



USO DEL EPISPERMO DE SEMILLA DE LÚCUMA COMO CARBÓN ACTIVADO

Use of lucuma seed episperm as activated charcoal

Diego Suárez Ramos^{1*} ; Karol Ubillus Ascarza² 

¹ Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria la Molina, 15024, Lima, Perú.

² Ingeniería ambiental, Universidad Nacional Agraria la Molina, 15024, Lima, Perú.

* E-mail: diegosuarez@lamolina.edu.pe

Recibido: 06/04/2022; Aceptado: 15/07/2022; Publicado: 31/07/2022

ABSTRACT

Generation of waste is one of the main problems faced by the agroindustry due to the inadequate management and treatment given. Therefore, it is vital to look for alternatives for the use of waste that can generate added value. The aim of the research was to determine the competence of the episperm lucuma seed (ELS) in the elaboration of activated carbon (AC). H_3PO_4 was used as activating agent at two impregnation ratios (0.2 and 0.4g/g episperm) at three temperatures (600, 700 and 800 °C) and three carbonization times (15, 30 and 45 min). 18 treatments were obtained. Methylene blue (MB) dye was used as adsorbate. Chemical kinetics, adsorption capacity and adsorption isotherms of the MB-AC system were studied. The adsorption surface area was determined by the BET isotherm with gaseous nitrogen, the functional groups and morphology of CA were characterized by infrared spectroscopy and scanning electron microscopy, respectively. The results show a kinetics of the pseudo second order, while the adsorption behavior in relation to the MB concentration corresponds to a sigmoidal isotherm which fits the Frumking-Fowler-Guggenheim (FFG) isotherm model. The treatment that presented the highest percentage of adsorption (94.5 %) was AC0.4_600°C30', obtaining a surface area of 648 m²/g. It is concluded that ELS is suitable for use as activated carbon.

Keywords: chemical activation | FFG adsorption isotherm | BET adsorption isotherm | lateral adsorption | scanning electron microscopy SEM | circular economy.

Forma de citar el artículo (Formato APA):

Suárez, D., & Ubillus, K. (2022). Uso del epispermo de semilla de lúcuma como carbón activado. *Anales Científicos*. 83(1), 97-108. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v83i1.1887>

Autor de correspondencia (*): Diego Suárez Ramos. Email: diegosuarez@lamolina.edu.pe

© Los autores. Publicado por la Universidad Nacional Agraria La Molina.

This is an open access article under the CC BY

RESUMEN

La generación de residuos es uno de los principales problemas que enfrenta la agroindustria debido a su inadecuado manejo. Por lo tanto, es vital buscar alternativas de aprovechamiento que generen valor agregado. El objetivo de la investigación fue determinar la competencia del epispermo de la semilla de lúcuma (ESL) en la elaboración de carbón activado (CA). Se usó H_3PO_4 como agente activante a dos razones de impregnación (0.2 y 0.4g /g epispermo), a tres temperaturas (600, 700 y 800 °C) y tres tiempos (15, 30 y 45min) de carbonización. Se obtuvieron 18 tratamientos. El colorante azul de metileno (AM) se usó como adsorbato. Se estudió la cinética química, capacidad de adsorción e isothermas de adsorción del sistema AM-CA. Se determinó del área superficial de adsorción mediante la isoterma BET con nitrógeno gaseoso, se caracterizó los grupos funcionales y la morfología del CA mediante espectroscopía infrarroja y microscopía de barrido electrónico, respectivamente. Los resultados muestran una cinética de pseudo segundo orden, mientras que el comportamiento de la adsorción corresponde a una isoterma sigmoideal la cual se ajusta al modelo de isoterma Frumking-Fowler-Guggenheim (FFG). El tratamiento que presentó el mayor porcentaje de adsorción (94.5 %) fue CA0.4_600°C30', obteniendo un área superficial de 648 m²/g de CA. Se concluye que el ESL es apto para su aprovechamiento como carbón activado.

Palabras clave: activación química | isothermas de adsorción FFG | isoterma de adsorción BET | adsorción lateral | microscopía de barrido electrónico MBE | economía circular.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la globalización de las economías de mercado ha causado cambios en la agricultura, primando el modelo de producción lineal dejando de lado el modelo circular (Jiménez et al., 2020). Una consecuencia de este hecho es el aumento de la generación de los residuos agroindustriales, los cuales están causando impactos ambientales negativos asociados a la emisión, descarga e inadecuada disposición final (Cury et al., 2017). En esta problemática se encuentran la agroindustria de la lúcuma cuya producción en crecimiento genera residuos de cáscara, semilla y epispermo los cuales podrían tener aplicaciones para la industria (Borbor, 2017). Por ejemplo, de la semilla se puede extraer aceite el cual posee diferentes metabolitos tales como como ácidos grasos (linoléico, oleico, palmítico esteárico y linolénico), alcoholes grasos, carotenos, tocoferoles y fitoesteroles (β -sitosterol y estigmasterol); además de poseer propiedades curativas cicatrizantes y desinflamantes (Guerrero-Castillo et al., 2021; Rojo et al., 2010; Poljšak et al., 2020). Asimismo, tiene una elevada concentración de almidón (83.97% m/m) por lo que puede ser una fuente secundaria para este polisacárido (Alvarez-Yanamango et al., 2020; Li et al., 2021). Respecto a la cáscara, se ha encontrado la presencia de metabolitos fenólicos, lípidos polares y flavonoides con propiedades antioxidante (Zhang et al.,

2021). Sin embargo, investigaciones que utilicen el epispermo de la semilla de lúcuma no han sido encontradas. En consecuencia, la investigación brinda una alternativa para la producción de carbón activado utilizando el método químico mediante activación con ácido fosfórico (Masullo et al., 2021). De esta manera se busca el aprovechamiento de esta materia bajo el enfoque de la economía circular.

