

Estudio de pre-factibilidad del proceso productivo de carbón activado, aceite y agua de coco a partir del fruto del cocotero.

María Del Mar Londoño Gómez^a,

Diego Andrés Acosta Maya^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Resumen

Se estudió la factibilidad del proceso de producción del carbón activado, aceite, y agua de coco a partir del fruto del cocotero. Normalmente solo se utiliza el 20% del coco y el resto es desperdiciado [1]. Por ello se vislumbraron oportunidades para aprovechar los subproductos (i.e. cáscara, pulpa, y agua) generados en la explotación del coco a escala del laboratorio. Se reportaron las propiedades fisicoquímicas en fichas técnicas de los productos obtenidos. Se escaló el proceso con un diseño conceptual, la capacidad del proceso se sustentó en un estudio de mercado para cada uno de los productos y según la disponibilidad de materia prima de la zona. Se costearon los equipos de acuerdo con los balances de materia del proceso y se cotizaron con proveedores nacionales e internacionales. Se programó la producción en diagramas de Gantt. Se obtuvo un VPN de 862 M COP para la planta de alimentos (proceso de separación, aceite de coco virgen y agua de coco) y un VPN de -3149 M COP para la planta de carbón activado. Por lo tanto, se recomienda realizar la planta de alimentos y no la del carbón activado.

1. Introducción

En el año 2012 existían aproximadamente 15,000 hectáreas cultivadas de coco en Colombia, producidas por más de 10,000 familias de pequeños agricultores, que en promedio cultivan entre 1.5 y 2 hectáreas. Del coco apenas se aprovecha la pulpa que es el 20% en peso del fruto. La estopa, la cáscara y el agua se desperdician, y son descargadas en ríos, basureros y alcantarillas generando problemas ambientales [1]. Por esta razón, en este proyecto se evaluó el potencial de aprovechar no solo la pulpa, sino también la cascara y el agua; para producir carbón activado a partir de la cáscara del coco, bebida hidratante a partir del agua de coco y aceite de coco virgen a partir de la pulpa.

El vertimiento de aguas residuales no domésticas a ríos y las emisiones de gases tóxicos a la atmósfera por parte del sector industrial deben cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas. Por ello, las empresas se enfrentan al cumplimiento de leyes ambientales. El carbón activado es un material utilizado ampliamente a nivel industrial debido a su capacidad de adsorción en la separación y purificación tanto de líquidos como de gases [2] por lo que su demanda en el mercado colombiano ha aumentado año tras año. Teniendo en cuenta el diámetro de poros deseado, y la aplicación del carbón activado, se encontró en literatura que aproximadamente el 80% de los carbones activados van dirigidos a aplicaciones en fase líquida. El carbón activado para dichas aplicaciones es producido fácilmente por activación química (e.g. con ácido fosfórico o

cloruro de zinc a temperaturas del orden de 450°C) para mesoporos mayores que 2 nm. Para aplicaciones en gases, lo ideal son activaciones físicas con CO₂ o vapor de agua a altas temperaturas 800°C obteniendo microporos menores a 0.7 nm [3].

Por otra parte, el agua de coco es una bebida refrescante con bajo contenido calórico y es considerada como un isotónico natural debido a que tiene minerales como potasio y sodio; la bebida es estéril y estable cuando está dentro de la fruta, sin embargo después de extraerse y exponerse al aire se comienza a oxidar, principalmente por enzimas naturales y por contaminantes microbiológicos [4]. En la actualidad, se realiza por medio de la pasteurización, un proceso de preservación a altas temperaturas y corto tiempo, generalmente se lleva a cabo entre 60 y 100 °C, sin embargo, tiene el inconveniente de que elimina no solo las bacterias, sino casi todo su sabor [5]. Por esto, se han investigado diferentes técnicas de conservación como filtración, aumento del contenido de azúcares y sólidos totales, ajuste del pH, tratamiento ultrasónico, etc. Recientemente, la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO) obtuvo una patente en el desarrollo de un proceso de filtración de múltiples etapas. Según la FAO, un grupo de panelistas opinó que el agua procesada era tan buena como el agua dulce en cuanto a características organolépticas [6].

Por último, el aceite de coco virgen (VCO, por sus siglas en inglés) es la forma más pura del aceite de coco. Fue introducido al mercado mundial al final del siglo 20, es uno de los productos de mayor valor derivado del coco fresco; es un aceite multifuncional, utilizado como suplemento alimenticio, para cocinar, como ingrediente principal en industria cosmética para productos para el cuidado de la piel como cremas hidratantes o aceites aromaterapia y para el cuidado del cabello como acondicionador. Además, puede utilizarse en aplicaciones en las que el aceite refinado, blanqueado y desodorizado derivado de copra (RBD) se utiliza tradicionalmente [7]. Los métodos para producir VCO se dividen principalmente en métodos húmedos y secos. En el método seco, se calienta la pulpa para eliminar la humedad, evitando la invasión microbiana, y posteriormente se prensa para obtener el aceite, mientras que en el método húmedo se produce leche de coco y luego se puede obtener el VCO con refrigeración y descongelación, fermentación, centrifugación y método de pH o cualquiera de estos en combinación [8].

2. Materiales y métodos

2.1 Métodos

Se utilizaron cocos de variedad “Alto Caribe” provenientes de San Bernardo del Viento, Córdoba. Los cocos se lavaron con agua municipal para eliminar el polvo y luego se desinfectaron en una solución de hipoclorito de sodio 300mg/L [9]. Para extraer el agua del coco, se presionaron los ojos que se encuentran en la parte superior del coco con ayuda de un destornillador, y al agua extraída se filtró con un filtro Whatman No. 4 con tamaño de poro de 20 a 25 µm, para eliminar las partículas suspendidas más grandes del agua de coco, está se almacenó en termos de acero inoxidable y se refrigeró a 4°C. Con ayuda de un martillo se quebraron los cocos y luego se calentaron para separar la pulpa de la cáscara. Se lavó la pulpa y se almacenó en el congelador; la cáscara se guardó en bolsas a condiciones ambientales.

