

# Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España)

## Biomass and waste pyrolysis as a strategy for sustainable production and industrial symbiosis in the Community of Madrid (Spain)

Jose María Sanchez-Hervas<sup>1</sup>, Isabel Ortiz<sup>2</sup>, Alejandro Márquez<sup>3</sup>, Ana María Fernández-Fernández<sup>4</sup>, Marina Canivell<sup>5</sup>, Esperanza Ruiz<sup>6</sup>

Sanchez-Hervas, J.M; Ortiz, I; Márquez, A; Fernández-Fernández, A.M; Canivell, M; Ruiz, E. Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España). *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, número especial. Diciembre, 2023. Encuentro Iberoamericano en Biomasa y Bioenergía. Pág. 45-54.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

- 1 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. Correo electrónico: [josemaria.sanchez@ciemat.es](mailto:josemaria.sanchez@ciemat.es)  
<https://orcid.org/0000-0002-8213-9123>
- 2 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. Correo electrónico: [isabel.ortiz@ciemat.es](mailto:isabel.ortiz@ciemat.es)  
<https://orcid.org/0000-0002-2230-0974>
- 3 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. Correo electrónico: [alejandro.marquez@ciemat.es](mailto:alejandro.marquez@ciemat.es)  
<https://orcid.org/0000-0002-7193-1262>
- 4 Grupo de Tecnologías a Presión. Instituto de Bioeconomía. Universidad de Valladolid. España. Correo electrónico: [anamaria.fernandez.fernandez@uva.es](mailto:anamaria.fernandez.fernandez@uva.es)  
<https://orcid.org/0000-0001-9553-0669>
- 5 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. Correo electrónico: [marina.canivell@ciemat.es](mailto:marina.canivell@ciemat.es)  
<https://orcid.org/0000-0002-7944-993X>
- 6 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. Correo electrónico: [esperanza.ruiz@ciemat.es](mailto:esperanza.ruiz@ciemat.es)  
<https://orcid.org/0000-0001-6943-4438>

## Palabras clave

Gestión de desechos; pirólisis; desarrollo medioambiental racional; estrategia industrial; economía circular; materias primas secundarias.

## Resumen

La tecnología de pirólisis ha recobrado una gran atención en los últimos años por su flexibilidad para generar una combinación de productos sólidos, líquidos y gaseosos en diferentes proporciones, en función de los parámetros operacionales. También permite la posibilidad de aumentar la densidad energética de los materiales y transformarlos en biocombustibles y productos de alto valor añadido. En el presente trabajo se sometieron a un tratamiento termoquímico de pirólisis una serie de residuos biomásicos, procedentes de la industria alimentaria y de plantas de tratamiento mecánico-biológico. Se ha estudiado el efecto que ejercen los parámetros de operación sobre el rendimiento y composición de los productos de pirólisis, con especial atención en el bio-aceite. De los residuos procedentes de la industria cervecera y los descartes de patata frita se obtiene mayor rendimiento en bio-aceite. Además, su menor contenido en cenizas y mayor poder calorífico favorecen las propiedades del bio-aceite. Por otro lado, en la pirólisis de los residuos sólidos urbanos predomina la fracción sólida. Por este motivo el biocarbonizado se ha caracterizado mediante análisis químico y textural. El biocarbonizado se ha tratado mediante métodos físicos y químicos para producir adsorbentes dirigidos a la captura de dióxido de carbono y potencialmente aplicables a otros usos. La activación química presenta los mejores valores de capacidad de adsorción máxima superiores a la activación física, obteniéndose incluso 20% más de capacidad de adsorción frente a un carbón activo industrial usado como referencia.

## Keywords

Residue management; pyrolysis; environmental sustainability; industrial strategy; circular economy; secondary raw materials.

## Abstract

Because of its versatility to produce a mixture of solid, liquid, and gaseous products in various quantities depending on operational factors, pyrolysis technology has attracted a lot of attention recently. Additionally, it opens up the prospect of increasing the materials' energy density and transforming them into high-value products and biofuels.

In the current study, a variety of biomass wastes from the food industry and mechanical-biological treatment facilities were chosen to be treated with thermochemical pyrolysis. With particular focus on the bio-oil, the impact of the operating conditions on the yield and composition of the pyrolysis products was investigated. From waste from the brewing industry and discarded potato chips, a higher bio-oil yield is obtained. In addition, its lower ash content and higher calorific value contribute to improve the properties of bio-oil. On the other hand, the solid fraction predominates in the pyrolysis of urban solid wastes. For this reason, chemical and textural analysis was used to characterize the resultant solid fraction, biochar. The biochar has undergone physical and chemical processing to produce adsorbents for carbon dioxide capture and possibly other applications.

