cake from biodiesel processing: An efficient and low-cost substrate for the adsorption of dyes. *Chemical Engineering Journal*, 183, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.047>
- Vieira, W. T., Daltro Bispo, M., de Melo Farias, S., da Silva Vasconcelos de Almeida, A., Lopes da Silva, T., Adeodato Vieira, M. G., Soletti, J. I., & Balliano, T. L. (2021). Activated carbon from macauba endocarp (*Acrocomia aculeata*) for removal of atrazine: Experimental and theoretical investigation using descriptors based on DFT. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105155. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105155>