2.1.1 Agua de coco embotellada

Se microfiltró el agua de coco según [9], con la modificación de una etapa más de filtración, ya que, crecieron más microorganismos en la prueba de carga microbiana. El agua de coco almacenada se mezcló con 0.02g/100mL de ácido cítrico, 0.01g/100mL de ácido ascórbico, y 0.009g/100mL de L-cisteína, de acuerdo con [2]. Seguido por 3 etapas de microfiltración, primero con un filtro de membrana de 0.8 µm, luego de 0.45 µm, y por último de 0.2 µm marca Sartorius en una cabina de flujo laminar marca C-4. Se almacenó en botellas de vidrio de 35 mL, tanto agua de coco microfiltrada (MF) como no microfiltrada (NMF) a 4°C.

Se tomaron 4 botellas al azar de MF y NMF en los días 0, 7, 22 y 46; para realizar el análisis microbiológico y las pruebas fisicoquímicas; y se compararon los resultados con una muestra de agua de coco comercial (BioKoko). El recuento microbiano se determinó con agar nutritivo para el conteo total de células viables, y se

utilizó agar Endo para diferenciación de la familia *Enterobacteriaceae* y otros bacilos Gram negativos [10], las placas se incubaron a 35°C por 48h en incubadora Thermo Scientific. Las propiedades que se midieron fueron: pH, grados brix con un refractómetro Abbe, y acidez total titulable con hidróxido de sodio, calculado respecto al ácido cítrico según [9]. Los azúcares simples se hallaron con el método de ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) según [11], los carbohidratos totales por el método de Dubois según [12], y las proteínas por el método de Lowry modificado según [13].

2.1.2 Aceite de coco virgen

La extracción del VCO se realizó por dos metodologías, la primera es prensado en frío debido a que es el método natural con mayor eficiencia; y la segunda es el método modificado de fermentación natural, el cual tiene el menor requerimiento de mano de obra y el menor consumo de energía [14].

2.1.2.1 Prensado en frío

La pulpa se trituró con un rallador hasta obtener un tamaño de partícula aproximadamente de 3 mm, y se secó en un horno Heraeus a 65°C por 12 horas hasta tener un contenido de humedad entre 3 al 4%. La pulpa se alimentó en la prensa hidráulica marca Erie Press Systems y se extrajo el aceite a una presión desde 1,600 hasta 2,500 Psi. Se almacenaron en frascos de vidrios etiquetados como P1, P2, P3 respectivamente. Se dejaron reposar por 7 días, y se filtraron con una bomba de vacío y un filtro Whatman No. 4 [14].

2.1.2.2 Fermentación

En una licuadora se adicionó agua caliente y pulpa para triturarla, la mezcla obtenida se colocó encima de una tela porosa, la cual se exprimió haciendo presión con las manos, la leche de coco obtenida se asentó por 24 horas a 35°C; la capa del medio, es decir, el aceite fue separado de las otras capas, se filtró con una bomba de vacío y un filtro Whatman #4, por último se almacenó en un frasco de vidrio [14].

Se realizaron pruebas tanto a la muestra obtenida, como al aceite comercial de la marca A de Coco, estas pruebas se basaron las normas INVIMA: preparación de la muestra NTC5033 [15], determinación de la densidad NTC336 [16], índice de refracción NTC289 [17], índice de saponificación NTC335 [18], índice de materia insaponificable NTC235-2 [19], índice de yodo NTC283 [20], acidez libre NTC218 [21], humedad y sustancias volátiles NTC287 [21]. Por último, se compararon los resultados obtenidos con los datos reportados en la norma NTC637 [22] y con la muestra de coco comercial (A de coco®).

2.1.3 Carbón activado

La cáscara de coco se trituró con un molino de cuchillas marca Pulian, y se tamizó en un Ro-Tap marca Humboldt Mfg. Co. para separar los diferentes tamaños de partícula. Se seleccionó el material con un diámetro de partícula de $2\text{ mm} \geq 1.1\text{ mm}$, entre las mallas 10 y 16 de la serie de Tyler, donde se retiene el 30% del material. Y se secó a 110°C por 48 horas en un horno marca Heraeus, seguido de la carbonización a 500°C por 2 horas en una mufla marca Terrigena; el carbón obtenido se mezcló con cantidades variables de NaOH en forma de pellets y 10 mL de agua, en las proporciones de 1:1, 2:1 y 3:1 (g NaOH/g Carbón) etiquetadas como CA-1, CA-2, CA-3, esto se mezcló en beakers con agitación magnética durante 2 horas, terminado este tiempo se secaron las muestras a 130°C por 4 horas, seguido de la activación a 700°C por 1.5 horas en la mufla. Se dejó enfriar y se lavaron las muestras con HCl 10% seguido de un lavado con agua destilada a 45°C. Por último, se secaron las 3 muestras a 110°C por 24 horas en el horno [23]. Se midió humedad, densidad aparente, distribución del tamaño de partícula, y pH, según [24]. Se realizó caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM) con el equipo Phenom™ G2 Pro, para obtener una representación gráfica de la superficie y porosidad de las muestras, también se realizó espectroscopía infrarroja con el equipo Spectrum Two-PerkinElmer.

