

Valorización de Posos de Café: un Enfoque de Economía Circular

Loaiza, Javier Mauricio^{*a}; Palma, Alberto^{*a}

^aCentro de Investigación en Tecnología de Productos y Procesos Químicos. Pro²TecS- Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Ciencias de los Materiales. Universidad de Huelva, Av. 3 de marzo s/n, 21071 Huelva, España.

*Autores de correspondencia: javiermauricio.loiza@diq.uhu.es; alberto.palma@diq.uhu.es

Resumen- El alcance de este estudio es demostrar la posible implementación de procesos secuenciales para crear una biorrefinería en cascada eficiente para la valorización de los posos de café con un enfoque de economía circular. La investigación se ha planteado en varias unidades operativas, la primera para usos directos, donde se obtienen pellets para producir energía en forma de combustión. La segunda unidad operativa consiste en la recuperación de aceites de café mediante extracción sólida realizada en un aparato Soxhlet con n-hexano y etanol. Los aceites de café se convierten a través de reacciones de transesterificación en biodiesel, que es un combustible ecológico. La tercera unidad operativa son los procesos de biorrefinería, una vez extraídos los aceites, al sólido resultante se le realiza un proceso de fraccionamiento mediante una hidrólisis ácida con ultrasonido con el fin de separar las hemicelulosas y obtener productos de valor agregado como el furfural. Finalmente, al residuo sólido resultante del proceso de hidrólisis se le realiza un tratamiento termoquímico de pirólisis para obtener productos de interés como el biochar.

Palabras Clave: Posos de Café, Desarrollo Sostenible, Economía Circular, Biorrefinería, Biodiesel, Hemicelulosas.

I. INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial; su consumo se estimó en casi 10 millones de toneladas en 2021. Este enorme consumo de café genera alrededor de 7 millones de toneladas de posos de café cada año. Estos residuos son matrices heterogéneas que, además de celulosa, hemicelulosa y lignina, también contienen compuestos de alto valor agregado como ácidos grasos y antioxidantes, los cuales podrían extraerse y utilizarse para aplicaciones cosméticas, alimentarias y bioenergéticas [1]. Sin embargo, a pesar de su gran potencial como fuente de productos químicos valiosos, en la actualidad estos residuos se incineran principalmente o se eliminan en vertederos.

Los posos de café muestran una ventaja adicional por ser materias primas abundantes, no estacionales y de costo relativamente bajo, siendo el principal remanente tanto de la producción de café instantáneo en fábricas, en la elaboración del café en el sector de la restauración (restaurantes, hoteles, etc.) y en los hogares [2].

En este escenario, la conversión de biomasa como los posos de café a través de procesos de biorrefinería tiene un alto potencial por su sostenibilidad, y también por el hecho de utilizar materiales residuales para obtener productos de alto valor añadido de acuerdo con los principios del desarrollo sostenible. Además, la apuesta por una economía circular, la necesidad de reducir la dependencia de materias primas procedentes de recursos fósiles no renovables y las consecuencias del cambio climático exigen la utilización de

nuevas tecnologías en los sectores productivos tradicionales para sustituir el actual modelo de industrialización.

Los esquemas de biorrefinería permiten obtener flujos de fraccionamiento con nuevos usos potenciales adicionales, esto es especialmente así con el fraccionamiento en cascada por unidades operativas donde se pueden ir extrayendo los compuestos de interés y, a la vez, generar un residuo que puede seguir siendo valorizable, consiguiendo así un aprovechamiento integral en un enfoque de economía circular.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los posos de café se recolectaron de las cafeterías del Campus de “El Carmen” de la Universidad de Huelva, se estimó una producción de este residuo de 50 kilogramos a la semana aproximadamente. Una vez recibido se acondiciona y se extrae la humedad en estufa a 60 °C hasta obtener una humedad comprendida entre el 3% y 6%. La humedad se determinó por secado a peso constante a 105 °C, TAPPI T264-cm-07 [3].

Una vez acondicionada la materia prima se procede a su caracterización química, primero se miden los compuestos extraíbles que determinan la cantidad de material no volátil soluble en disolventes orgánicos neutros, TAPPI T204 cm-07, 2007 [4].

