



# Biorrefinerías, el futuro para la transición hacia la (bio)economía circular

**J. C. López Neila, M. G. Acedos y B. Ruiz Fuertes**  
Departamento de Biotecnología, AINIA

Los últimos avances en biorrefinerías posicionan a estas como pilar clave en políticas nacionales e internacionales que apuestan por la bioeconomía circular. La producción sostenible de químicos bio-basados a partir de residuos mejora su viabilidad y dibuja una perspectiva de mercado que avanza hacia su competitividad respecto a las alternativas fósiles.

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa, Bioproducto, Biotecnología, Químico bio-basado, Residuos, Sostenibilidad, Valorización

The latest advances in biorefineries position these as key pillars in national and international policies that are committed to the circular bioeconomy. The sustainable production of bio-based chemicals from waste improves its viability and draws a market perspective that advances towards its competitiveness with respect to fossil alternatives.

**KEYWORDS:** Biomass, Bioproduct, Biotechnology, Bio-based chemical, Waste, Sustainability, Valorization

## **BIORREFINERÍAS, UNA ALTERNATIVA DE FUTURO PARA EL APROVECHAMIENTO DE DISTINTAS BIOMASAS**

En las últimas décadas se ha producido un crecimiento demográfico mundial sin precedentes, que lleva a estimar que seremos unos 9.500 millones de habitantes en 2050. Esta situación empieza a hacer más que evidentes algunos de los principales problemas de nuestra sociedad en este futuro próximo, a menos de 50 años vista, tales como el aumento en la demanda de recursos fósiles, las previsiones de agotamiento de los mismos y el impacto ambiental que conlleva su uso. Además, se prevé un aumento en la demanda de alimentos, de acuerdo al incremento de demanda, de 200 a 360-1250 millones de toneladas estimado para 2050, lo que hará necesaria la búsqueda de

fuentes proteicas alternativas para abastecer dichas necesidades [1, 2]. A esto hay que sumar los problemas medioambientales que se están experimentando en distintos puntos del planeta como consecuencia de las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, o la acumulación de residuos procedentes de las distintas actividades antropogénicas (~3 millones t/d actualmente) [2, 3].

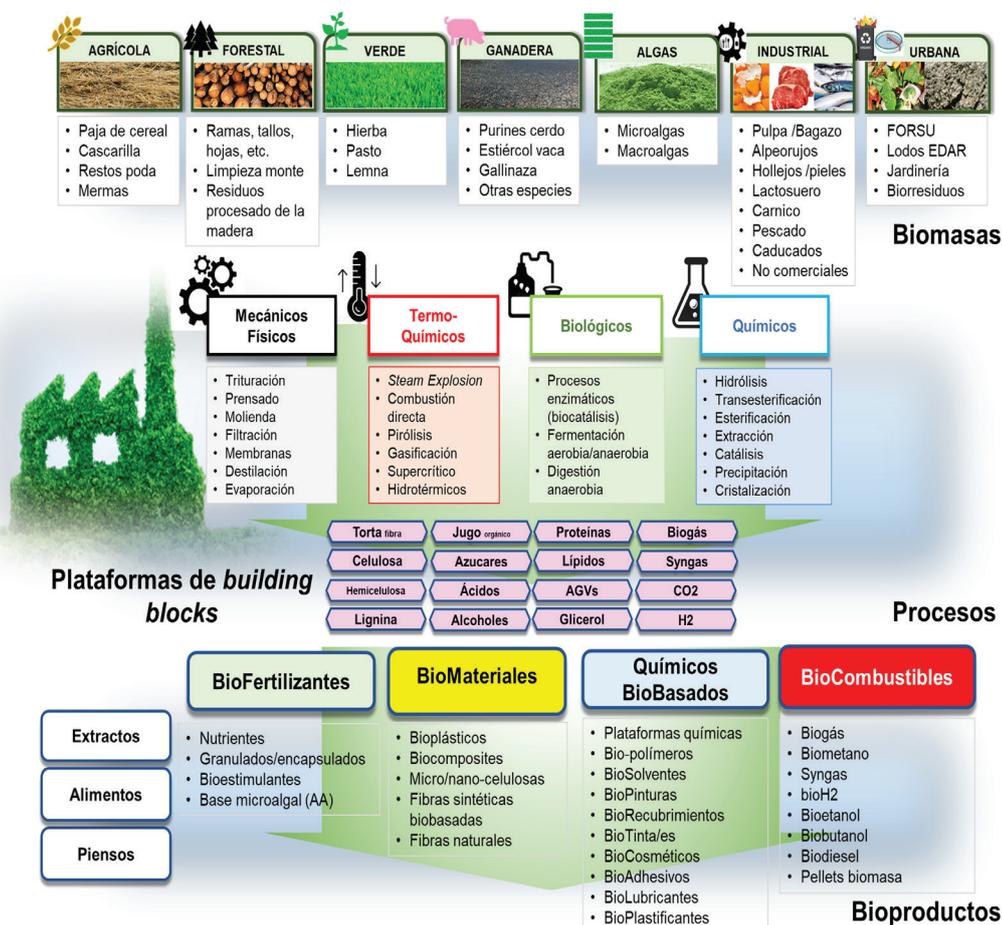
En este contexto, las biorrefinerías –entendidas como instalaciones integradas en las que se realiza una conversión sostenible de biomasa en un gran abanico de (bio)productos de interés industrial– han surgido en los últimos años buscando el concepto de economía circular y representan una de las apuestas de futuro para solventar algunos de los problemas mencionados anteriormente. Así, frente al tradicional aprovechamiento de resi-