Por último, para hallar las isotermas de adsorción de los carbones activados se realizó una adsorción por lotes. Se añadieron 25 mL de cada disolución a diferentes beakers de 50mL y a cada uno se le agregó 0.1 g de carbón activado. Esto se agitó por 24 horas para asegurar el equilibrio a 25°C y a 150 rpm. Para medir la

absorbancia, primero se filtraron las muestras con un papel filtro Advantec #1, y luego con un espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys 10S UV-Vis, se midió la absorbancia para cada muestra a una longitud de onda de 615nm. Se halló la cantidad de azul de metileno (AM) adsorbido en los carbones activados q_e (mg g⁻¹) con la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) V}{W} \quad (1)$$

Donde C_o y C_e (mg L⁻¹) son las concentraciones iniciales y en equilibrio del AM respectivamente. V (L) es el volumen de la solución y W (g) es la masa del adsorbente usado.

Todas las propiedades fisicoquímicas se le midieron a las muestras de carbón activado realizadas en el laboratorio y a la muestra comercial marca Bell Chem Ref. 8X30 etiquetado como CA-C.

2.2 Diseño conceptual

Se realizó un estudio de mercado según las bases de datos de TRADEMAP y BACEX. A su vez, se realizó un estudio de la oferta y se reportaron los precios de los productos existentes en el mercado colombiano. Adicionalmente, se definió la ubicación de la planta estratégicamente.

La capacidad de la planta se definió de acuerdo con la disponibilidad de materia prima en la zona. Se realizaron los balances de materia, los diagramas de bloques, los diagramas de flujo y diagramas de Gantt para cada proceso y se calculó el número de operadores y turnos por semana. Se costearon los equipos de acuerdo con las capacidades requeridas de cada uno, solicitando cotizaciones a proveedores tanto nacionales como internacionales. Por último, se halló el flujo de caja, el valor presente neto. Para más detalles ver Anexo A en el cual se encuentra todo el diseño conceptual y en el Anexo B está el modelo de cálculos.

3. Resultados y análisis

3.1 Laboratorio

3.1.1 Agua de coco.

3.1.1.1 Carga microbiana

El recuento microbiano con agar nutritivo obtuvo un máximo crecimiento de 20 microorganismos/mL para la muestra MF en los 46 días de la prueba; y 26 microorganismos/mL para el agua de coco comercial, lo que representa un crecimiento microbiano muy bajo respecto al límite máximo permitido (5000 cfu/ml) [25]. Por otra parte, se obtuvo desde el primer día para la muestra NMF un crecimiento de microorganismos incontables. En la prueba de agar Endo se obtuvo un crecimiento nulo de coliformes para MF y comercial e incontables para NMF, lo que concuerda con [9].

3.1.1.2 Propiedades fisicoquímicas

La Tabla 1, muestra la media de las propiedades fisicoquímicas del agua de coco después de microfiltrarla y agregarle ácido cítrico, ácido ascórbico y L-cisteína. Según la FAO, el pH del agua de coco debe estar en un rango de 5 a 5.4 [25], la muestra MF obtuvo un pH entre 4.57 a 4.9, y el agua de coco comercial obtuvo un pH de 4.32. La acidez total aumento para MF de 0.01 a 0.09, y para NMF de 0.01 a 0.66, se puede concluir que no fue tan considerable el aumento de la muestra MF comparada con NMF, estos cambios en el pH y en la acidez se pueden deber por el uso de conservantes como ácido cítrico y ácido ascórbico; y el aumento considerable de

la muestra NMF pudo deberse al crecimiento microbiano; por otra parte, la acidez de la muestra comercial fue de 0.07 la cual fue muy cercana a la acidez de la muestra MF.

Por otra parte, en la prueba de DNS, se compararon las muestras MF y NMF, donde se obtuvo que la concentración de azúcares simples aumenta en MF debido al rompimiento de los carbohidratos complejos, y que disminuye en NMF seguramente debido a los microorganismos que utilizan los azúcares para su crecimiento [9]. Los grados brix representan los sólidos solubles totales en la muestra, como se puede observar en la muestra MF los °Brix aumentan debido a la hidrólisis de los carbohidratos más complejos, contrario a lo que sucede en la muestra NMF donde los sólidos solubles totales están disminuyendo debido a que los microorganismos probablemente se están alimentando de estos azúcares; todas las muestras se encuentran dentro de los rangos ideales de los °Brix (5 a 6.5) según la FAO, sin embargo, para la muestra de agua de coco comercial se obtuvo 7,9° brix, lo que sobre pasa los rangos de la norma, esto se debe a que tienen más partículas suspendidas (pulpa). El comportamiento de los grados brix en el tiempo es equivalente al comportamiento de carbohidratos totales. Por último, la concentración de proteína es mayor en la muestra MF por la adición de L-cisteína, sin embargo, al igual que los azúcares reductores, se ve una reducción en su concentración debido al crecimiento microbiano [26].

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de agua de coco embotellada microfiltrada.

Día	0	7	22	46
pH	4.57±0.04	4.9±0.01	4.86±0.01	4.82±0.02
°Brix	6.03±0.05	6.05±0.06	6.08±0.05	6.10±0.20
Acidez total (%)	0.01±0.00	0.09±0.01	0.09±0.00	0.09±0.00
Azúcares reductores (g/L) DNS	42.6±5.9	47.7±1.70	56.2±7.9	60.6±5.46
Carbohidratos totales (g/L)	13.3±12.7	15.1±4.8	17.8±5.2	19±2.43
Proteínas (g/L)	0.62±0.11	0.45±0.13	0.41±0.09	0.37±0.02

Promedio ± desviación estándar (n=4)

3.1.2 Aceite de coco virgen

Se reportó la eficiencia, la presión y el color obtenido de cada extracción en la Tabla 2. la pulpa prensada a 2000 Psi obtuvo el mayor porcentaje de eficiencia. El menor porcentaje de eficiencia se obtuvo con la metodología de fermentación F1, lo que concuerda con lo reportado en la literatura [14].