## Introducción

El impacto medioambiental de los combustibles fósiles y el almacenamiento de los residuos sólidos, así como su inadecuada eliminación, causan un gran problema medioambiental a nivel global. Por ello, crece la demanda de tecnologías respetuosas con el medioambiente que reduzcan la cantidad de residuos de un modo sostenible y de bajo coste, apoyando una economía circular. La valorización termoquímica se postula como una alternativa a esta problemática, y concretamente la pirólisis ha ganado un gran interés por su versatilidad en la obtención tanto de productos líquidos, sólidos y gaseosos, en función de los parámetros operacionales [1]. Se ha demostrado la posibilidad de obtener productos de alto valor añadido, con múltiples aplicaciones [2].

Este trabajo, se centra en investigar el comportamiento de residuos procedentes de industrias de diversa índole en un proceso de pirólisis a escala de laboratorio una vez optimizadas las condiciones operacionales. La caracterización de los productos líquidos y sólidos permitirán estimar sus posibles aplicaciones [3].

## Materiales y métodos

Se seleccionaron una serie de residuos biomásicos, basándose en el aprovechamiento integral de este tipo de material con el fin de impedir o reducir los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos. Estos residuos fueron caracterizados y, posteriormente, sometidos a un proceso de pirólisis. Se llevó a cabo un estudio de la composición química de los productos resultantes con el fin de obtener materias primas secundarias, así como definir posibles aplicaciones.

El tipo de biomasa utilizada procede de fuentes tan diversas como la industria agroalimentaria y plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Los materiales de partida son los siguientes: piel de patata (PielP), descartes de patatas fritas (Chips), bagazo de cerveza (BCerv), pellets de residuos sólidos urbanos (RSU), de su fracción orgánica (FORSU) y pellets de los finos procedentes de la fracción rechazo (Finos). Como material de referencia, se utilizaron pellets de pino (Pino).

La biomasa fue sometida a un pretratamiento de secado (para el caso de PielP y BCerv) y molienda a un tamaño menor de 2 mm. Los ensayos de pirólisis se llevaron a cabo a escala de laboratorio en un reactor de lecho fijo. En el proceso se sometieron 8 g. de muestra a una rampa de calentamiento de 63°C/min hasta 500°C en atmósfera de nitrógeno y velocidad de flujo de 75 ml/min. La temperatura final se mantuvo durante 15 minutos. El producto líquido (bio-aceite), recogido en frascos borboteadores a través de un baño termostático (a -10°C); fue caracterizado mediante cromatografía de gases (Agilent 7890A) acoplada a espectrómetro de masas (HP 5975C). Se empleó Helio como gas portador, para un volumen de inyección de 1 µL en modo split en una columna HP-5MS (30 m x 250 µm x 0.25 µm). Se obtuvieron los rendimientos en líquido y sólido por pesaje, y se calculó por diferencia el rendimiento en gas.

Además, se ha investigado la producción de adsorbentes a partir del biocarbonizado obtenido durante la pirólisis de RSU (BC\_RSU). Con el fin de mejorar la capacidad de adsorción del biocarbonizado se sometió a dos métodos diferentes de activación, activación física y activación química. En el proceso de activación física, el biocarbonizado fue sometido a una velocidad de calentamiento de 20°C/min hasta alcanzar una temperatura de 550°C (AB\_550) y de 700°C (AB\_700) durante 90 minutos bajo un caudal constante de CO<sub>2</sub>. Por el contrario, la activación química se realizó empleando como agente activador una disolución de KOH 1M, con una relación Biocarbonizado-KOH de 1:1 en peso (AB\_KOH). La mezcla fue sometida a una velocidad de calentamiento de 20°C/min hasta alcanzar una temperatura de 500°C durante 90 minutos bajo un caudal de N<sub>2</sub>. Posteriormente, el biocarbonizado activado químicamente fue lavado en agua destilada hasta pH neutro.