A continuación, se realiza una Hidrólisis Ácida Cuantitativa (HAC) en dos etapas, la primera de ellas se lleva a cabo con H₂SO₄ al 72%. En esta etapa se rompen los polisacáridos a oligómeros; y una segunda etapa con H₂SO₄ al 4%, que rompe los oligómeros a monómeros. Mediante la determinación de la concentración de los monómeros se calcula el contenido de los polisacáridos de la muestra inicial. El residuo que queda tras finalizar la HAC es el conocido como lignina Klason.

El líquido que se obtiene en la HAC se analiza de acuerdo a la norma TAPPI T249 cm-09, 2009 [5], para la determinación de los azúcares monoméricos (glucosa, xilosa, arabinosa), ácido acético y, opcionalmente, furfural y 5-hidroximetifurfural, mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

La Tabla I resume la caracterización química de los posos de café y de otros materiales ampliamente utilizados en los procesos de biorrefinería.

A. Caracterización energética de la materia prima

Se llevó a cabo la medida del poder calorífico de la materia prima siguiendo la norma CEN/TS, 2005 y la norma UNE 16001 EX, 2005. Estas normas describen el método a

seguir para la determinación del poder calorífico superior a volumen constante y a una temperatura de referencia de 25 °C, usando una bomba calorimétrica calibrada con ácido benzoico [6-7].

La Tabla II muestra el poder calorífico de estos posos de café y de otros materiales comúnmente utilizados en las calderas de biomasa para la producción de energía.

B. Extracción y caracterización de aceite de café

Después de la evaporación preliminar del contenido de humedad, los posos de café se sometieron a extracción sólido-líquido de aceites de café. La operación fue previamente optimizada para la extracción de los ácidos grasos largos, que representan los principales sustratos involucrados en el proceso de transesterificación para la producción de biodiesel.

En particular, se usó n-hexano y etanol para la extracción de aceites de café en un extractor Soxhlet, de acuerdo con la metodología descrita por Battista 2020, que permitió recuperar alrededor del 10-14% de los aceites de café. Los componentes mayoritarios fueron los ácidos grasos largos, en particular, el ácido palmítico y el ácido linoleico [8].

C. Hidrólisis ácida con ultrasonido

El proceso de hidrólisis se llevó a cabo en un baño Power Sonic Series 510, este equipo permite la aplicación simultánea del ultrasonido. Para realizar el tratamiento se realiza un diseño de experimentos con dos variables independientes: concentración de ácido (X_c) (4, 8 y 12%) y temperatura del proceso (X_T) (50, 60 y 70 °C), se fija el tiempo en 60 minutos y el hidromódulo de 1/10, para cada una de estas variables se definieron unos valores mínimos, medios y máximos con un total de 10 experimentos.

La Tabla III se muestran los resultados obtenidos en esta etapa de hidrólisis ácida con ultrasonido.

Como se puede observar en la tabla, a mayor temperatura y concentración media de ácido se extrae mayor porcentaje de hemicelulosas, se logra extraer hasta un 81% de las hemicelulosas presentes en los posos de café.

D. Figuras y tablas

Tabla I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POSOS DE CAFÉ Y OTROS MATERIALES

Composición	Presente estudio	Eucalipto globulus [9]	Eucalipto urograndis [10]	Posos café [11]
Extraíbles Etanol (%)	15.3 ± 2.0	2.7 ± 0.1	1.8 ± 0.5	10.3 ± 2.0
Glucano (%)	10.4 ± 0.5	42.8 ± 2.0	42.8 ± 2.6	20.6.4 ± 1.6
Lignina Klason (%)	17.8 ± 1.4	21.2 ± 0.9	23.2 ± 0.3	12.3 ± 0.8
Hemicelulosas Totales (%)	44.6 ± 2.0	21.4 ± 0.5	43.4 ± 0.7	46.5 ± 0.7

Tabla II

PODER CALORÍFICO DE POSOS DE CAFÉ Y DE OTROS MATERIALES DE ALTO RENDIMIENTO ENERGÉTICO

Biomasa lignocelulósica	Poder calorífico Superior (KJ Kg ⁻¹)	Autores
Pellets Posos de café	22787 ± 105	Presente estudio