duos de origen agrícola, ganadero o urbano en forma de compost y a lo sumo biogás, el concepto de biorrefinería amplía el abanico de biomásas utilizadas, de tecnologías aplicadas y de bioproductos de valor añadido generados, siendo estos tanto energéticos (combustibles, electricidad, calor) como no energéticos (piensos, alimentos, biomateriales, químicos), y de interés en la industria textil, cosmética, alimentaria, farmacéutica o del automóvil, entre otras (Figura 1) [2, 4, 5].

Estas biorrefinerías se caracterizan por el uso de fuentes renovables (en contraposición a las refinerías petroquímicas convencionales) y por el empleo de procesos ecoeficientes y con baja huella ambiental [6]. Además, suelen ubicarse en un ámbito agrícola o industrial atendiendo al lugar en que la materia prima esté disponible y al futuro uso de los bioproductos/

energía generados, pudiendo ser centralizadas o modulares y bajo distintas escalas. Las biorrefinerías integran distintos procesos mecánicos, termoquímicos y/o biológicos entre sus etapas, de forma que pueden distinguirse en ellas: i) procesos primarios de acondicionamiento, que transforman la biomasa en intermediarios (azúcares, ácidos grasos volátiles, biogás, etc.) y ii) procesos secundarios de transformación y procesamiento de estas plataformas en el producto final [4]. Si bien han sido descritos infinidad de modelos de biorrefinerías, generalmente clasificados en función del grado de desarrollo tecnológico u origen de la materia prima (biorrefinerías de 1ª, 2ª o 3ª generación), del tipo de biomasa (agrícola, forestal, ganadera, industrial o doméstica) o de la plataforma química predominante (azúcares, proteínas, biogás, gas de síntesis, etc.), todos

**FIGURA 1.** Principales tipos de biomásas, tecnologías y bioproductos de los modelos de biorrefinería actuales (adaptado de [2])



ellos suelen pivotar sobre tecnologías de relativamente gran madurez, sea a inicio o fin de proceso [2, 6]. Este es el caso de la tecnología de digestión anaerobia en una o dos fases, una biotecnología de gran versatilidad en lo que al uso de materias primas se refiere, y con capacidad para la multiproducción de un amplio espectro de bioproductos (biometano, bioplásticos, ácidos orgánicos, biofertilizantes, etc.), de aplicación en sectores como el químico, el de los plásticos o el de la cosmética, entre otros (Figura 2). Si bien esta tecnología ha sido comúnmente utilizada en los modelos de biorrefinería para el aprovechamiento de corrientes residuales y autoabastecimiento energético en planta, en los últimos años ha ganado peso en los procesos de adecuación aguas arriba de proceso (o *upstreaming*), tanto para el pretratamiento de los complejos residuos a veces utilizados como materia prima, como para potenciar la plataforma de ácidos grasos volátiles (AGVs) que de ella se deriva [7, 8].

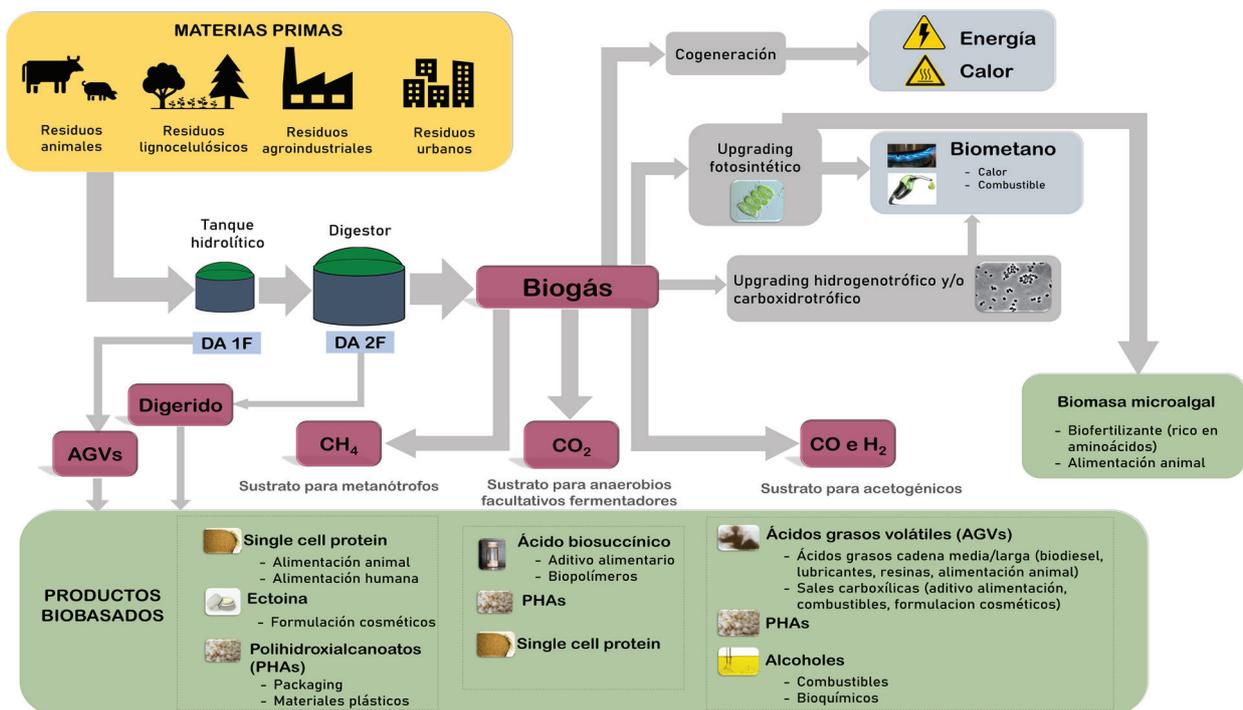
### ESTADO ACTUAL DE LAS BIORREFINERÍAS EN EUROPA