La capacidad de adsorción de los adsorbentes producidos se ha estudiado empleando una termobalanza 2 STARe Mettler Toledo. Para ello, 20 mg de adsorbente fueron sometidos a una temperatura de 120°C para eliminar volátiles y se mantuvo durante 2 horas en atmósfera de nitrógeno, posteriormente se dejó enfriar hasta 30°C manteniendo la atmósfera. Una vez alcanzados los 30°C se modificó la atmósfera a CO<sub>2</sub> y se mantuvo a temperatura constante durante 3 horas, registrando el peso frente al tiempo. La capacidad de adsorción del adsorbente se determinó mediante la Ecuación 1, donde m<sub>f</sub> es la masa final obtenida y m<sub>i</sub> es la masa inicial en el momento en el que se produce el cambio de atmósfera. Como adsorbente de referencia se empleó un carbón activado comercial (AC\_REF). Todos los adsorbentes estudiados fueron caracterizados mediante las técnicas de análisis BET (Brauner-Emmett-Teller) para la determinación del área superficial específica y la técnica de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) para la determinación de la porosidad.

$$q_e \left( \frac{\text{mg CO}_2}{\text{g adsorbente}} \right) = \frac{m_f - m_i}{m_f} \cdot 1000 \quad (1)$$

Las curvas de adsorción se ajustaron a los modelos cinéticos propuestos por Ho y Mckay [4] de pseudo-primer orden y de pseudo-segundo orden, ecuación 2 y ecuación 3, respectivamente.

$$q(t) = q_e (1 - e^{-kt}) \xrightarrow{\text{Linealizando}} \ln [(q_e - q(t))] = -kt + \ln q_e \quad (2)$$

$$q(t) = \frac{1}{\frac{1}{k_2 q_e^2 t} + \frac{1}{q_e}} \xrightarrow{\text{Linealizando}} \frac{t}{q(t)} = \left( \frac{1}{k q_e^2} \right) + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

## Resultados y discusión

Del Cuadro 1 se demuestra la necesidad de un pretratamiento de secado en el caso de la piel de patata [5] y el bagazo de cerveza [6], por su alto contenido en humedad.

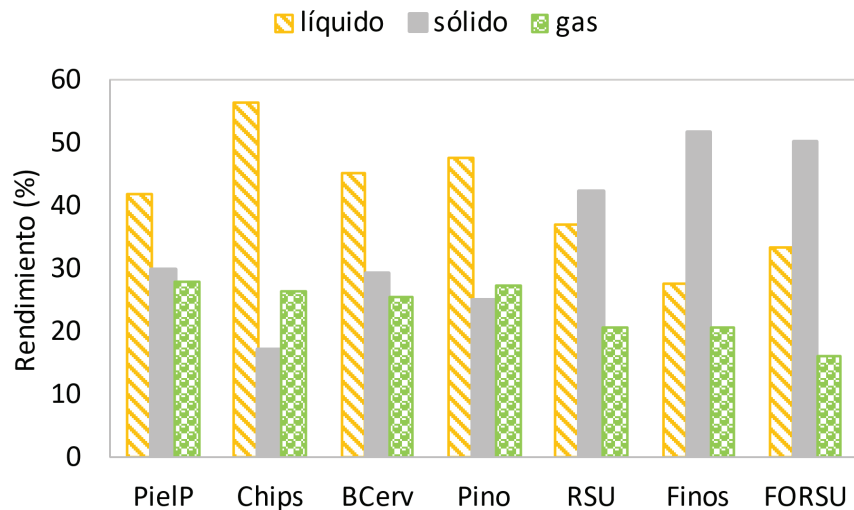
Las muestras RSU, Finos y FORSU poseen un alto contenido en cenizas que conllevará problemas operacionales asociadas a la acumulación de cenizas y menor producción de bio-aceite, así como mayor contenido de impurezas en el biocarbonizado obtenido. Se cumple que los residuos con alto contenido en cenizas y menor porcentaje de H y C (RSU, Finos, FORSU) presentan un poder calorífico inferior [7],[8]; siendo ligeramente superior para en el caso del RSU por un mayor contenido en volátiles. Los descartes de patata poseen el mayor poder calorífico, siendo la humedad un parámetro importante en la disminución de este valor en el bagazo de cerveza y la piel de patata. Además, en un estudio preliminar los altos niveles de cloro que presentan estos residuos indican el riesgo de corrosión [9].