Eucalipto globulus	19326 ± 84	[12]
Tallos de girasol	17259 ± 25	[13]
Pellets de poda de olivo	18720 ± 30	[14]
Hueso de aceituna	18092 ± 22	[14]

Tabla III
HEMICELULOSAS EXTRAÍDAS (%) EN LA ETAPA DE HIDROLISIS ACIDA CON ULTRASONIDO

Nº Exp.	X_c	X_T	Ácido (%)	T (°C)	Hemicelulosas Extraídas (%)
1	0	0	8	60	57.60
2	0	0	8	60	58.41
3	1	1	12	70	74.17
4	1	-1	12	50	63.86
5	-1	1	4	70	71.26
6	-1	-1	4	50	52.33
7	1	0	12	60	72.13
8	-1	0	4	60	49.06
9	0	1	8	70	81.84
10	0	-1	8	50	76.19

E. Ecuaciones

Diseño experimental. Modelización y optimización a través de modelos de regresión múltiple:

El proceso de extracción de las hemicelulosas se realizó por medio de una hidrólisis ácida con la aplicación simultánea de ultrasonido mediante el planteamiento de un diseño experimental de composición central, permitiendo así el estudio de la influencia de las variables independientes, temperatura (T) y concentración de ácido, sobre la variable dependiente, hemicelulosas extraídas, con el fin de maximizar la extracción de derivados de hemicelulosa al mismo tiempo que se garantiza que el sólido resultante tenga un alto poder calorífico para la producción de energía.

Se realizó un diseño factorial 2ⁿ con punto central para reducir el número de pruebas necesarias y también para evitar covarianzas significativas entre las variables dependientes.

El número de pruebas necesarias, N, se calculó como: 2ⁿ + 2n + n_c, donde 2ⁿ es el número de puntos que constituyen el diseño, 2n es el número de puntos axiales y n_c es el número de puntos centrales.

Las variables independientes se normalizaron siguiendo la Ec. (1)

$$X_n = \frac{2 \cdot (X - \bar{X})}{X_{\max} - X_{\min}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

X: es el valor absoluto de la variable independiente; \bar{X} : es el valor promedio de las variables; X_{\max} y X_{\min} : son los valores máximos y mínimos de la variable.

Los resultados se utilizaron para establecer polinomios de segundo orden para cada variable dependiente. Los polinomios que incluyen los términos lineales y cuadráticos de las variables independientes, y sus interacciones mutuas, y se ajustan mediante regresión múltiple:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_{ni} + \sum_{i=1}^n c_i X_{ni}^2 + \sum_{i=1, j=1}^n d_{ij} X_{ni} X_{nj} \quad (i < j) \quad \text{Ec. (2)}$$

La variable Y representa los valores de las variables dependientes, las variables independientes X_i representan la temperatura (X_T) y la concentración de ácido (X_a). Mientras que los coeficientes a_0 , b_i , c_i y d_{ij} son constantes características desconocidas, que se estiman sus valores mediante los datos experimentales. En las ecuaciones se han incluido solamente los términos estadísticamente significativos, estos deben alcanzar un valor del nivel significativo $p < 0,05$ del Student's t-test o alcanzar un intervalo de confianza con una probabilidad mayor del 95%. Todo el tratamiento de modelización se llevó a cabo con el programa estadístico Statistica v.1.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

F. Nombre y filiación de los autores

Javier Mauricio Loaiza: Investigador Postdoctoral. Centro de Investigación en Tecnología de Productos y Procesos Químicos (Pro²TecS). Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Ciencias de los Materiales. Universidad de Huelva, España.

Alberto Palma López: Profesor Sustituto Interino. Centro de Investigación en Tecnología de Productos y Procesos Químicos (Pro²TecS). Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Ciencias de los Materiales. Universidad de Huelva, España.

III. CONCLUSIONES

Los posos de café son uno de los principales desperdicios de alimentos a nivel mundial. Sin embargo, presenta un alto contenido en nutrientes que favorecen su valorización a través de un enfoque de economía circular para la producción de biocombustibles y otros productos de valor añadido con alto interés en los sectores químico y energético.