Tabla 2. Eficiencia de extracción de Aceite de coco virgen.

Muestra	P1	P2	P3	F1
Pulpa (g)	207	226	237	290
Aceite (g)	74	96	88	65
Eficiencia %	36%	42%	37%	22%
Presión (Psi)	1600	2000	2500	-
Color	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco

Comparando los resultados de la Tabla 3, se encontró que la densidad de los aceites sobrepasa los límites establecidos en la norma NTC 637 de $\rho=0.921\text{g/mL}$ [22]. Sin embargo, los valores son muy cercanos. El índice de yodo se encuentra entre los límites permitidos, este mide las insaturaciones presentes en los ácidos grasos que conforman un triglicérido [27], la muestra fermentada obtuvo el mayor índice de yodo de 7.04, esto se puede deber a que puede estar más rancio que los demás aceites. El índice de saponificación mide el peso molecular

promedio de todos los ácidos grasos presentes [28], en este caso todas las muestras de aceite se encuentran dentro de los límites establecidos, es decir que pertenecen al mismo grupo. Otra propiedad medida fue la materia insaponificable, esta se define como la fracción lipídica rica en ácidos en grasos libres la cual no es esterificada por acción de base [7], en este caso los índices de insaponificación de las muestras fueron muy bajos en comparación con el límite máximo, es decir los aceites presentan muy pocas impurezas, el mayor índice de insaponificación obtenido fue de 0.64 para la muestra fermentada.

El índice de acidez se expresó como ácido láurico ya que es el mayor ácido graso presente en el aceite de coco. Sin embargo, la acidez de las grasas es muy variable, generalmente las recién preparadas no contienen ácidos grasos libres o si los contienen es en muy pocas cantidades [27]. Por esta razón, el aceite de coco extraído y el comercial tienen valores menores que el límite máximo permitido, si estos valores superaran el límite se considera que el aceite tiene impurezas. El índice de refracción es otro indicador del contenido de ácidos grasos no saturados [28], en este caso, las muestras tienen un índice de refracción muy similar, aunque la muestra fermentada presenta el mayor valor. La humedad y material volátil de las muestras fue muy bajo, sin embargo, la muestra fermentada obtuvo una humedad de 2.18, lo que sobrepasa los niveles máximos de humedad debido a que proviene de la leche de coco y esta a su vez también posee un alto contenido de humedad, lo que puede generar que se dañe más rápido el aceite.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de aceite de coco extraído y comercial

Muestra	NTC 637						
	P1	P2	P3	F1	Comercial	Mínimo	Máximo
Densidad (g/mL)	0.942	0.959	0.950	0.987	0.958	0.908	0.921
Índice de yodo	6.31	6.78	6.35	7.04	6.53	6.3	10.6
Índice de saponificación (mg KOH/g Aceite)	247.2	250.7	255.0	248.6	254.5	248	265
Índice de insaponificación	0.52	0.36	0.48	0.64	0.56	-	≤ 15
Acidez como Ácido Láurico (%)	0.056	0.200	0.109	0.086	0.175	-	3.5
Índice de refracción	1.455	1.455	1.455	1.460	1.455	1.448	1.45
Humedad y material volátil (%)	0.19	0.00	0.20	2.18	0.00	-	0.2

3.1.3 Carbón activado

Analizando la Tabla 4. Se puede observar que la eficiencia de la carbonización y de la activación fue muy similar a la obtenida en [15]. Sin embargo, fue menor, lo que puede deberse a que no se contaba con una mufla en atmósfera inerte, y tampoco se contaba con un horno rotatorio. Además, se obtuvo un decrecimiento en la eficiencia, al aumentar la proporción de (g NaOH/g Carbón) esto se debe a la acción deshidratante del reactivo NaOH, que rompe los lazos C-O-C y C-C de la materia prima [15].

Tabla 4. Eficiencia de carbonización y activación.

	Laboratorio	Artículo [15]
Carbonización	32.00%	33.80%
Activación 700°C x 1.5h	CA-1	25.60%
	CA-2	22.80%
	CA-3	16.34%
		18.80%

El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activado, ya que el yodo se adsorbe con gran eficiencia en una capa mono molecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Por esto, el índice de yodo es proporcional al área del carbón [29]. El

carbón activado con mayor número de yodo fue CA-3 de 605,8 mg/g, seguido de CA-C de 539,08 mg/g (ver Tabla 5). La densidad aparente del carbón activado sirve para determinar el volumen de cama necesaria para contener una determinada masa [29]. Se encontró una disminución en la densidad de los carbones activados experimentales al aumentar la proporción (g NaOH/g Carbón) esto se debe a que los tamaños de partícula también disminuyeron. El carbón activado comercial (CA-C) es el que presenta mayor densidad 0,627 g/cm³ y mayor el porcentaje de humedad 5,369%. Esto puede deberse a que no es un carbón activado nuevo, si no, que es de uso del laboratorio, lo que hace que este más expuesto a la atmosfera y absorba humedad. También se midió el pH de los carbones activados, ya que esto influye en la adsorción, para los experimentales se obtuvieron pH cercanos a 5, y para el CA-C se obtuvo un pH mucho más ácido 2,59. El carbón activado con mayor tamaño de partícula es el comercial (2.36 – 0.6 mm), seguido del CA-1 (1.18 – 0.6 mm), CA-2 y CA-3 (0.6 - 0.3 mm), esto clasifica a los carbones como granulares.

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas carbón activado.