Actualmente, Europa cuenta con un total de 2.362 biorrefinerías, centradas en procesos productivos completos o parciales (desarrollo de procesos primarios o secundarios), de producción única o múltiple de compuestos de valor añadido, con o sin autoabastecimiento de energía en planta, y a distintas escalas (piloto, demo o comercial). La mayor densidad de biorrefinerías se encuentra en Centroeuropa, especialmente en Bélgica, Países Bajos y Alemania, seguido de ciertas regiones industrializadas de Francia e Italia [9-11].

Diez productos o compuestos, conocidos como plataformas químicas han sido identificados en estas instalaciones como predominantes y de mayor potencial: i) la de polisacáridos de bajo peso molecular (p.e. lactosa, sacarosa), ii) la de carbohidratos poliméricos (almidón o pectina), iii) de componentes lignocelulósicos (lignina, celulosa o hemicelulosa), iv) de proteínas, v) de fibras vegetales, vi) de

aceites vegetales y lípidos, vii) de aceites de pirólisis, viii) de jugo extraído a presión, ix) de biogás y x) de gas de síntesis (en inglés, *syngas*) [10, 11]. Las categorías de productos de biorrefinería más frecuentes en estas instalaciones son las de celulosa y papel, químicos bio-basados y madera (24, 22 y 21 %, respectivamente), seguidas de biometano (16 %) y biocombustibles líquidos (14 %). Es importante destacar que un 33 % de estas instalaciones incorporan tecnologías de obtención de energía (combustibles, calor o electricidad) en sus instalaciones y, por tanto, pueden autoabastecerse en planta e incrementar la sostenibilidad del proceso que llevan a cabo [11]. En lo referente a materias primas, el mayor número de biorrefinerías en la UE se basa en el uso de biomasa de origen agrícola y forestal (especialmente en países como Finlandia y Suecia), doméstica (especialmente en Alemania, Países Bajos, Francia, Reino Unido y España) y marina (especialmente en Francia, Países Bajos y España). Es importante destacar que el 43 % de estas

FIGURA 2. Modelo de integración de tecnologías de digestión anaerobia en dos fases dentro del concepto de biorrefinería



instalaciones a nivel europeo son biorrefinerías de residuos, es decir, utilizan residuos o subproductos como materia prima, siendo en su mayoría de origen agrícola (50 %), forestal (24 %) y doméstica (26 %) [10].

A nivel particular, España ocupa la séptima posición en cuanto al número total de biorrefinerías (108 instalaciones), con independencia de las capacidades de producción de éstas. La mayor contribución viene dada por instalaciones de producción de pasta y papel (43 %), ubicadas mayoritariamente en las comunidades de País Vasco, Aragón y Cataluña. A estas le siguen instalaciones de producción de químicos bio-basados (28 %) y biocombustibles líquidos (18 %), repartidas más uniformemente de acuerdo a los datos facilitados en la base de datos del *Joint Research Centre* (JCR) de la Comisión Europea (Figura 3) [11].

### PRODUCTOS QUÍMICOS BIO-BASADOS, UNA ALTERNATIVA A LOS RECURSOS FÓSILES EN EL CONCEPTO DE LAS BIORREFINERÍAS

El mercado actual de productos de las biorrefinerías está representado en gran parte por biocombustibles líquidos tales como el bioetanol y el biodiésel, que, desde la década de los 80, son producidos a partir de azúcares y grasas, fundamentalmente mediante transformaciones biológicas y termoquímicas [12]. No obstante, existen y han cobrado relevancia en los últimos años en mercado otros productos químicos con valor añadido, o utilizados como precursores para la producción de otros de mayor valor en mercado, y que se producen mediante microorganismos o enzimas. Son los denominados químicos bio-basados [13].