El estudio tuvo como objetivo evaluar la pertinencia del epispermo de la semilla de lúcuma como materia prima en la obtención de carbón activado mediante activación química.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de los carbones activados

Las semillas de lúcuma fueron lavadas y se removió los epispermos. Posteriormente, fueron secados a estufa durante 24 horas a 80°C. La materia seca se trozó y homogenizó hasta obtener partículas de tamaño aproximado de 1 cm de diámetro. La determinación del porcentaje de humedad, sólidos volátiles y cenizas se hicieron por triplicado siguiendo la norma a ASTM D1762-84. Mientras que la determinación de carbono fijo se obtuvo por diferencia mediante la siguiente fórmula:

$$\%Carbono\ fijo = 100\% - (\%Humedad + \%Material\ volátil + \%cenizas)$$

El epispermo trozado fue mezclado con el agente activante H_3PO_4 a dos razones de impregnación (0.2g y 0.4 g/g epispermo) por 4 horas. Posteriormente, fue secado en la estufa a 80 °C por 12 horas. La carbonización fue corrida para cada razón de impregnación a tres temperaturas (600 °C, 700°C y 800 °C) y cada una a tres tiempos (15 min, 30 min y 45 min), obteniéndose en total 18 tratamientos. Los productos activados fueron lavados por separado con

agua ultrapura y secados en la estufa a 105 °C durante 24 horas. Finalmente, las muestras fueron trituradas con un molino de mano, hasta obtener un diámetro menor a 0,150 mm.

La figura 1 muestra el diagrama del proceso desde las operaciones de acondicionamiento hasta la obtención de los carbones activados.

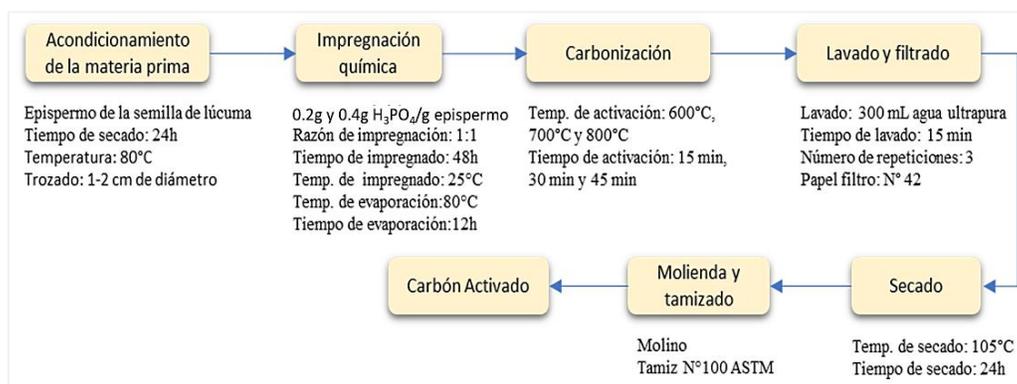


Figura 1. Diagrama del proceso

A continuación, en la tabla 1 muestra la codificación de los 18 tratamientos

Tabla 1. Codificación de los carbones activados según las condiciones de obtención

Razón de impregnación H_3PO_4 /g	Temperatura de carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (min)	CÓDIGO
0.2	600°C	15	CA 0.2_600°C15'
		30	CA 0.2_600°C30'
		45	CA 0.2_600°C45'
0.4	600°C	15	CA 0.4_600°C15'
		30	CA 0.4_600°C30'
		45	CA 0.4_600°C45'
0.2	700°C	15	CA 0.2_700°C15'
		30	CA 0.2_700°C30'
		45	CA 0.2_700°C45'
0.4	700°C	15	CA 0.4_700°C15'
		30	CA 0.4_700°C30'
		45	CA 0.4_700°C45'
0.2	800°C	15	CA 0.2_800°C15'
		30	CA 0.2_800°C30'
		45	CA 0.2_800°C45'
0.4	800°C	15	CA 0.4_800°C15'
		30	CA 0.4_800°C30'
		45	CA 0.4_800°C45'

Evaluación de los carbones activados

El análisis de la cinética química de adsorción requirió la preparación de una curva de calibración a partir de diluciones de AM a las siguientes concentraciones 0,5;1;3;5;8;10;15 y 20 ppm. Posteriormente, se alistaron 11 matraces por cada tratamiento, se agregó 0,2 g de CA y se adicionó de 50 ml de solución de AM de 200 ppm para cada uno. La cantidad inicial de AM por matraz fue de 50 mg. Posteriormente, fueron colocados en el agitador orbital (Lab Companion, SK-600) a una velocidad de 150 rpm y fueron retirados gradualmente a diferentes intervalos de tiempo hasta observar que la concentración remanente de AM fue constante. La concentración de AM se determinó con el espectrofotómetro (ThermoScientific, 9a5x163017) a una longitud de onda de 664 nm. Finalmente, los valores obtenidos de concentración y tiempo fueron comparados con los modelos cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden de Lagergren.