El bagazo de cerveza y los descartes de patata se consideran potenciales candidatos para la producción de bio-aceite por el menor contenido en cenizas, mayor porcentaje en materia volátil (valor medio 3.5 y 84; respectivamente) y un mayor poder calorífico en comparación con el resto de residuos. Según la figura 1, se comprueba un mayor rendimiento en bio-aceite para el bagazo de cerveza (BCerv, 45%) y los descartes de patata (Chips, 56%); superando este último residuo en un 16% al material de referencia en la producción de bio-aceite. La pirólisis de los RSU, Finos y FORSU producen un rendimiento promedio del 48% de char y un 33% de bio-aceite.

**Cuadro 1.** Propiedades físico-químicas de los materiales.

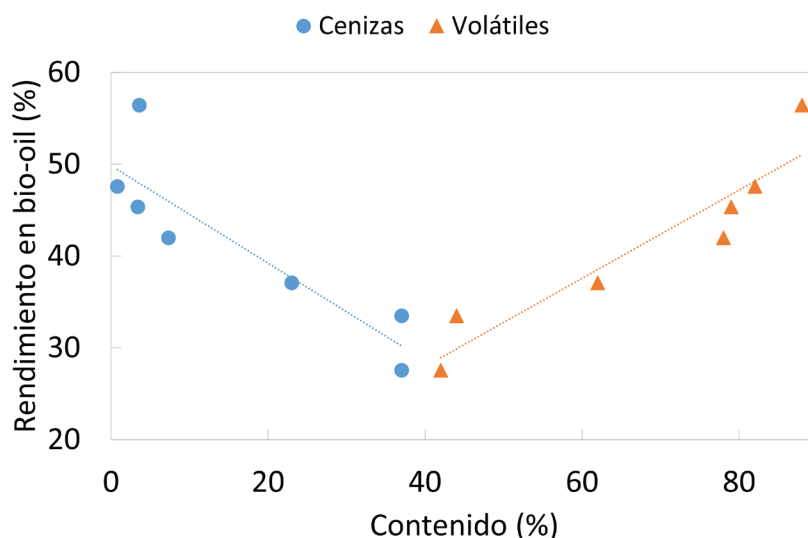
Muestra	Piel de patata	Descartes de patata	Bagazo de cerveza	Residuos sólidos urbanos	Finos RSU	Fracción orgánica RSU	Pellets de pino
Código	PielP <sup>6</sup>	Chips <sup>7</sup>	BCerv <sup>8</sup>	RSU <sup>9</sup>	Finos <sup>10</sup>	FORSU <sup>11</sup>	Pino <sup>12</sup>
<b>Humedad<sup>1</sup> (%)</b>							
(b.h.)	92	5,9	74	7,2	7,4	7,5	6,8
<b>Análisis inmediato (% b.s.)</b>							
Cenizas <sup>2</sup>	7,3	3,6	3,4	23	37	37	0,80
Volátiles <sup>3</sup>	78	88	79	61	42	44	82
C fijo	15	8,8	17	16	22	19	18
<b>Análisis elemental<sup>4</sup> (% b.s.)</b>							
C	53	58	46	41	35	34	50
H	6,8	8,1	6,8	5,5	4,6	4,6	6,1
N	1,9	0,88	2,9	1,8	2,2	1,8	0,19
S	0,11	0,080	0,25	0,44	0,58	0,58	0,020
Cl	0,15	0,45	0,14	0,71	0,61	0,75	0,010
O	31	29	41	28	21	21	43
<b>Poder Calorífico<sup>5</sup> (MJ/Kg)</b>							
PCS (b.s.)	22	25	21	17	14	14	20
PCI (b.s.)	20	24	20	16	13	13	19
PCS (b.h.)	n.d.	24	4,8	16	13	13	19
PCI (b.h.)	n.d.	22	2,6	15	12	12	18

<sup>1</sup>UNE-EN14774-2 <sup>2</sup>UNE-EN 151483 <sup>3</sup>UNE-EN 14775 <sup>4</sup>ISO 16948:2015 e ISO 16994:2015 <sup>5</sup>UNE-EN 14918:2011. (n.d.: no disponible). <sup>6</sup>Fracción de rechazo del lavado de patatas <sup>7</sup>Fracción de rechazo del procesado de patatas fritas <sup>8</sup>Subproducto de la industria cervecera <sup>9</sup>RSU sin fracción orgánica <sup>10</sup>Fracción de rechazo <sup>11</sup>Fracción orgánica de RSU separada en origen <sup>12</sup>Pinus Sylvestris



**Figura 1.** Rendimientos en bio-aceite, sólido o biocarbonizado y gas.

En la figura 2 se observa una clara tendencia entre una mayor producción de bio-aceite al aumentar la materia volátil, en detrimento del contenido en cenizas [8].