	CA-1	CA-2	CA-3	CA-C
Número de yodo (mg/g)	476.651	499.987	605.805	539.083
Densidad aparente (g/cm ³)	0.534	0.521	0.508	0.627
Contenido humedad (%)	3.526	4.008	3.450	5.369
pH	5.500	5.920	5.530	2.590
Granulometría (mm)	1.18 - 0.6	0.6 - 0.3	0.6 - 0.3	2.36 - 0.6

Los resultados de las isothermas de adsorción son muy útiles para describir la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, y para el debido análisis y diseño de cualquier sistema de adsorción. Se analizaron las isothermas de Langmuir y de Freundlich [30], las cuales son consideradas como modelos de dos parámetros, que proporcionan información de la capacidad de adsorción y constantes relacionadas con la energía de activación [23]. El modelo de Langmuir se basa en que todos los sitios de adsorción son idénticos, es decir que la superficie del sólido es perfectamente homogénea, también sugiere que no tiene lugar una adsorción adicional una vez que los sitios activos estén cubiertos con moléculas de colorante [31].

$$q_e = \frac{Q_m k_a C_e}{1 + k_a C_e} \quad (2)$$

Donde C_e es la concentración del adsorbato en equilibrio en solución (mg L⁻¹); q_e es la capacidad de adsorción de equilibrio (mg g⁻¹); Q_m es la máxima capacidad de adsorción (mg g⁻¹); y K_a es la constante que denota la energía de adsorción (L g⁻¹).

Por otra parte, también se midió el factor de separación (R_L) definido por Weber and Chakkravorti, el cual es un importante parámetro que puede ser utilizado para verificar la adsorción en el sistema. Si ($R_L > 1$) no es favorable, ($R_L = 1$) es lineal, y ($0 < R_L < 1$) es favorable [23]. El factor de separación fue calculado con la ecuación 3.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_a C_e} \quad (3)$$

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que supone que la distribución del calor en la superficie del adsorbente no es uniforme, es decir, una adsorción heterogénea [31]. Se calcula con la siguiente expresión:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

Donde K_f y n son las constantes de Freundlich que indican la capacidad e intensidad de adsorción respectivamente.

De acuerdo con Tabla 6, el carbón activado con mayor capacidad de adsorción según la isoterma de Langmuir es CA-C (152.33 mg g^{-1}) seguido del CA-3 con (131.98 mg g^{-1}) con R^2 de 0.9997 y 0.9963 respectivamente. También se encontró que el factor de separación R_L de todos los carbones activados se encuentra en el rango de 0 a 1, lo que significa que el sistema es favorable. A su vez, analizando los resultados de las isotermas de Freundlich, la constante n al ser mayor que 1 para todos los carbones activados, indica que la adsorción del sistema es favorable. Según los resultados obtenidos del coeficiente de correlación (R^2) se puede concluir que los datos experimentales se ajustan mejor a la isoterma de Langmuir.

Tabla 6. Parámetros de isotermas de adsorción.

Isotermas	Parámetros	CA-1	CA-2	CA-3	CA-C
Langmuir	$Q_m \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	93.71	109.25	131.98	152.33
	$K_a \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	0.31	0.28	0.16	0.28
	R^2	0.9993	0.9959	0.9963	0.9997
	R_L	0.732 - 0.013	0.76 - 0.03	0.837 - 0.014	0.751 - 0.01
Freundlich	$K_f \text{ (mg g}^{-1}\text{*(L mg}^{-1}\text{)}^{1/n}\text{)}$	27.74	30.11	42.87	50.77
	n	3.78	3.19	4.86	4.76
	R^2	0.537	0.506	0.644	0.544

De acuerdo con las gráficas de las isotermas de adsorción (ver Figura 1-4) podemos comprobar que Langmuir se ajustó mejor a los valores experimentales que Freundlich en todas las muestras. Además, se puede observar que q_{max} experimental concuerda con el valor obtenido de q_{max} de la isoterma de adsorción de Langmuir.