Respecto a la obtención de las isothermas de adsorción AM-CA, se preparó 10 disoluciones de AM a diferentes concentraciones iniciales en el rango de 20 a 200 ppm. Luego se colocó 0,2 g de CA y 50 ml de las respectivas disoluciones en matraces. Luego, se colocaron en el agitador orbital a 150 rpm por el tiempo en el que se alcanzó el equilibrio en la etapa anterior. Posteriormente, se determinó las concentraciones en el equilibrio de AM en la fase acuosa de las soluciones (C_e), filtrando y midiendo las soluciones en el espectrofotómetro a la misma longitud de onda. Las cantidades adsorbidas (C_{ads}) para cada uno de los tratamientos fueron calculadas mediante la siguiente fórmula:

$$C_{ads} = (C_0 - C_e) \times 0.05L$$

Los valores obtenidos se graficaron usando la cantidad adsorbida por gramo de CA: “Y” (C_{ads}/gCA) contra la concentración en el equilibrio: “Ce”. Se analizó el tipo de isoterma que se adecuó mejor al sistema AM-CA de epispermo de lúcuma, verificando el grado de asociación con las isothermas de Langmuir, Freundlich y Frumking-Fowler-Guggenheim (FFG), y Temkin por medio del coeficiente de correlación lineal.

El análisis del área superficial de adsorción se realizó mediante el equipo Gemini VII modelo 2390, donde se realizó la adsorción de nitrógeno gaseoso (N_2) sobre el

carbón activado a 77K. El área superficial fue calculada mediante la ecuación Brunauer Emmet Teller (BET).

Se usó la espectroscopía infrarroja de Fourier (FT-IR) para determinar los grupos funcionales en la superficie del carbón activado con la mejor capacidad de adsorción; el barrido espectral fue programado en el rango de 400-4000 cm^{-1} en el espectrofotómetro infrarrojo Thermo Scientific modelo FTIR 1510. Asimismo, la morfología del carbón activado con la mejor capacidad de adsorción fue visualizada por el microscopio de barrido electrónico (SEM) usando Jeol, JSM5610. Así se corroboró el tamaño de poros alcanzado en la activación química.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis proximal

El Análisis proximal muestra que el epispermo de la semilla de lúcuma tiene un porcentaje de humedad bastante bajo en comparación con otras materias precursoras 5.54 % \pm 0.06 (cáscara de coco 7.9 %, semilla de aguaje 8.4 %, hueso de aceituna 12.9 %)11,12. A mayor porcentaje de humedad mayor tiempo de carbonización de la materia prima y por lo tanto mayor consumo energético (Paredes-Doig et al., 2014; Sánchez, 2018; Vaccari, 2015). El porcentaje de material volátil presenta un valor de 70,96 % \pm 0.15, el cual está por debajo de los otros materiales precursores como la cáscara de coco 72.5 %, semilla de aguaje 81.1 %, hueso de aceituna 80.9 % (Marsh y Rodríguez, 2006; Obregón, 2012). A mayor cantidad de material volátil menor será la capacidad de adsorción debido a estos se alojan en los poros del carbón vegetal como material alquitranado (Paredes-Doig et al., 2014; Sánchez, 2018; Vaccari, 2015). No obstante, los agentes activantes como el H_3PO_4 oxidan y eliminan el material alquitranado permitiendo el desarrollo de la porosidad durante la activación (Marsh y Rodríguez, 2006). Por otro lado, el epispermo de lúcuma presenta un valor muy bajo de cenizas (0.16 % \pm 0.04), siendo beneficioso debido a que las cenizas no aportan a la capacidad adsorptiva e incluso podría interferir en el proceso (Paredes-Doig et al., 2014). El porcentaje de carbono fijo del epispermo de lúcuma es de 23,34 % \pm 0,02 superando a otras materias precursoras tal como la cáscara de coco 18.5%, la semilla de aguaje 7.5 % y el hueso de aceituna 5.4 % (Marsh y Rodríguez, 2006; Obregón, 2012). Este parámetro es importante, debido

a que representa el contenido de materia orgánica que se convertirá en la estructura del carbón activado.

En síntesis, el análisis proximal muestra que el epispermo de la semilla de lúcumo es un material precursor con alto potencial de obtener carbón activado de buena calidad y alto rendimiento debido a un elevado porcentaje de carbono fijo y materia volátil, y baja cantidad de humedad y cenizas.

Análisis de cinética química de adsorción

La tabla 2 y 3 muestran los resultados de las máximas cantidades adsorbidas para obtenidas para los CA a dos razones de impregnación de H_3PO_4 (0.2 g y 0.4 g/g epispermo).

Tabla 2. porcentaje máximo adsorbido de AM en función del tiempo para CA H_3PO_4 0.2 g/g epispermo.

Temperatura	600 °C			700 °C			800 °C		
Tiempo	15'			30'			45'		
%máx Ads	91.11	91.14	90.80	90.82	91.03	90.59	90.84	90.89	90.82

Tabla 3. Cantidad y porcentaje máximo adsorbido de AM en función del tiempo para CA 0.4g H_3PO_4 /g epispermo.

Temp.	600 °C			700 °C			800 °C		
Tiempo	15'			30'			45'		
%máx Ads	94.46	94.50	91.33	91.83	92.39	90.98	90.78	91.31	90.02

Los resultados muestran que no existen diferencias notorias en la cantidad adsorbida de AM en función del tiempo de carbonización para los CA con misma razón de impregnación de H_3PO_4 y temperatura. En todos los tratamientos el porcentaje máximo adsorbido de AM supera el 90 %. No obstante, las mayores cantidades adsorbidas por ligeras diferencias se encuentran a la temperatura de 600 °C y aumentan más cuanto mayor es la razón de impregnación de H_3PO_4 .