La clasificación de los químicos bio-basados generalmente atiende al uso final que potencialmente tienen, de forma que se distingue entre: i) plataformas químicas, ii) disolventes, iii) polímeros para síntesis de plásticos, iv) pinturas, revestimientos, tintes y colorantes, v) surfactantes, vi) cosméticos y productos para el cuidado personal, vii) adhesivos, viii) lubricantes, y ix) plastificantes y estabilizan-

» Los químicos bio-basados representan una alternativa a los derivados del petróleo, dadas sus características equivalentes, y se está avanzando en su competitividad en mercado

tes para caucho, plásticos y fibras sintéticas [14, 15]. Los compuestos que encontramos en estos grupos se pueden emplear en distintos sectores industriales tales como el propio sector químico, en el que encontramos los denominados disolventes verdes (2,3 butanodiol, 1,3- propanodiol, n-butanol o el etanol) [16-18]; el sector del plástico, en el que destacan el PLA (ácido poliláctico), los PHAs (polihidroxialcanoatos) o el ácido succínico

**FIGURA 3.** Distribución de biorrefinerías y porcentaje de las distintas categorías de bioproductos generados en estas a nivel nacional

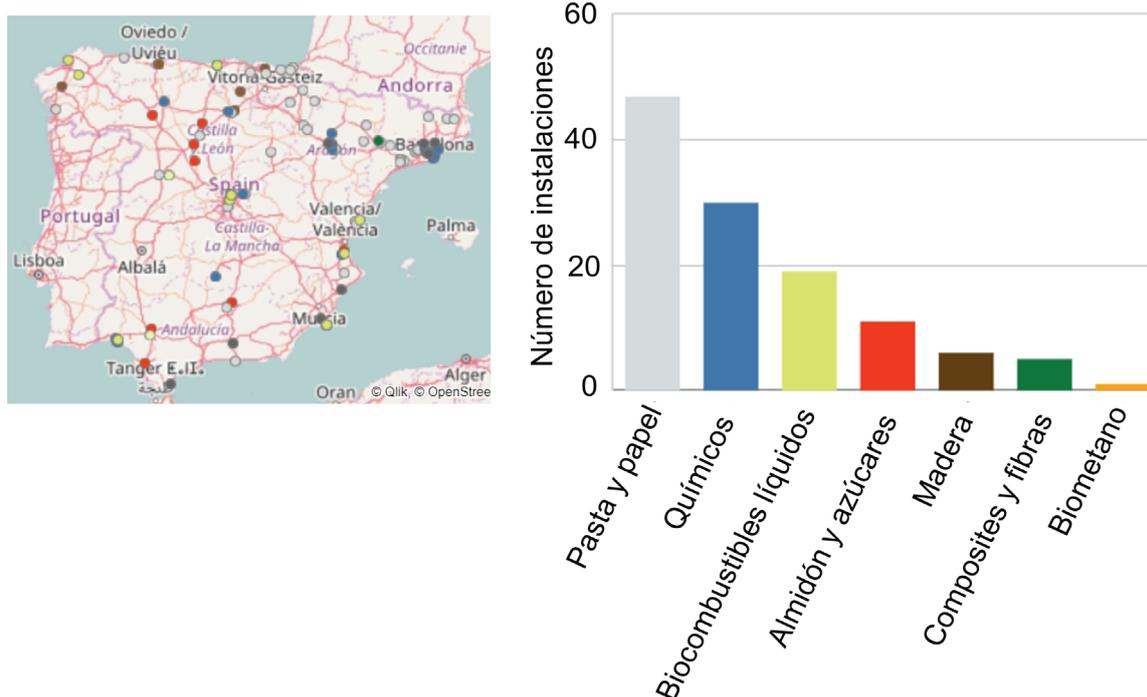
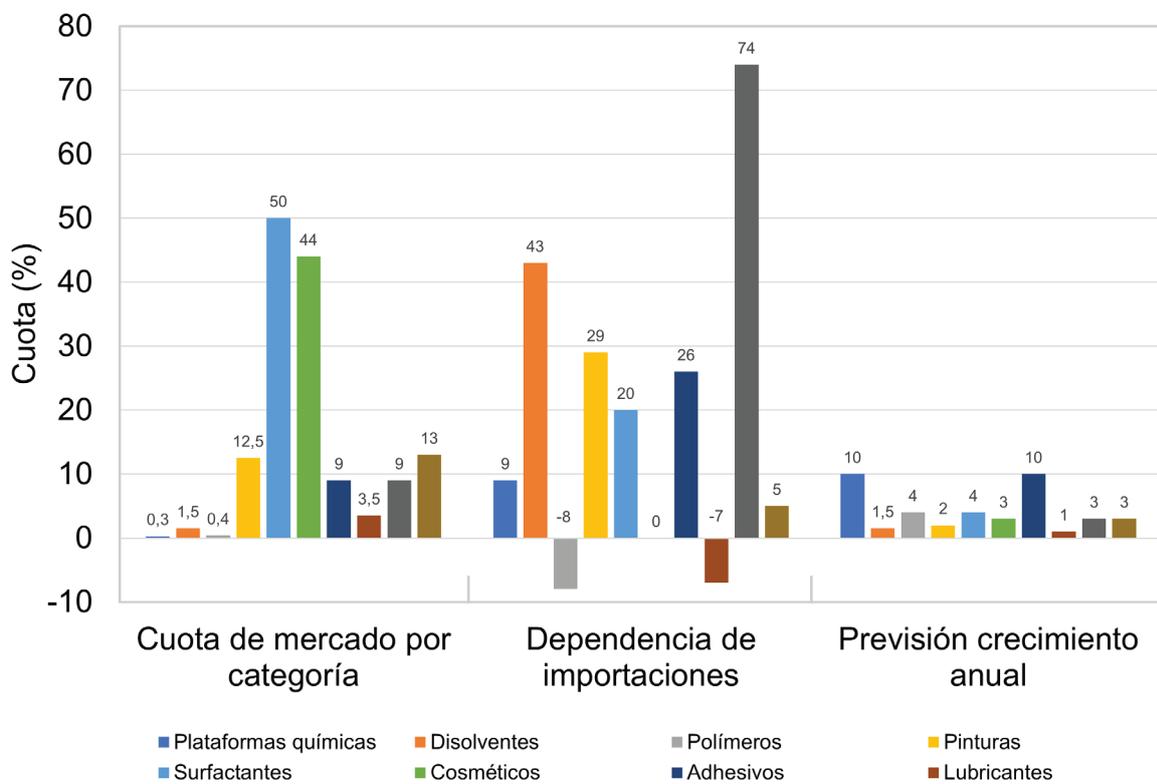