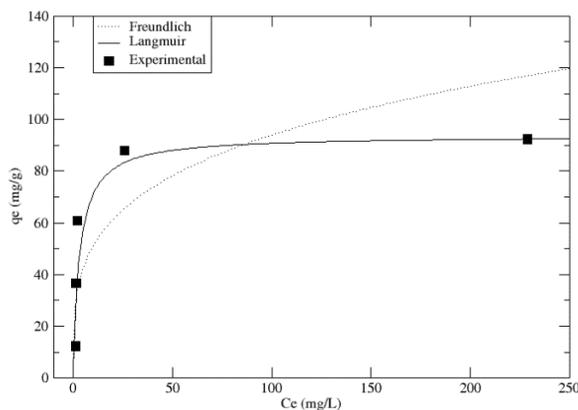


Figura 1. Isotherma de adsorción de CA-1

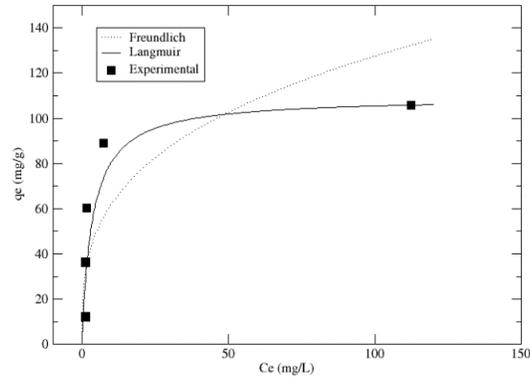


Figura 2. Isotherma de adsorción de CA-2

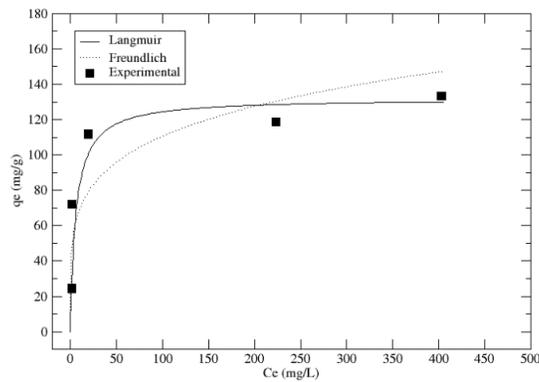


Figura 3. Isotherma de adsorción de CA-3

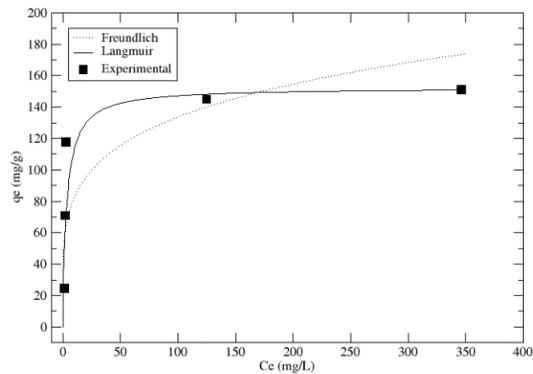


Figura 4. Isotherma de adsorción de CA-C

El espectro infrarrojo fue realizado para evaluar cualitativamente la estructura química de: la cáscara de coco (M), carbón de coco (MC), y los carbones activados obtenidos tanto en el laboratorio CA-1, CA-2 y CA-3, como el comercial CA-C. Como se puede observar en la Figura 1. La mayoría de los enlaces fueron destruidos en el proceso de carbonización, como por ejemplo los existentes en la zona de 3650 a 3200 cm^{-1} los cuales son atribuidos a grupo OH de alcoholes y fenoles [32], la banda ubicada en 2900 cm^{-1} que corresponde a grupos C-H, y en el pico de 1032 cm^{-1} que pueden estar relacionados con el estiramiento de enlaces C=C para alcoholes. [33]. Por otra parte, comparando el carbón (MC) con los carbones activados, se observan pequeñas diferencias,

como la desaparición del pico en 866 cm^{-1} el cual puede deberse a enlaces aromáticos C-H [34]. Los resultados obtenidos son similares a los encontrados en el artículo base [23].

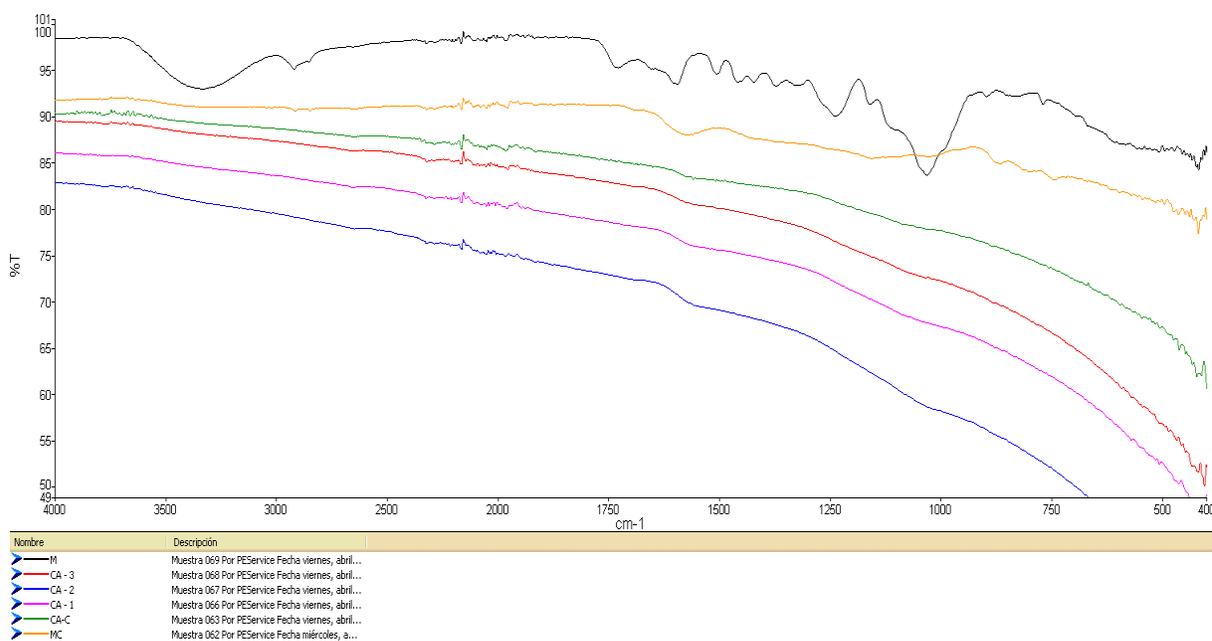


Figura 5. Espectrometría infrarroja

Por último, se realizó microscopía de barrido de electrones (SEM), para visualizar la morfología de la superficie de las muestras de carbón activado. Se puede observar que la superficie de los adsorbentes es irregular y altamente porosa, lo que indica tener buenas propiedades de adsorción [35]. Como se puede observar en la Figura 8. CA-3 es el carbón con mayor presencia de poros, lo que evidencia el efecto del agente activamente y lo que concuerda con el número de yodo, y su proporción de (g NaOH/g Carbón). Los poros que se pueden observar para el CA-1, CA-2 y CA-3 se encuentran en el rango: $100 - 26200\text{ nm}$, $100 - 30750\text{ nm}$, $100 - 40000\text{ nm}$ respectivamente. Lo que significa que a mayor proporción de (g NaOH/g Carbón), mayor desarrollo de mesoporos y macroporos.