La figura 2 muestra que la cinética química de adsorción para los CA 0.2_600 °C toma aproximadamente 100 minutos en alcanzar el equilibrio; mientras que la figura 3 muestra los CA 0.4_600 °C necesita aproximadamente 20 minutos. Por lo tanto, el tiempo de equilibrio es menor cuando aumenta la razón de impregnación de H_3PO_4 . Este patrón se repite de forma similar para las demás temperaturas.

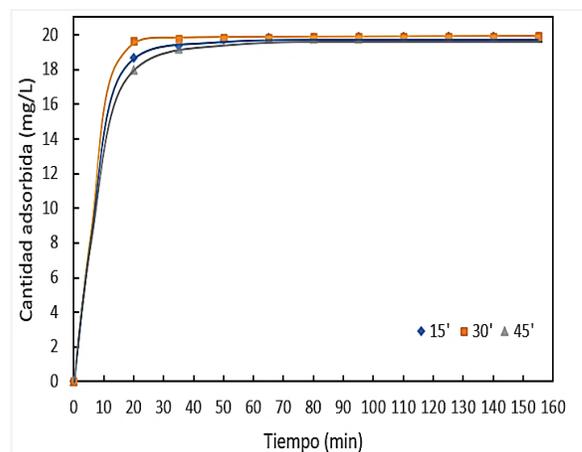


Figura 2. Cinética de adsorción del tratamiento CA0.2_600 °C

En la tabla 4 se presenta el resumen de los parámetros de la cinética de adsorción de los 18 tratamientos, producto del modelamiento de los datos con las ecuaciones de pseudo primer de Lagergren y pseudo segundo orden de Ho.

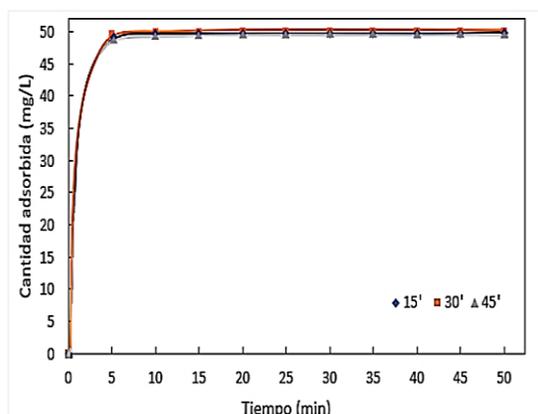


Figura 3. Cinética de adsorción del tratamiento CA 0.4_600°C

Todos los tratamientos presentan una mayor correlatividad con el modelo de la cinética de pseudo segundo orden de Ho que el modelo de pseudo primer orden. Asimismo, la correlación con este modelo indica que predominan los procesos de quimiadsorción sobre los procesos de fisisorción, los cuales son propios de una del pseudo cinética de primer orden (Vera, 2014).

Tabla 4. Modelamiento de la cinética para los CA_0.2

1er orden	0.2_600 °C			0.2_700 °C			0.2_800 °C		
Parámetros	15'	30'	45'	15'	30'	45'	15'	30'	45'
k (min ⁻¹)	0.0518	0.0504	0.0428	0.0494	0.0392	0.0566	0.0604	0.0326	0.0389
q _e (mg.g ⁻¹)	4.773	9.838	8.619	14.946	24.429	16.038	25.605	19.48	17.844
r ²	0.8515	0.8926	0.8214	0.9142	0.6885	0.9309	0.9338	0.9043	0.9458
2do orden	0.2_600 °C			0.2_700 °C			0.2_800 °C		
Parámetros	15'	30'	45'	15'	30'	45'	15'	30'	45'
k (g.mg ⁻¹ min ⁻¹)	0.0654	0.0123	0.0127	0.0173	0.011	0.0189	0.0087	0.0069	0.0072
q _e (mg.g ⁻¹)	45.454	46.296	46.083	45.662	45.248	45.662	46.296	45.871	46.296
r ²	0.9839	0.9562	0.9400	0.9397	0.7765	0.9638	0.9524	0.9483	0.9828

Tabla 5. Modelamiento de la cinética para los CA_0.4

1er orden	0.4_600 °C			0.4_700 °C			0.4_800 °C		
Parámetros	15'	30'	45'	15'	30'	45'	15'	30'	45'
k (min ⁻¹)	0.1501	0.118	0.1361	0.1114	0.0892	0.1281	0.1284	0.1242	0.1273
q _e (mg.g ⁻¹)	1.857	1.321	1.645	1.4032	2.2992	4.6278	3.2913	7.6224	8.2597
r ²	0.7348	0.597	0.6379	0.4355	0.5197	0.7787	0.7521	0.7848	0.7977
2do orden	0.4_600 °C			0.4_700 °C			0.4_800 °C		
Parámetros	15'	30'	45'	15'	30'	45'	15'	30'	45'
k (g.mg ⁻¹ min ⁻¹)	0.899	0.557	0.320	0.679	0.246	0.100	0.269	0.039	0.028
q _e (mg.g ⁻¹)	47.169	47.393	45.66	45.871	46.296	45.662	45.454	46.296	46.083
r ²	0.9266	0.9507	0.9159	0.8857	0.9648	0.9113	0.9566	0.9792	0.9486

Análisis de las isotermas de adsorción carbón activado – azul de metileno

Los resultados de la cinética química determinaron que los tratamientos a temperatura de 600°C y 30 minutos de carbonización presentaron el mayor porcentaje de adsorción para ambas razones de impregnación. Por lo tanto, se graficó las isotermas ploteando los valores de las variables Y versus C_e en el equilibrio.