El análisis químico realizado confirma que el componente mayoritario de los posos de café son las hemicelulosas (xilosa y arabinosa), seguido de la lignina y la celulosa.

El aceite de los posos de café se puede extraer mediante extracción Soxhlet, lo que produce hasta un 14% de aceite que consiste principalmente en ácidos palmítico y linoleico, y muestra una aplicación potencial para la producción de biodiesel.

La extracción mediante hidrólisis ácida con ultrasonido a bajas temperaturas es operativa y ambientalmente ventajosa sobre otros métodos de fraccionamiento alcalino e hidrolítico. Por lo tanto, no requiere altas presiones ni temperaturas, lo que reduce el consumo de energía y, además, permite una degradación mínima de los derivados de hemicelulosa a furfural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de este trabajo a la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía y Telefónica España S.A.U, a través de Andalucía Open Future, en coordinación con la Oficina de Transferencia de Investigación (OTRI) y el Servicio de Empleo y

Emprendimiento de la Universidad de Huelva (Convocatoria "De idea a producto": Hecho en Café España). A la Cátedra Fundación CEPSA (Universidad de Huelva) y a la Secretaría General de Universidades, Investigación y Tecnología de la Junta de Andalucía por las ayudas concedidas a los agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento, para la financiación del personal investigador doctor, Convocatoria 2021.

REFERENCIAS

- [1] Battista, F., Zanzoni, S., Strazzer, G., Andreoli, M., Bolzonella, D., 2020b. The cascade biorefinery approach for the valorization of the spent coffee grounds. *Renew. Energy* 157, 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.113>.
- [2] Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kroger, M., Kaltschmitt, M., 2012. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel* 96, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.023>.
- [3] TAPPI T264 cm-07, 2007. Preparation of wood for chemical analysis. TAPPI Press, Atlanta, GA.
- [4] TAPPI T204 cm-07. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press; 2007.
- [5] TAPPI T249 cm-09. Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography. Atlanta: TAPPI Press; 2009.
- [6] CEN/TS 14918:2005. Solidbio Fuels—Method for the Determination of Calorific Value. 2005.
- [7] UNE 16001 EX. Solid Biofuels, Method for the determination of calorific value. 2005
- [8] Battista, F., Barampouti, E.M., Mai, S., Bolzonella, D., Malamis, D., Moustakas, K., Loizidou, M., 2020a. Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee grounds. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 131, 110007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110007>.
- [9] Loaiza JM, López F, García MT, Fernández O, Díaz MJ, García JC. Selecting the pre-hydrolysis conditions for eucalyptus wood in a fractional exploitation biorefining scheme. *J Wood Chem Technol* 2016;36:211–23. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1112402>.
- [10] Da Silva Moraes, A. P., Sansígolo, C. A., and De Oliveira Neto, M. (2016). "Effects of autohydrolysis of Eucalyptus urograndis and Eucalyptus grandis on influence of chemical components and crystallinity index," *Bioresource Technol.* 214, 623-628. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.124>
- [11] Federico Battista, Luca Zuliani, Fabio Rizzoli, Salvatore Fusco, David Bolzonella. Biodiesel, biogas and fermentable sugars production from Spent coffee Grounds: A cascade biorefinery approach. *Bioresource Technology* 342 (2021) 125952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125952>
- [12] Lopez, F.; García, M.T.; Fera, M.J.; García, J.C.; de Diego, C.M.; Zamudio, M.A.M.; Díaz, M.J. Optimization of furfural production by acid hydrolysis of Eucalyptus globulus in two stages. *Chem. Eng. J.* 2014, 240, 195–201.
- [13] Caparrós, S., Ariza, J., López, F., Nacimiento, J. A., Garrote, G., and Jiménez, L. (2008a). "Hydrothermal treatment and ethanol pulping of sunflower stalks," *Bioresource Technology* 99(5), 1368-1372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.045>
- [14] Álvarez Rodríguez, A. (2013). Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Trabajo fin de Master, Departamento de Energía. Universidad de Oviedo, España.