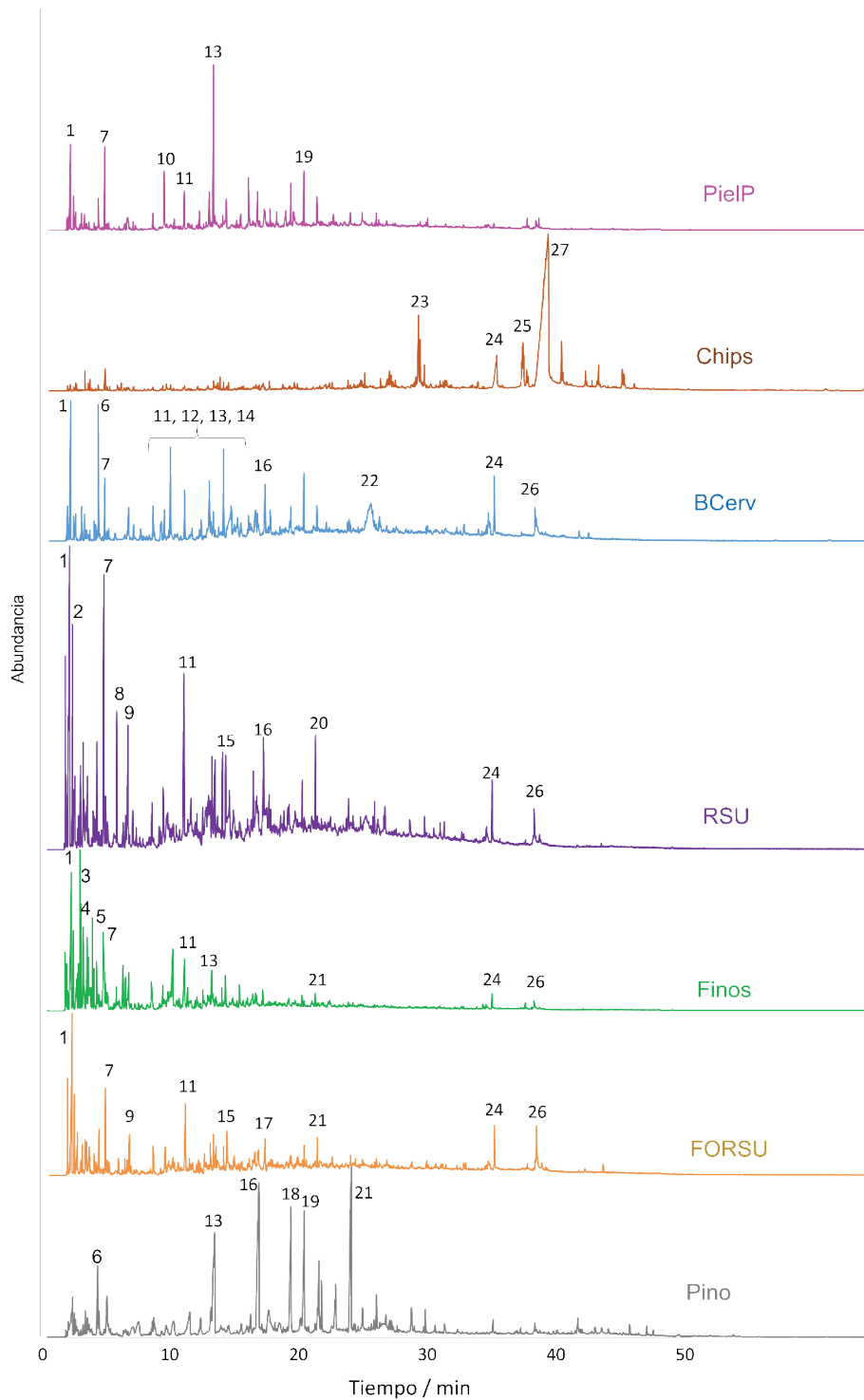
**Figura 2.** Relación entre el rendimiento en bio-aceite y los contenidos en cenizas y volátiles.