FIGURA 4. Mercado de los compuestos químicos bio-basados de la Unión Europea (UE-28) (adaptado de [25])



como precursores de bioplásticos [19-21]; o el sector agroalimentario, con compuestos como la pectina, el ácido L-láctico, ácido glutámico o el xilitol [22]; hasta el sector cosmético, con compuestos como la dihidroxiacetona (DHA) o la ectoína [23, 24].

En este sentido, la Figura 4 muestra la cuota de mercado de varios de estos grupos de químicos bio-basados y la previsión de crecimiento anual en la Unión Europea, así como la dependencia de importaciones de los mismos [14, 15, 25]. Se observa que la representación en el mercado de los compuestos químicos bio-basados producidos por vías biotecnológicas es notable, y las previsiones de crecimiento anual a cinco años vista son significativas. Asimismo, es importante destacar también que actualmente la mayoría de las categorías de químicos bio-basados presenta una fuerte dependencia de importaciones en la UE, especialmente en el caso de plastificantes y disolventes.

Los químicos bio-basados mencionados son solo algunos de los presentes en el gran abanico que ofrecen actualmente las biorrefinerías, y que terminarán ocupando un nicho importante en el mercado conforme los procesos productivos sean optimizados a partir de las distintas biomásas. En este sentido, cabe destacar, por último, el potencial de los avances que se están consiguiendo en disciplinas tales como la biología de sistemas y la ingeniería metabólica, pues están facilitando la obtención de microorganismos modificados genéticamente a medida para maximizar los rendimientos de producción en estos bioprocesos [26].

### CLAVES DE UNA BIORREFINERÍA DE ÉXITO – EL MODELO URBIOFIN

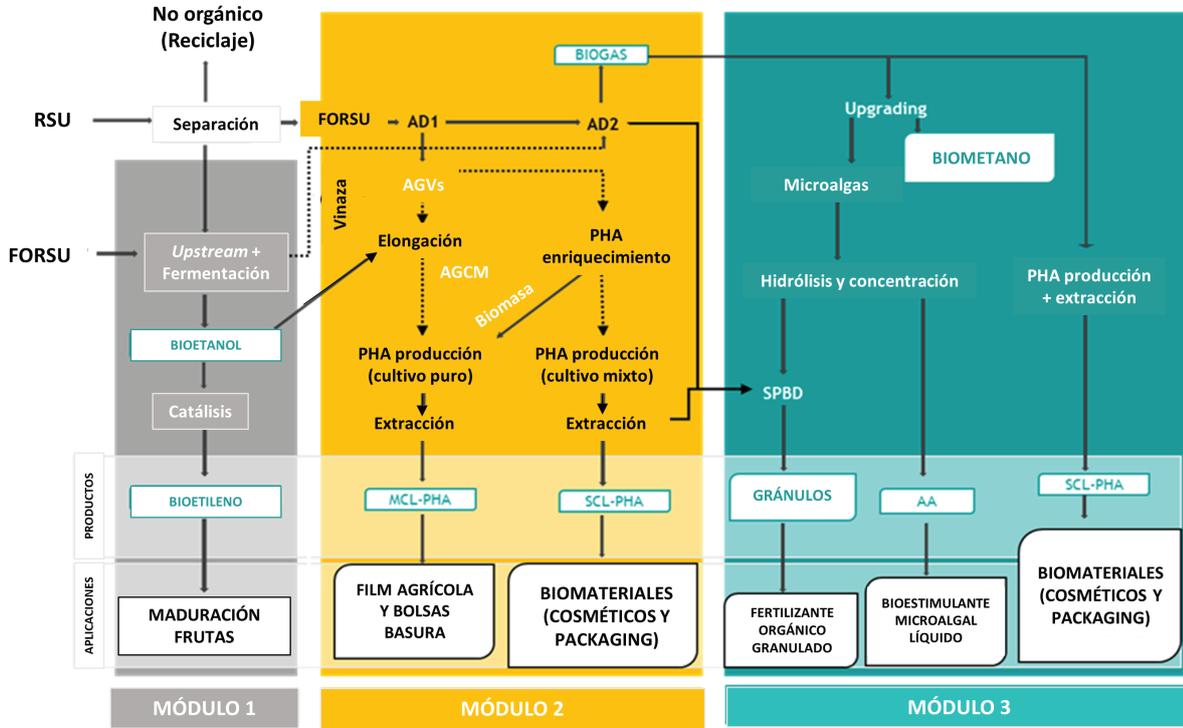
Como se indicó anteriormente, las biorrefinerías desarrollan procesos de manera sostenible, pero no solo desde una perspectiva medioambien-