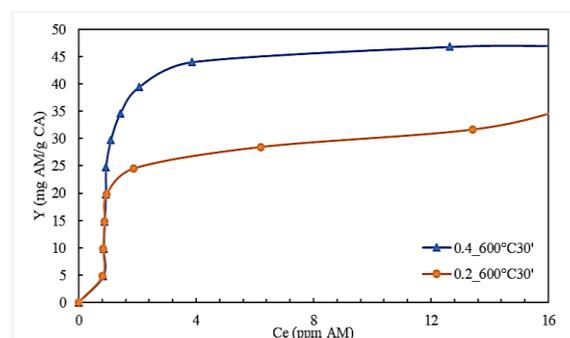


Figura 4. Isotermas de adsorción para CA 0.2_600°C30' y 0.4_600°C30'

La figura 4 muestra las isotermas de adsorción para los CA 0.2_600°C30' y CA 0.4_600°C30' donde la cantidad adsorbida para la razón de impregnación de H_3PO_4 0.4 g es superior para todas las concentraciones de equilibrio que la razón de 0.2g. Asimismo, se deduce que el proceso de adsorción AM-CA obtenido a partir del epispermo de la semilla de lúcumo presenta una similitud a la isoterma tipo S debido a su forma cóncava en relación con el eje vertical. Este tipo de isoterma supone al inicio una rápida adsorción en relación con la concentración de la solución en equilibrio, marcado por aumenta en la pendiente la cual gradualmente disminuye a cero a medida que se llenan los sitios de adsorción (Figuroa et al., 2015;

Inglezakis et al., 2018; Piccin et al., 2011). Este comportamiento podría deberse a las interacciones laterales entre las moléculas de AM en la superficie, fenómeno que se conoce como adsorción cooperativa (Sparks, 2003).

La tabla 6 muestra los calculados de los parámetros que se utilizaron para el modelamiento y correlación lineal del sistema AM-CA con los modelos matemáticos de las isotermas de Langmuir, Freundlich, Temkin y Frumking-Fowler-Guggenheim respecto al CA 0.4_600°C30', quien presento la mayor capacidad de adsorción de los 18 tratamientos.

Tabla 6. Parámetros de análisis de modelamiento de isoterma del tratamiento CA 0.4_600°C30'

Co (ppm AM)	Ce (ppm AM)	Cads (ppm AM)	Y (mg AM/g CA)	1/Ce	1/Y	Log Ce	Log Y	qe (mg)	Ln Ce	Θ	Ln[Ce(1-Θ)/Θ]
0	0	0	0.00	---	---	---	---	0	---	0.000	---
20	0.834	19.166	4.79	1.199	0.209	-0.0788	0.680	0.96	-0.182	0.102	1.990
40	0.842	39.158	9.79	1.188	0.102	-0.0747	0.991	1.96	-0.172	0.209	1.159
60	0.873	59.127	14.78	1.145	0.068	-0.0590	1.170	2.96	-0.136	0.316	0.638
80	0.918	79.082	19.77	1.089	0.051	-0.0372	1.296	3.95	-0.086	0.422	0.229
100	0.922	99.078	24.77	1.085	0.040	-0.0353	1.394	4.95	-0.081	0.529	-0.197
120	1.088	118.912	29.73	0.919	0.034	0.0366	1.473	5.95	0.084	0.635	-0.468
140	1.411	138.589	34.65	0.709	0.029	0.1495	1.540	6.93	0.344	0.740	-0.700
160	2.053	157.947	39.49	0.487	0.025	0.3124	1.596	7.90	0.719	0.843	-0.961
180	3.847	176.153	44.04	0.260	0.023	0.5851	1.644	8.81	1.347	0.940	-1.407
200	12.634	187.366	46.84	0.079	0.021	1.1015	1.671	9.37	2.536	1.000	---

La tabla 7 muestra las constantes propias de cada modelo, constantes velocidad y coeficientes de relación lineal (r^2).

Tabla 7. Parámetros y correlación con diferentes modelos de isotermas para CA0.4_600°C30'

Modelo	Parámetro	CA 0.4_600°C30'
Freundlich	1/n	0.5505
	K_F ($mg^{1-1/n} \cdot L^{1/n} \cdot g^{-1}$)	17.414
	r^2	0.4415
Langmuir	qm ($mg \cdot g^{-1}$)	113.63
	K_L ($L \cdot mg^{-1}$)	0.1042
	r^2	0.3595
Temkin	b ($kJ \cdot mol^{-1}$)	400.15
	K_T ($L \cdot g^{-1}$)	1.969
	r^2	0.6734
FFG	w ($kJ \cdot mol^{-1}$)	2.449
	K_{FFG} ($L \cdot mg^{-1}$)	40.30
	r^2	0.9821

Además, la tabla 7 revela que el modelo que más se adecua al sistema de estudio es la isoterma FFG con

factor de correlación lineal r^2 de 0.9821, tal como se aprecia en la figura 5 al plotear el logaritmo natural de la concentración en el equilibrio (C_e) multiplicado por la fracción de espacios no cubiertos ($\frac{1-\theta}{\theta}$) contra la fracción de espacios cubiertos (θ). Este modelo a diferencia de la isoterma de Langmuir describe el proceso de adsorción para una isoterma sigmoideal tomando en consideración la interacción lateral de las moléculas adsorbidas (García, 2017).