De manera global, la composición química mayoritaria del bio-aceite se enumeran en el cuadro 2 y en la figura 3 se muestran los cromatogramas correspondientes a cada uno de los residuos. El ácido acético y el 2-furanmetanol está presente en el bio-aceite de todos los residuos, excepto en el caso de Chips (en el cual predominan los ácidos grasos). En la fracción líquida de PielP predomina los compuestos fenólicos, al igual que en el bio-aceite del material de referencia, donde también abunda el furfural. En el bio-aceite de los RSUs destacan compuestos nitrogenados, hidrocarburos aromáticos.

De entre las posibles aplicaciones para estos compuestos identificados, cabe destacar que los compuestos fenólicos se utilizan en la industria farmacéutica, alimentaria, textil, embalaje, cosmética [12]-[13].

**Cuadro 2.** Compuestos mayoritarios del bio-aceite.

Compuesto	t <sub>r</sub> / min	Nº pico	Compuesto	t <sub>r</sub> / min	Nº pico
Ácido acético	1,9	1	3-Etil-2-hidroxi-2-ciclopenten-1-ona	13,9	15
N-nitrodimetilamina	2,0	2	2-Metoxi-4-metilfenol	16,5	16
Piridina	2,6	3	1,4:3,6-Dianhidro- $\alpha$ -D-glucopiranososa	16,8	17
2-hidroxi-propanonitrilo	3,3	4	4-Etil-2-metoxifenol	18,9	18
4-Piridinamina	3,6	5	2-Metoxi-4-vinilfenol	19,8	19
Furfural	3,8	6	2,6-dimetoxifenol	20,8	20
2-Furametanol	4,4	7	2-Metoxi-4-(1-propenil)fenol	23,7	21
Estireno	5,5	8	1,6-anhidro- $\beta$ -D-Glucopiranososa	25,0	22
2-(5H)-furanona	6,3	9	Heptadeceno	28,8	23
Fenol	9,0	10	Ácido hexanoico	34,6	24
3-Metil-1,2-ciclopentanodiona	10,7	11	Oleanotriilo	36,8	25
4-metilfenol	12,5	12	Ácido oleico/linoleico	37,9	26
2-metoxifenol	12,8	13	Ácido vaccénico	38,7	28
Maltol	13,6	14			



**Figura 3.** Cromatogramas del bio-aceite obtenido a partir de la pirólisis de los residuos.

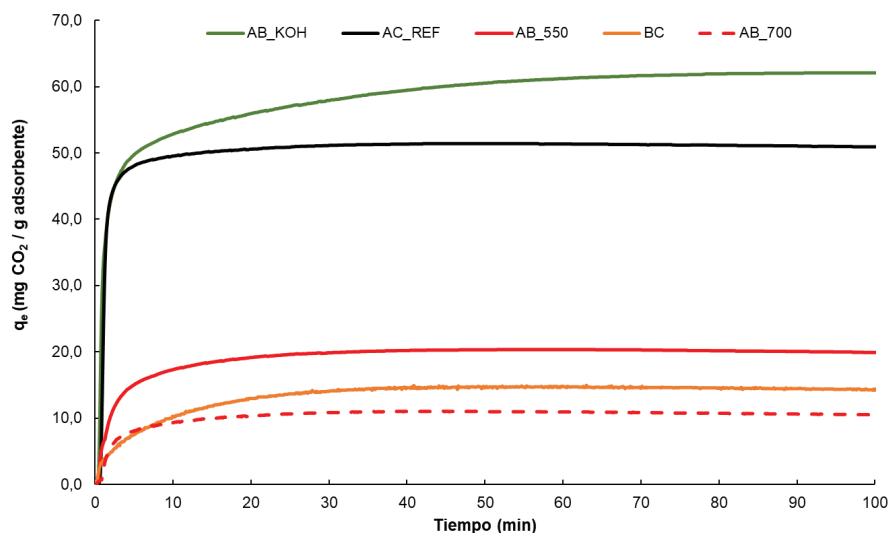
Debido al alto rendimiento de la fracción sólida de la pirólisis de RSU se estudia su posible aplicación como adsorbente de  $\text{CO}_2$ . En el cuadro 3 se muestra las características del biocarbonizado procedente de RSU y de los adsorbentes producidos activación física y química. Se observa un aumento de la superficie específica mediante el método de activación química ( $322 \text{ m}^2/\text{g}$ ), sin embargo, es considerablemente menor al carbón activado comercial con  $948$

m<sup>2</sup>/g. Además, se obtuvieron rendimientos de producción similares para los dos métodos de activación estudiados, siendo 28% para la activación química y 27% para ambos adsorbentes obtenidos a partir de activación física.