tal, sino también social y económica, lo que conlleva un largo proceso de desarrollo previo a la implementación industrial [27-29].

Así, para poder desarrollar una biorrefinería con cierto éxito, es necesario contar en primer lugar con las tecnologías necesarias para conseguir transformar la materia prima de interés en un compuesto determinado. Esto implica seleccionar adecuadamente desde los pretratamientos de adecuación de la materia prima hasta los procesos de transformación en el producto final mediante catalizadores biológicos o químicos. El número de etapas necesarias para ello está definido por distintos factores, como puede ser la naturaleza y necesidades del producto final, la naturaleza y complejidad de la materia prima a emplear y, sobre todo, la economía del proceso. Esto implica que, desde el inicio, una biorrefinería debe estar adecuadamente diseñada, evitándose, en la medida de lo posible, combinaciones que inclu-



**FIGURA 5.** Diagrama de la biorrefinería URBIOFIN (adaptado de [34]). RSU: Residuos sólidos urbanos, FORSU: Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, AD1/AD2: Fases 1 y 2 del proceso de digestión anaerobia, AGVs: Ácidos grasos volátiles, AGCM: Ácidos grasos de cadena media, scl-PHAs: PHAs de cadena corta, mcl-PHAs: PHAs de cadena media, SPBD: Secado en lecho fluidizado (en inglés, spouted bed drying), AA: Aminoácidos



yan procesos multietapa, complejos y/o de bajo rendimiento, con el fin de hacerla económicamente viable [30]. Esto cobra especial sentido en el caso de las biorrefinerías de residuos, donde las materias primas están constituidas por matrices de gran complejidad, y la selección y diseño de los procesos de *upstreaming* resultan clave. Así, por ejemplo, en el caso de los residuos lignocelulósicos (restos de poda o restos vegetales de la industria agroalimentaria), es necesario contemplar que la resistente estructura de las células vegetales requiere de la aplicación de distintos pretratamientos (mecánicos, físicos y/o químicos), seguidos frecuentemente de una hidrólisis enzimática y la actuación de microorganismos para bioproducir el compuesto de interés. Además, este compuesto generalmente no tiene la pureza requerida aguas abajo, por lo que es necesario realizar un proceso de purificación (en inglés, *downstreaming*) para eliminar compuestos no

deseados que, en algunos casos, llega a representar hasta el 70-80 % de los costes totales de producción. Por ello, en este tipo de casos solamente la biorrefinería se ve compensada con un buen diseño, autoabastecimiento energético en planta o un alto valor del producto final generado [31, 32]. Además, se debe realizar una investigación muy bien estructurada con el fin de diseñar la escala de la biorrefinería, la mezcla de las diferentes materias primas utilizadas y las características del producto requeridas, siempre con foco a la localización geográfica de la misma y a las materias primas disponibles en el área [6, 33].

Aunque las biorrefinerías actuales no presentan el grado de optimización y madurez de las refinerías de recursos fósiles convencionales, el vertiginoso avance de sus tecnologías -respaldado por medidas políticas específicas y programas de financiación pública, en línea con las prioridades del reciente Pacto Verde Europeo- hace más

que probable que los precios de sus productos disminuyan en un futuro próximo, resultando más competitivos con respecto a los ya existentes derivados del petróleo [33]. Este es el claro ejemplo del modelo de biorrefinería desarrollado en el proyecto Urbiofin, cuyo objetivo se centra en demostrar la viabilidad técnico-económica y medioambiental de una biorrefinería urbana para valorizar hasta 10 t/d de residuos sólidos urbanos (RSU) en hasta tres categorías de bioproductos (químicos intermediarios, biopolímeros y aditivos), generando de forma perfectamente integrada nuevas cadenas de valor en el proceso de gestión de estos residuos [34]. Se trata de un proyecto demostrativo financiado por el consorcio público-privado *Bio-Based Industries Joint Undertaking* (BBI-JU) del programa Horizonte 2020, coordinado por la empresa española Imeal S.A., y que cuenta con la participación de hasta 16 socios (Ainia, Urbaser, Biomasa Peninsular,