La forma lineal de la isoterma FFG sigue la siguiente ecuación:

$$\ln \left[\frac{C_e(1-\theta)}{\theta} \right] = -\ln K_{FFG} + \frac{2w\theta}{RT}$$

Donde K_{FFG} es la constante de equilibrio de FFG, θ es la fracción de cobertura, R es la constante universal de los gases ($kJ \cdot mol^{-1} K^{-1}$), T es la temperatura (K), y

w es la energía de interacción entre las moléculas adsorbidas ($kJ \cdot mol^{-1}$).

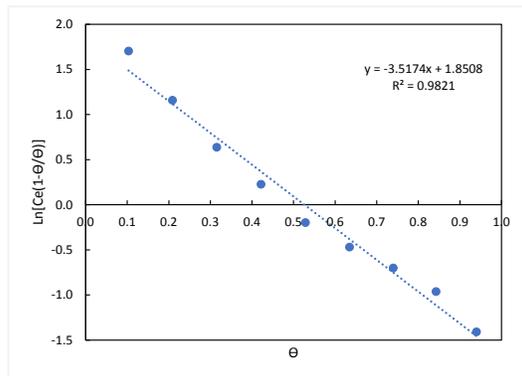


Figura 5. Modelamiento FFG para CA 0.4_600°C30'

De la ecuación presentada en figura 5 podemos determinar la constante de equilibrio de adsorción como la energía de interacción:

$$y = -3.6976x + 1.977$$

$$-\ln K_{FFG} = -3.6976x$$

$$K_{FFG} = 40.3$$

Debido a que la constante de equilibrio es mayor a 1, el sistema favorece el proceso de adsorción. Por otro lado, para calcular la energía de interacción “ w ” se tomó 02 supuestos: a) cuando la fracción de cobertura una baja $\theta = 0.2$ y b) cuando la fracción de cobertura es alta $\theta = 0.9$. Reemplazando los valores θ , R y T (298.15K) en el último término de la ecuación lineal de FFG y se despejó w :

$$\frac{2w\theta}{RT} = 1.977$$

$$w = \frac{1.977 \times 8.314 \text{ kJ/mol} \cdot K \times 298.15 \text{ K}}{2\theta}$$

$$w_1 = 12.25 \text{ kJ/mol (para } \theta = 0.2)$$

$$w_2 = 2.72 \text{ kJ/mol (para } \theta = 0.9)$$

Para ambos supuestos los valores de la energía de interacción entre las moléculas adsorbidas son positivos; por lo tanto, la interacción entre las moléculas adsorbidas es atractiva (Ayawei et al., 2017). Este hecho se basa en que el calor de adsorción (ΔH_{ads}) varía linealmente con la carga. Es decir, al haber más interacciones atractivas, entonces el calor de adsorción aumentará con la carga. Sin embargo, si la interacción entre las moléculas adsorbidas es

repulsiva, entonces el calor de adsorción disminuye con la carga y la energía de interacción es negativa (García, 2017; Ayawei et al., 2017; Lárez et al., 2011; Shikuku, 2021).

De esta manera se demuestra que existe una adsorción bidimensional debido a que hay una interacción lateral entre las moléculas de AM que se unen a otras moléculas previamente adsorbidas, aparte de adsorción vertical de las moléculas con la superficie del CA.

Análisis del área superficial

Se graficó la isoterma BET para el CA 0.4_600°C30' mediante los datos de presión relativa y cantidad de N_2 adsorbido como se muestra en la figura 6.

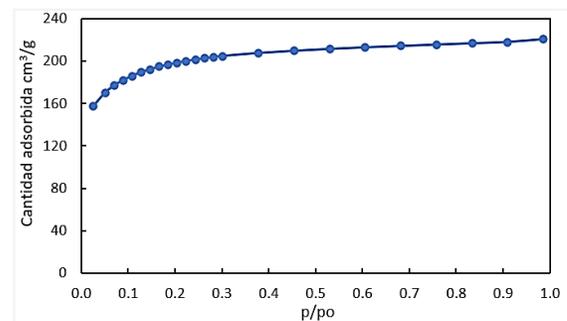


Figura 6. Isooterma BET

Mientras que en la figura 7 se graficó la forma lineal de la isoterma BET ($y = mx + b$), cuya ecuación:

$$\frac{1}{v \left(\frac{p}{p^\circ} - 1 \right)} = \frac{c - 1}{v_m c} \left(\frac{p}{p^\circ} \right) + \frac{1}{v_m c}$$

Donde v es la cantidad de gas adsorbido ($cm^3 \cdot g^{-1}$), p/p° es la presión relativa, v_m es la cantidad de gas adsorbido en la monocapa ($cm^3 \cdot g^{-1}$) y es la constante c BET.

El área superficial de adsorción del CA 0.4_600°C30' fue calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$A_{BET} = \frac{v_m (cm^3/g)}{22414 (cm^3/mol)} \times \frac{N_A}{mol} \times A_{N_2} (m^2)$$

Donde N_A es el número de Avogadro (6.0229×10^{23}), A_{N_2} es el área transversal de la molécula de nitrógeno ($16.2 \times 10^{-20} m^2$) y $22414 \text{ cm}^3/mol$ es el volumen molar de un gas a condiciones normales.