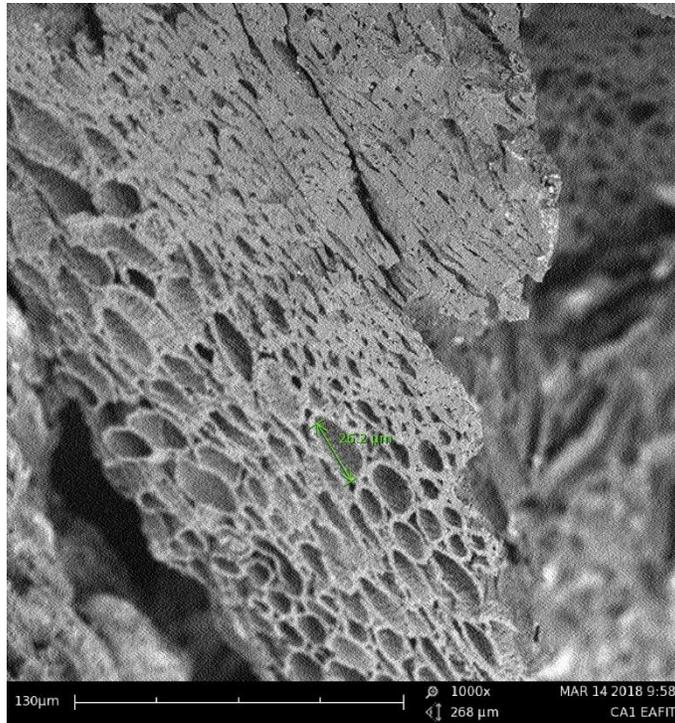


Figura 6. Imagen del SEM para CA-1.

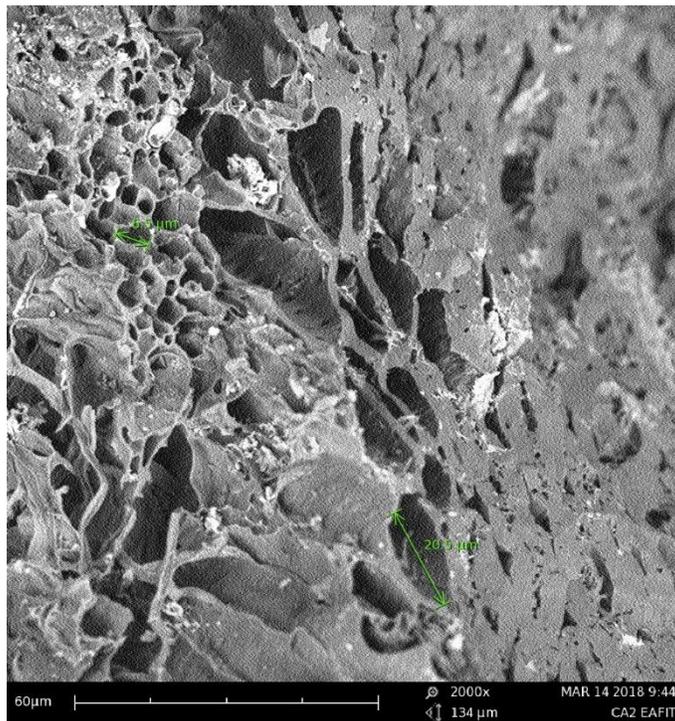


Figura 7. Imagen del SEM para CA-2



Figura 8. Imagen del SEM para CA-3

En el Anexo C se encuentran las hojas de especificaciones de los tres productos obtenidos en el laboratorio.

4. Conclusiones

Los productos obtenidos a escala de laboratorio cumplen con los indicadores de calidad evaluados. El agua de coco obtenida del proceso de microfiltración reportó bajo crecimiento microbiano (20 microorganismos/mL) en los 46 días de la prueba, muy similar a la muestra comercial (26 microorganismos/mL), además no se tuvo crecimiento de coliformes para ninguna de las dos muestras, lo que corrobora la validez del uso de microfiltración para la esterilización del agua de coco. Las pruebas fisicoquímicas no fueron tan estables en el tiempo, sin embargo, cumplen los rangos que estipula la FAO para el agua de coco. El aceite de coco con mayor eficiencia de extracción se obtuvo por medio de prensado en frío a 2000 Psi, al evaluar sus propiedades fisicoquímicas se obtuvieron resultados similares a la muestra comercial, además cumple las especificaciones estipuladas por la norma Invima NTC 637. El carbón activado se realizó mediante activación química con hidróxido de sodio, se evaluaron diferentes proporciones de (g NaOH/g Carbón) donde se obtuvo que, al aumentar esta proporción, se incrementa el índice de yodo, y disminuye el rendimiento de la activación. Para evaluarlo financieramente se tomó la proporción 1:1, para reducir costos de materia prima. Este carbón obtuvo un índice de yodo 476 mg/g y una capacidad máxima de adsorción de 93 mg/g según las isothermas de adsorción con azul de metileno, debido a sus características químicas, el carbón activado obtenido en este trabajo a partir de cascara de cocos, podría ser usado en tratamientos de aguas residuales para el tratamiento de algunos compuestos orgánicos.