Iriaf, Novozymes A/S, Universidad de Valladolid, Wageningen University & Research, CSIC y CIEMAT, entre otros). El modelo de biorrefinería en Urbiofin se compone de tres distintos módulos, desarrollados a escala pre-comercial en tres plantas localizadas en Valencia, Zaragoza y Ciudad Real, y llegando a la validación de los productos finales obtenidos a partir de los distintos bioproductos (PHAs de cadena corta y media, biofertilizante sólido granulado, biofertilizante líquido de base microalgal con aminoácidos, biometano y bioetileno) (Figura 5). Actualmente, las plantas demo han sido prácticamente adaptadas, gracias a la colaboración de la investigación realizada a escala laboratorio y piloto, para comenzar a bioproducir las cantidades estipuladas. En este sentido, Ainia, miembro asociado del consorcio europeo de bioindustrias (en inglés, *Bio-based Industries Consortium* o BIC) y comité científico-técnico del proyecto Urbiofin, ha desarrollado con éxito un procedimiento de producción de PHAs de cadena corta a partir de los AGVs obtenidos de la hidrólisis de la fracción orgánica de los RSU. Este proceso minimiza el upstreaming del residuo, utiliza una fuente de carbono que no compite con el sector de la alimentación y permite alcanzar contenidos de PHA comparables al proceso con AGVs producidos químicamente (>40 % peso seco). Además, en colaboración con Novozymes, Ainia está desarrollando un proceso eficiente de producción de biofertilizante con aminoácidos a partir de las microalgas crecidas con el biogás del digestor. Por el momento, las concentraciones de aminoácidos (en gran proporción esenciales) alcanzan el 3 % en peso en la fracción líquida resultante, en el orden de otros fertilizantes de base algal, y sugieren la futura obtención de un bioproducto capaz de competir en el mercado.