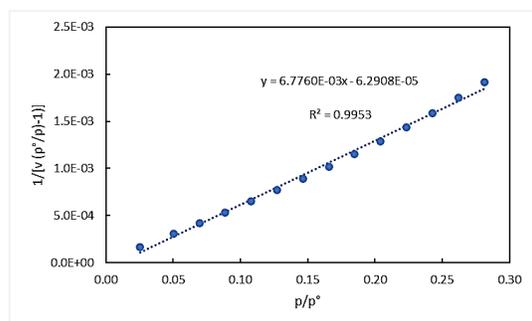


Figura 7. Isoterma de adsorción de N₂ para el tratamiento CA 0.4_600°C30'

El valor de v_m se obtuvo a partir de la pendiente e intercepto de la ecuación lineal presentada en la figura 7:

$$m = \frac{c - 1}{v_m \cdot c} \quad y \quad b = \frac{1}{v_m \cdot c}$$

$$v_m = 1/(m + b)$$

$$v_m = 1/(6.7760 \times 10^{-3} - 6.2908 \times 10^{-5})$$

$$v_m = 148.963 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$A_{BET} = \frac{148.963 \text{ cm}^3/\text{mol}}{22414 \text{ cm}^3/\text{mol}} \times \frac{6.0229 \times 10^{23}}{\text{mol}} \times 16.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

$$A_{BET} = 648.46 \text{ m}^2$$

La tabla 8 muestra las características texturales del CA 0.4_600°C30'; el área microporosa representa el

60.7% del área total superficial, mientras que el área mesoporosa equivale al 39.3%. Por lo tanto, existe una predominancia de microporosidad. Asimismo, se muestra el volumen de los microporos por gramo de CA y el tamaño promedio del diámetro de poros.

Tabla 8. Características texturales del carbón activado CA 0.4_600°C30'

Área superficial BET (m ² .g ⁻¹)	Área microporos (m ² .g ⁻¹)	Área mesoporos (m ² .g ⁻¹)	Volumen microporos (cm ³ .g ⁻¹)	Diámetro promedio o poro (Å)
648.46	394.04	254.42	0.34	23.3

Análisis de espectroscopía infrarroja

En la figura 8 se evidencia la presencia de alcoholes y fenoles en la señal 3623 cm⁻¹ por las vibraciones de estiramiento del grupo -OH. A mayores longitudes de onda se ubica la señal de 2878 cm⁻¹ asociado al ácido carboxílico con una vibración de estiramiento amplia del enlace OH. Asimismo, se atribuye al grupo alquino a la señal de 2161 cm⁻¹ por su vibración de estiramiento C≡C, y el pico a 1979 cm⁻¹ corresponde al estiramiento asimétrico del grupo alqueno C=C. También se identificó el grupo amida debido a la vibración de estiramiento en la señal de 1696 cm⁻¹ del enlace C=O, el cual coincide con la banda de 1557 y 1538 cm⁻¹. En resumen, se identificó los siguientes seis grupos funcionales en la superficie del activado: alcoholes y fenoles, ácidos carboxílicos, alquinos, alquenos y amidas.

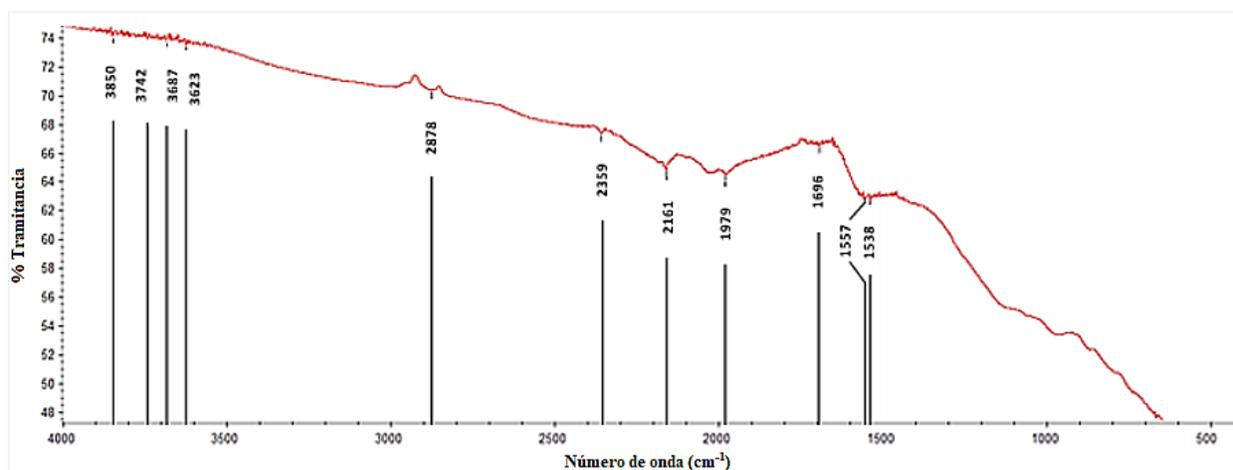


Figura 8. Análisis FTIR para el tratamiento CA 0.4_600°C30'