**Cuadro 3.** Caracterización de los adsorbentes y capacidad de adsorción de CO<sub>2</sub>.

Adsorbente	BC	AC_REF	AB_550	AB_700	AB_KOH
Isotermas de adsorción de Nitrógeno					
BET (m <sup>2</sup> /g)	3,19	948	71	26	322
Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP)					
Volumen total de intrusión(cm <sup>3</sup> /g)	1,2	1,4	1,5	1,5	2,0
Área de Poro Total (m <sup>2</sup> /g)	4,7	48	8,4	3,3	26
Diámetro de poro promedio (volumen, nm)	138 784	21 601	121 803	71 225	53 822
Mediana del diámetro de poro (area, nm)	480	10	22	63	13
Diámetro medio de poro (4V/A, nm)	4 590	119	700	1 610	299
Porosidad (%)	65	63	72	73	75
Capacidad de adsorción					
q <sub>e</sub> (mg CO <sub>2</sub> /g <sub>adsorbente</sub> )	13,75	32,61	18,82	10,51	61,56
Rendimiento					
Rendimiento (%)	43	-	27	27	28

En la figura 4 se muestra las curvas de adsorción de CO<sub>2</sub> para cada uno de los adsorbentes. Los resultados de capacidad de adsorción demuestran que la activación química, AB\_KOH, presenta mejores resultados frente a la activación física AB\_550, con 61,58 mg CO<sub>2</sub>/g<sub>adsorbente</sub> frente a 18,82 mg CO<sub>2</sub>/g<sub>adsorbente</sub>. Además, comparando AB\_KOH con AC\_REF, se observa una mejoría en la capacidad máxima de adsorción de CO<sub>2</sub>, siendo un 20% mayor y un 450% superior a la capacidad de BC.



**Figura 4.** Curvas de adsorción de CO<sub>2</sub> de los adsorbentes, donde q<sub>e</sub> representa la capacidad de adsorción de cada adsorbente.



Finalmente, los datos de adsorción de los adsorbentes se ajustaron a los modelos cinéticos propuestos por Ho and Mckay empleando la Ecuación 2 y Ecuación 3. Los resultados se muestran en el cuadro 4. El modelo de pseudo-segundo orden se ajusta mejor a los datos experimentales, con valores de capacidad de adsorción máxima similar a la obtenida experimentalmente.

**Cuadro 4.** Ajuste de cinéticas de adsorción para modelo de pseudo-primero orden y modelo de pseudo-segundo orden. Donde  $q_e$  representa la capacidad de adsorción del adsorbente,  $k$  es la constante cinética de adsorción y  $R^2$  es coeficiente de determinación.

Muestra	BC	AC_REF	AB_550	AB_700	AB_KOH
<b>Experimental</b>					
$q_e$ (mg/g)	14	51	21	11	62
<b>Pseudo-primero orden</b>					
$q_e$ (mg/g)	11	15	11	7,5	24
$k$ (min <sup>-1</sup> )	0,12	0,25	0,11	0,15	0,06
$R^2$	0,9877	0,9201	0,9877	0,9571	0,975
<b>Pseudo-segundo orden</b>					
$q_e$ (mg/g)	21	51	21	12	64
$k$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0,027	0,023	0,022	0,033	0,006
$R^2$	0,9989	0,9764	0,9999	0,9951	0,9996

## Conclusiones y recomendaciones

La pirólisis se puede enfocar hacia la producción de líquidos con el fin de obtener productos de valor añadido. La pirólisis de biomasa procedente de la industria alimentaria da lugar a mayor cantidad de bio-aceite con alto contenido en ácidos grasos y compuestos fenólicos. En cuanto al bagazo de cerveza, su bio-aceite destaca por su contenido en un tipo de azúcar.

Por sus características físico-químicas, los residuos de las plantas de tratamiento de sólidos urbanos producen biocarbonizado como producto pirolítico mayoritario. Por otro lado, producen un porcentaje no desdeñable de bio-aceite con productos químicos de interés en su composición. En este sentido, su alta disponibilidad y bajo coste sitúan a los RSUs como un buen material de partida para ser utilizado en el proceso de pirólisis.

El biocarbonizado a partir de RSU presenta una superficie específica baja, por lo que para su aplicación como adsorbente requiere de una activación. La activación química presenta los mejores valores de capacidad de adsorción máxima superiores a la activación física, obteniéndose incluso 20% más de capacidad de adsorción frente a un carbón activo industrial usado como referencia.