#### Referencias

- [1] Soto-Sierra, L., Stoykova, P., Nikolov, Z.L., 2018. "Extraction and fractionation of microalgae-based protein products". *Algal Res*, 36, 175-192.
- [2] López, J.C., 2020. "Las biorrefinerías, una apuesta firme hacia la (bio)economía circular". AINIA Tecnolimentaria, Tecnología.
- [3] Coma, M., Martínez-Hernández, E., Abeln, F., Raikova, S., Donnelly, J., Arnot, T.C., Allen, M.J., Hong, D.D., Chuck, C.J., 2017. "Organic waste as a sustainable feedstock for platform chemicals". *Faraday Discussions*, 202, 175-195.
- [4] Plataformas Tecnológicas Españolas de Biomasa para la Bioeconomía (BIOPLAT) y Química Sostenible (SusChem), 2017. "Manual sobre las Biorrefinerías en España". [http://www.suschem-es.org/docum/pb/otras\\_actividades/presentacion\\_biorrefinerias\\_180917](http://www.suschem-es.org/docum/pb/otras_actividades/presentacion_biorrefinerias_180917) (Acceso 10.04.2020).
- [5] Diep, N.Q., Sakanishi, K., Nakagoshi, N., Fujimoto, S., Minowa, T., Tran, X.D., 2012. "Biorefinery: Concepts, current status, and development trends". *Int J Biomass Renewables*, 1, 1-8.
- [6] Moncada B., J., Aristizábal M., V., Cardona A., C.A., 2016. "Design strategies for sustainable biorefineries". *Biochem Eng J*, 116, 122-134.
- [7] Moscoviz, R., Trably, E., Bernet, N., Carrère, H., 2018. "The environmental biorefinery: state-of-the-art on the production of hydrogen and value-added biomolecules in mixed-culture fermentation". *Green Chem*, 20, 3159-3179.
- [8] Sawatdeenarunat, C., Nguyen, D., Surendra, K.C., Shrestha, S., Rajendran, K., Oechsner, H., Xie, L., Khanal, S.K., 2016. "Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and opportunities". *Biores Technol*, 215, 304-313.
- [9] Bio-based Industries Consortium (BIC), 2017. Mapping European Biorefineries. <https://biconsortium.eu/news/mapping-european-biorefineries> (Acceso 10.04.2020).
- [10] Parisi, C., 2018. "Research Brief: Biorefineries distribution in the EU". European Commission - Joint Research Centre.
- [11] Parisi, C., 2020. "Distribution of the bio-based industry in the EU". Publications Office of the European Union.
- [12] OCDE/FAO, 2017. "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026", Éditions OCDE, Paris.
- [13] De Jong, E., Stichnothe, H., Bell, G., Jorgensen, H., 2020. "Bio-based chemicals - a 2020 update". Technology Collaboration Programme. IEA Bioenergy: Task 42: 2020: 01.
- [14] Panchaksharam, Y., Kiri, P., Bauen, A., Vom Berg, C., Puente, A., Chinthapalli, R., Spekreijse, J., Vos, J., Pfau, S., Rübberdt, K., Michels, J., König, L., 2019. "Roadmap for the Chemical Industry in Europe towards a Bioeconomy". Action Plan RoadtoBio.
- [15] Spekreijse, J., Lammens, T., Parisi, C., Ronzon, T., Vis, M., 2019. "Insights into the European Market of Bio-Based Chemicals. Analysis Based on Ten Key Product Categories". EUR 29581 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [16] Acedos, M.G., Yustos, P., Santos, V.E., García-Ochoa, F., 2019. "Carbon flux distribution in the metabolism of *Shimwellia blattae* (p424lbPSO) for isobutanol production from glucose as function of oxygen availability". *J Chem Technol Biotechnol*, 94, 850-858.
- [17] Acedos, M.G., Hermida, A., Gomez, E., Santos, V.E., García-Ochoa, F., 2019. "Effects of fluid-dynamic conditions in *Shimwellia blattae* (p424lbPSO) cultures in stirred tank bioreactors: Hydrodynamic stress and change of metabolic routes by oxygen availability". *Biochem Eng J*, 149, 107238.
- [18] Ripoll, V., Rodríguez, A., Ladero, M., Santos, V., 2020. "High 2,3-butanediol production from glycerol by *Raoultella terrigena* CECT 4519". *Bioprocess Biosyst Eng*, 43, 685-692.
- [19] De la Torre, I., Ladero, M., Santos, V.E., 2020. "D-lactic acid production from orange waste enzymatic hydrolysates with *L. delbrueckii* cells in growing and resting state". *Ind Crop Prod*, 146, 112176.
- [20] López, J.C., Arnáiz, E., Merchán, L., Lebrero, R., Muñoz, R., 2018. "Biogas-based polyhydroxyalkanoates production by *Methylocystis hirsuta*: A step further in anaerobic digestion biorefineries". *Chem Eng J*, 333, 529-536.
- [21] Angelidaki, I., Gunnarsson, I. B., Alvarado-Morales, M., 2014. "Methods for upgrading of a fuel gas and succinic acid production". IPC No. C12P5/02 (Patent No. WO2014188000).
- [22] Özüdoğru, H.M.R., Nieder-Heitmann, M., Haigh, K.F., Görgens, J.F., 2019. "Techno-economic analysis of product biorefineries utilizing sugarcane lignocelluloses: Xylitol, citric acid and glutamic acid scenarios annexed to sugar mills with electricity co-production". *Ind Crop Prod*, 133, 259-268.
- [23] De la Morena, S., Acedos, M.G., Santos, V.E., García-Ochoa, F., 2019. "Dihydroxyacetone production from glycerol using *Gluconobacter oxydans*: Study of medium composition and operational conditions in shaken flasks". *Biotechnol Progress*, 35, 2803.
- [24] Zhao, Q., Li, S., Lv, P., Sun, S., Ma, C., Xu, P., Su, H., Yang, C., 2019. "High ectoine production by an engineered *Halomonas hydrothermalis* Y2 in a reduced salinity medium". *Microb Cell Fact*, 18, 184.
- [25] Acedos, M.G., 2020. "Mercado de los compuestos químicos bio-basados: Realidad y retos de futuro". AINIA Tecnolimentaria, Tecnología.
- [26] Mouterde, L.M.M., Allais, F., 2020. "Bio-based production of chemicals through metabolic engineering". En: Galanakis, C.M. (Ed.) *Biobased Products and Industries*, Elsevier, pp. 171-202.
- [27] Cherubini, F., 2010. "The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals". *Energ Convers Manage*, 51, 1412-1421.
- [28] Ubando, A.T., Felix, C.B., Chen, W.H., 2020. "Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review". *Biores Technol*, 299, 122585.
- [29] Nizami, A.S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O.K.M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M.Z., Syamsiro, M., Ismail, I.M.I., Pant, D., 2017. "Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries". *Biores Technol*, 241, 1101-1117.
- [30] Straathof, A.J., Wahl, S.A., Benjamin, K.R., Takors, R., Wierckx, N., Noorman, H.J., 2019. "Grand research challenges for sustainable industrial biotechnology". *Trends Biotechnol*, 37, 1042-1050.
- [31] De la Torre, I., Martín-Domínguez, V., Acedos, M.G., Esteban, J., Santos, V.E., Ladero, M., 2019. "Utilisation/upgrading of orange peel waste from a biological biorefinery perspective". *Applied Microbiol Biotechnol*, 103, 5975-5991.
- [32] Farzad, S., Mandegari, M.A., Guo, M., Haigh, K.F., Shah, N., Görgens, J.F., 2017. "Multi-product biorefineries from lignocelluloses: a pathway to revitalisation of the sugar industry?". *Biotechnol Biofuels*, 10, 87.
- [33] Lindorfer, J., Lettner, M., Fazeni, K., Rosenfeld, D., Annevelink, B., Mandl, M., 2019. "Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts: Developing a practical approach for characterisation". IEA Bioenergy: Task 42:2019:01.
- [34] Pérez, V., Pascual, A., Rodrigo, A., García-Torreiro, M., Latorre-Sánchez, M., Coll-Lozano, C., Moreno, A.D., Oliva-Domínguez, J.M., Serna-Maza, A., Herrero-García, N., González-Granados, I., Roldán-Aguayo, R., Ovejero-Roncero, D., Molto-Marín, J.L., Smith, M., Musinovic, H., Raingué, A., Belard, L., Pascual, C., Lebrero, R., Muñoz, R., 2020. "Integrated innovative biorefinery for the transformation of municipal solid waste into biobased products". En: Bhaskar, T., Pandey, A., Rene, E.R., Tsang, D. (Ed.), 2ª Edición, *Waste Biorefinery*, Elsevier, pp. 41-80. ■