- industrial application. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. DOI: 10.18687/LACCEI2020.1.1.587
- Ayawei, N., Ebelegi A., & Wankasi D. (2017). Modelling an Interpretation of Adsorption Isotherms. *Hindawi Journal of Chemistry*. 2(33): 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>
 - Borbor, M. (2017) Variación morfológica y molecular de la lúcuma y su contribución al manejo sustentable de los huertos de Yaután y Laredo. Tesis para optar al grado de doctoris philosophiae en agricultura sustentable, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. 203pp. Accesado 07/03/2019. <http://hdl.handle.net/20.500.12390/1907>
 - Cury, K., Aguas, Y., Martinez, A., Olivero, R., & Chams L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 9 (1): 122-132. DOI: 10.24188/recia.v9.nS.2017.530
 - Figueroa, D. A., Moreno, A., & Hormaza A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías* 14 (27):105-120. DOI:10.22395/riium.v14n26a7
 - García, N. (2017) Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para implicaciones medioambientales”, tesis para optar el grado de doctor en ciencia tecnología de materiales, Universidad de Oviedo, Oviedo, España. 15-33pp. https://digital.csic.es/bitstream/10261/103330/1/Tesis_Natalia%20Garc%c3%ada%20Asenjo.p
 - Guerrero-Castillo P., Reyes S., Acha O., Sepulveda B., & Areche C. (2021). Agro-industrial waste seeds from Peruvian Pouteria lucuma as new source of phytosterols LWT- *Food Science and Technology*, 144, art. no. 111259. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111259
 - Marsh, R & Rodriguez, F. (2006). Activated carbon: Vol. 1st ed. Elsevier Science.
 - Inglezakis, V. J., Pouloupoulos, S. G., & Kazemian, H. (2018). Insights into the S-shaped sorption isotherms and their dimensionless forms. *Microporous and Mesoporous Materials*, 272 (1):166-176. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.06.026>
 - Jimenez-Lopez, C., Fraga-Corral, M., Carpena, M., García-Oliveira, P., Echave, J., Pereira, A.G., Lourenço-Lopes, C., Prieto M. A., & Simal-Gandara J. (2020). Agriculture waste valorization as a source of antioxidant phenolic compounds within a circular and sustainable bioeconomy. *Food & Function*. DOI: 10.1039/D0FO00937G.
 - Lárez, C., Quiñones, V., Suárez, D., & Santos, I. (2011). Preparación de un adsorbente basado en la actodermis de los cladodios de tuna (*Opuntia ficus*) para la remoción del colorante Safranina. *Química Viva*. 10(3): 221-232. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86322531008.pdf>
 - Li, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Xu, F., Zhu, K., Huang, C. (2021). A novel underutilized starch resource *Lucuma nervosa* A.DC seed and fruit. *Food Hydrocolloids*, 120, art. no. 106934. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.106934
 - Masullo, M., Cerulli, A., Pizza, C., & Piacente, S. (2021). Pouteria lucuma pulp and skin: In depth chemical profile and evaluation of antioxidant activity *Molecules*, 26 (17), art. no. 5236, DOI: 10.3390/molecules26175236
 - Obregón, D. (2012) Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna. Tesis para optar el título de licenciado en química, Universidad Pontificia La Católica, Lima, Perú. 30-81pp. Accesado 20/02/2019. <http://repositorio/handle/20.500.12404/5717>
 - Paredes-Doig, A.L., Sun-Kou, M.R., Picasso-Escobar, G., & Lazo-Cannata, J.C. (2014). A study of the adsorption of aromatic compounds using activated carbons prepared from chestnut shell. *Adsorpt. Sci. Technol.* 32 (2): 165-180. DOI: <http://dx.doi.org/10.1260/0263-6174.32.2-3.165>.
 - Piccin, J., Dotto, G., & Pinto, L. (2011). Adsorption isotherms and thermochemical data of FDandC RED N° 40 Binding by chitosan. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 28 (1): 295-304. DOI:10.1590/S0104-66322011000200014
 - Poljsak, N., Kreft, S., & Kocevar, N. (2020). Vegetable butters and oils in skin wound healing: Scientific evidence for new opportunities in dermatology *Phytotherapy Research*, 34 (2) 254-269. DOI: 10.1002/ptr.6524

- Rojo, L.E., Villano, C.M., Joseph, G., Schmidt, B., Shulaev, V., Shuman, J.L., Lila, M.A., & Raskin, I. (2010). Wound-healing properties of nut oil from *Pouteria lucuma* Journal of Cosmetic Dermatology, 9(3): 185-195. DOI: 10.1111/j.1473-2165.2010.00509.x
- Sánchez, C. (2018) Caracterización de carbón activado a partir del bambú *guadua angustifolia kunth* utilizando el método químico. Tesis para optar al título de ingeniero forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 17-32pp. Accesado.21/02/2019. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3340>
- Shikuku, V. & Mishra, T. (2021) Adsorption isotherm modeling for methylene blue removal onto magnetic kaolinite clay: a comparison of two-parameter isotherms. Applied Water Science. 11(103):1-9. DOI:10.1007/s13201-021-01440-2
- Vaccari, B. (2015) Influencia de los parámetros temperatura, tiempo y granulometría en las características de carbón activado obtenido en semillas de *Tagua* *Phytelephas macrocarpa*. Tesis para optar al título de ingeniero forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 92pp. Accesado 10/03/2019.
- Vera, A. (2014) Obtención y evaluación de carbón activado por método físico a partir de Residuos Carbonizados de Bambú (*Guadua angustifolia Kunth*) procedentes del distrito La Florida, Cajamarca. Tesis para optar al grado de ingeniero forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 73pp. Accesado 05/03/2019.