El modelo cinético de adsorción que mejor se ajusta es el modelo de pseudo-segundo orden con valores de capacidad máxima de adsorción similares a los obtenidos experimentalmente.

Como trabajo futuro, se llevarán a cabo la separación, *refinado* de los productos líquidos y posibles aplicaciones de los carbonizados obtenidos, así como el análisis de Ciclo de Vida con vistas a proceder al escalado de los procesos.

## Agradecimientos

Programa RETOPROSOST-CM, “Producción y simbiosis industrial en la Comunidad de Madrid”, S2013/MAE-2907.

Programa RETOPROSOST2-CM, “Producción y simbiosis industrial en la Comunidad de Madrid”, P2018/EMT4459.

A la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) del Programa CYTED, organizadora del evento EIBB-2022.

## Referencias

- [1] D. Czajczyńska, L. Anguilano, H. Ghazal, R. Krzyżyńska, A.J. Reynolds, N. Spencer and H. Jouhara, “Potential of pyrolysis processes in the waste management sector”, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 3, Sept. 2017, pp. 171-197, doi: 10.1016/j.tsep.2017.06.003.
- [2] P. Shrivastava, A. Kumar, P. Tekasakul, S. S. Lam, and A. Palamanit, “Comparative investigation of yield and quality of bio-oil and biochar from pyrolysis of woody and non-woody biomasses,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041092
- [3] B. Grycová, I. Koutník, A. Prysycz, “Pyrolysis process for the treatment of food waste”, *Bioresource Technology*, vol. 218, Oct. 2016, pp. 1203-1207, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.064
- [4] Y. S. Ho and G. Mckay, “Pseudo-second order model for sorption processes,” 1999.
- [5] O. Awogbemi, D.V. Kallon and A.O. Owoputi, “Biofuel Generation from Potato Peel Waste: Current State and Prospects”, *Recycling*, vol. 7, Ap. 2022, 23. doi: 10.3390/recycling7020023
- [6] Naibaho J and Korzeniowska M, “The variability of physico-chemical properties of brewery spent grain from 8 different breweries”, *Heliyon*, vol. 26;7(3), March 2021, e06583. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06583.
- [7] M. N. Islam, S. B. Ratul, A. Sharmin, K. S. Rahman, M. Ashaduzzaman, and G. M. N. Uddin, “Comparison of calorific values and ash content for different woody biomass components of six mangrove species of Bangladesh Sundarbans,” *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol. 16, no. 2, pp. 110–117, Dec. 2019, doi: 10.1007/s13196-019-00246-9.
- [8] A. Adamovics, R. Platace, I. Gulbe, and S. Ivanovs, “The content of carbon and hydrogen in grass biomass and its influence on heating value,” in *Engineering for Rural Development*, 2018, vol. 17, pp. 1277–1281. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N014.
- [9] O. Ławińska, A. Korombel, and M. Zajemska, “Pyrolysis-Based Municipal Solid Waste Management in Poland—SWOT Analysis,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15020510.
- [10] L. M. Terry et al., “Bio-oil production from pyrolysis of oil palm biomass and the upgrading technologies: A review,” *Carbon Resources Conversion*, vol. 4. KeAi Publishing Communications Ltd., pp. 239–250, Jan. 01, 2021. doi: 10.1016/j.crcon.2021.10.002.
- [11] B. R. Albuquerque, S. A. 8. Heleno, M. B. P. P. Oliveira, L. Barros, and I. C. F. R. Ferreira, “Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges,” *Food and Function*, vol. 12, no. 1. Royal Society of Chemistry, pp. 14–29, Jan. 07, 2021. doi: 10.1039/d0fo02324h.
- [12] L. D. M. S. Borel, A. M. Reis Filho, T. P. Xavier, T. S. Lira, and M. A. S. Barrozo, “An investigation on the pyrolysis of the main residue of the brewing industry,” *Biomass Bioenergy*, vol. 140, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105698.
- [13] J. L. Zheng, Y. H. Zhu, M. Q. Zhu, G. T. Sun, and R. C. Sun, “Life-cycle assessment and techno-economic analysis of the utilization of bio-oil components for the production of three chemicals,” *Green Chemistry*, vol. 20, no. 14, pp. 3287–3301, 2018, doi: 10.1039/c8gc01181h.