Los resultados de la evaluación financiera del proyecto concluyen que la planta de alimentos es financieramente viable debido a que tiene un valor presente neto de 862 M COP, de forma contraria la planta de producción de carbón activado tiene un VPN de -3149 MCOP, es decir que es financieramente insostenible debido a que solo genera pérdidas, esto se obtuvo debido a que el costo de producción es mucho mayor al precio de venta. Por esta razón, se recomienda montar la planta de alimentos y no la del carbón activado.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 7. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado

Nombre	Desarrollo (propio/terceros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Anexo A	Propio	doc	https://bit.ly/2LpeGVt
Anexo B	Propio	xls	http://bit.ly/2rBksep
Anexo C	Propio	doc	http://bit.ly/2G6QeVI

Referencias

- [1] C. A. Quintana Jiménez, “Situación del coco en Colombia,” *Agro 2.0*, Colombia, Oct. 2012.
- [2] K. Yang, J. Peng, H. Xia, L. Zhang, C. Srinivasakannan, and S. Guo, “Textural characteristics of activated carbon by single step CO₂ activation from coconut shells,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 367–372, May 2010.
- [3] F. R. Reinoso, “Carbón activado: Estructura, preparación y aplicaciones.” Universidad de Alicante. España, 2005.
- [4] M. de M. Ribeiro, V. P. Valdramidis, C. A. Nunes, and V. R. de Souza, “Synergistic effect of thermosonication to reduce enzymatic activity in coconut water,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 41, pp. 404–410, 2017.
- [5] V. K. JAYANTI, P. Rai, S. Dasgupta, and S. DE, “Quantification of flux decline and design of ultrafiltration system for clarification of tender coconut water,” *J. Food Process Eng.*, vol. 33, pp. 128–143, 2009.
- [6] K. VENKAT REDDY, M. Das, and S. KUMAR DAS, “Nonthermal sterilization of green coconut water for packaging,” *J. Food Qual.*, vol. 30, pp. 466–480, 2007.
- [7] D. D. Bawalan, “Processing Manual for Virgin Coconut Oil, its Products and By-products for Pacific Island Countries and Territories.” Secretariat of the Pacific Community, 2011.
- [8] T. S. T. Mansor, Y. B. Che Man, M. Shuhaimi, M. J. Abdul Afiq, and F. K. M. Ku Nurul, “Physicochemical properties of virgin coconut oil extracted from different processing methods,” *Int. Food Res. J.*, vol. 19, pp. 837–845, 2012.
- [9] N. K. Mahnot, D. Kalita, C. L. Mahanta, and M. K. Chaudhuri, “Effect of additives on the quality of tender coconut water processed by nonthermal two stage microfiltration technique,” *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 59, no. 2, Part 1, pp. 1191–1195, Dec. 2014.
- [10] G. Becton Dickinson, “BD Endo Agar.” BD, Apr-2013.
- [11] N. Sun Wang, “Glucose assay by dinitrosalicylic colorimetric method.” Department of Chemical & Biomolecular Engineering University of Maryland.
- [12] M. DuBois, E. Gilles K. A., J. K. Hamilton, P. A. J. Rebers, and F. Smith, “Calorimetric Dubois Method for Determination of Sugar and Related Substances,” *Anal. Chem.*, vol. 28, pp. 350–356, 2002.
- [13] Sigma -Aldrich, “Protein Determination Modified Lowry Method,” *Sigma-Aldrich*. [Online]. Available: <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/protocols/biology/protein-determination.html>. [Accessed: 26-Mar-2018].
- [14] D. D. Bawalan and K. R. Chapman, “Virgin Coconut Oil Production manual for micro- and village- scale processing.” FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok., Feb-2006.
- [15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Preparación de la muestra para ensayo. NTC5033.” 16-Mar-2016.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad NTC336.” 19-Mar-2002.
- [17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de refracción NTC289.” 20-Feb-2002.
- [18] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de saponificación. NTC 335.” .

- [19] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de insaponificación. NTC 235-2.” .
- [20] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de yodo. NTC 283.” .
- [21] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de acidez y de la acidez NTC218.” 17-Aug-2011.
- [22] “Grasas y aceites animales y vegetales. Aceite crudo de coco. NTC 637.” .
- [23] A. L. Cazetta *et al.*, “NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption,” *Chem. Eng. J.*, vol. 174, no. 1, pp. 117–125, Oct. 2011.
- [24] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “PRODUCTOS QUÍMICOS INDUSTRIALES. CARBÓN ACTIVADO. MÉTODOS DE ENSAYO. NTC 4467.” ICONTEC, 26-Aug-1998.
- [25] FAO and R. Rolle, “Buenas prácticas para la producción de agua de coco embotellada.” 2007.
- [26] M. D. Purkayastha, D. Kalita, V. K. Das, C. L. Mahanta, A. J. Thakur, and M. K. Chaudhuri, “Effects of L-ascorbic acid addition on micro-filtered coconut water: Preliminary quality prediction study using ¹H-NMR, FTIR and GC-MS,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 13, pp. 184–199, 2012.
- [27] G. B. Medina M., “ACEITES Y GRASAS COMESTIBLES.” Universidad de Antioquia - Departamento de Farmacia - Bromatología.
- [28] Universidad Central de Venezuela, “Análisis de grasas y aceites: Índice de refracción, Yodo, Saponificación y Peróxido.” Facultad de Ciencias.
- [29] Universidad de Sonora, “CAPITULO II. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD Y REACTIVACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.” .
- [30] M. A. Islam, M. J. Ahmed, W. A. Khanday, M. Asif, and B. H. Hameed, “Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption,” *J. Environ. Manage.*, vol. 203, pp. 237–244, Dec. 2017.
- [31] A. M. Aljeboree, A. N. Alshirifi, and A. F. Alkaim, “Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon,” *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S3381–S3393, May 2017.
- [32] Z. Al-Qodah and R. Shawabkah, “Production and characterization of granular activated carbon from activated sludge,” *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 127–136, Mar. 2009.
- [33] A. F. Hassan, A. M. Abdel-Mohsen, and M. M. G. Fouda, “Comparative study of calcium alginate, activated carbon, and their composite beads on methylene blue adsorption,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 102, pp. 192–198, 2014.
- [34] G. da Silva *et al.*, *Biochar from Waste Rubber-Wood-Sawdust (Published,2013,ICP)*. 2014.
- [35] J. Mdoe and L. Mkayula, “Preparation and characterization of activated carbons from rice husks and shells of palm fruits,” *Tanzan. J. Sci.*, vol. 28, 2004.