

La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos

Marvin Chávez-Sifontes

Resumen: La biomasa lignocelulósica es una materia prima renovable que ayudará a reducir la dependencia de las materias primas fósiles. Para poder aprovechar la biomasa es necesario aplicar procesos biológicos y termoquímicos para acceder a sus componentes principales. A partir de los componentes principales se pueden producir moléculas plataforma que sirven como materia prima para obtener productos químicos de interés industrial. La presente contribución expone las posibilidades de la biomasa lignocelulósica como materia prima para producir combustibles y productos químicos. Se pretende que el artículo sirva como un documento introductorio para el estudio de procesos para la transformación de la biomasa.

Palabras clave: biorefinería, celulosa, hemicelulosa, lignina, moléculas plataforma.

Abstract: Lignocellulosic biomass is a renewable raw material that will help to reduce dependence on fossil raw materials. In order to take advantage of the biomass it is necessary to apply biological and thermochemical processes to access its main components. From the main components, platform molecules can be produced which serve as raw material to obtain chemical products of industrial interest. This contribution presents the possibilities of lignocellulosic biomass as a raw material to produce fuels and chemical products. The paper is intended to serve as an introductory document for the study of processes for the transformation of biomass.

Keywords: biorefinery, cellulose, hemicellulose, lignin, platform chemicals.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual tiene en los recursos fósiles (*i.e.* carbón, petróleo y gas natural) la materia prima dominante para la producción de combustibles y para la obtención de productos químicos útiles en diversas industrias (*i.e.* farmacéuticas, pigmentos, polímeros, etc.).^[1,2] Además, la sociedad actual presenta como uno de sus principales problemas el elevado consumo energético y la dependencia de los recursos fósiles para satisfacer esta demanda.

La dependencia de los recursos fósiles es una problemática que puede ser analizada desde dos puntos de vista:

1. El económico, si se considera que son recursos cuya extracción cada vez es más complicada y además está previsto que sus reservas disminuyan con el paso de los años, incrementando su precio.^[3]
2. El ambiental, ya que existe la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que producen un efecto perjudicial sobre el clima.^[4]

En la actualidad el consumo de combustibles derivados de fuentes fósiles es una de las mayores fuentes generadoras de CO₂, representando para el caso del sector transporte un 23% de las emisiones mundiales. Además, se estima que el uso de energía y las emisiones de CO₂ provenientes del sector transporte se incrementen en un 80% hacia el año 2030 con respecto a los niveles actuales.^[5]

Diversos factores como la creciente demanda mundial de energía, la acumulación atmosférica de CO₂ y el consecuente aumento del efecto invernadero, las fluctuaciones de precios, la disminución de las reservas, las dificultades para explotar las reservas existentes, así como las nuevas legislaciones, han estimulado la búsqueda de materias primas alternativas impulsando la transición hacia una sociedad más sostenible basada en las materias primas y energías renovables.^[6,7]

Considerando lo antes mencionado y teniendo en cuenta una visión de desarrollo sostenible desde hace varios años se están orientando recursos al desarrollo e implementación de tecnologías productoras de energía mediante fuentes renovables (*i.e.* biomasa, solar, eólica, geotérmica, etc.).^[7,8] Así como también al desarrollo de procesos para la producción de combustibles y/o productos químicos a partir de materias primas de origen renovable (*i.e.* biomasa de tipo lignocelulósica).^[9,10]

Dentro de las fuentes de materias primas renovables la biomasa lignocelulósica (biomasa vegetal) se presenta como una de las más promisorias para disminuir la dependencia de los recursos fósiles, ya que es la única fuente en la tierra que contiene carbono e hidrogeno combinados, y a partir de ésta se puede obtener energía, combustibles y productos químicos (Figura 1).



M. Chávez-Sifontes

Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Naturales y Matemática
Escuela de Química
Final de Av. Mártires y Héroes del 30 Julio
San Salvador (El Salvador)
C-e: marvin.chavez@ues.edu.sv

Recibido: 23/01/2019. Aceptado: 25/09/2019.



Figura 1. Representación de un ciclo sostenible para la transformación biomasa lignocelulósica en productos químicos, combustibles y energía

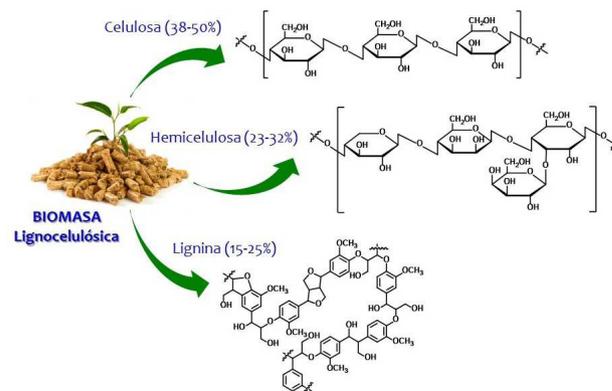


Figura 2. Biopolímeros que componen la biomasa lignocelulósica y los porcentajes comúnmente encontrados en la madera

De acuerdo con el concepto de biorefinería a partir de la biomasa podemos producir combustibles y productos químicos mediante un ciclo sostenible con un balance cero –o muy cercano a cero– con respecto al carbono, permitiendo así el desarrollo de una economía ambientalmente sostenible.^[11,12] Según datos estadísticos, ya en 2012 la biomasa representaba el 75% de la contribución de todas las fuentes energéticas de tipo renovable y se estima que tiene el potencial de cubrir el 25% de la demanda energética mundial en el año 2035.^[13]

La biomasa lignocelulósica es generada a partir del proceso de fotosíntesis que implica la combinación de CO₂ y H₂O utilizando la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar como fuente de energía, los productos primarios de este proceso son azúcares (*i.e.* C5-C6) con la subsecuente producción de O₂ como sub-producto.

La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 2), la composición y/o distribución de estos componentes varía dependiendo del tipo de planta. Por ejemplo, en el caso de madera los porcentajes comúnmente encontrados, son: 38-50% celulosa, 23-32% hemicelulosa y 15-25% lignina. La celulosa es un polisacárido lineal formado fundamentalmente por unidades de D-glucosa unidas a través de enlaces glicosídicos tipo β-1,4 y la hemicelulosa es un copolímero amorfo y ramificado que contiene unidades de glucosa, xilosa, galactosa y arabinosa. Estas cadenas de polisacáridos están protegidas mediante una envoltura de lignina, un biopolímero que está constituido por tres principales unidades básicas del tipo fenil-propano: alcohol *p*-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico.^[14,15]

Además de éstos componentes las plantas también son capaces de elaborar productos o componentes secundarios los cuales son particulares de cada especie de planta, entre ellos: ácidos grasos, alcaloides, terpenos, esteroides, etc.

La idea de utilizar biomasa lignocelulósica para la producción de productos químicos no es nueva, ya durante la década de 1930 William Jay Hale desarrolló la idea del aprovechamiento de los carbohidratos de origen

agroindustrial como materia prima para la obtención productos comerciales (*i.e.* plásticos, pinturas, gasohol, etc.), acuñando el término *chemurgy*. William J. Hale intentaba destacar como gracias a la relación entre química y agricultura ésta última dejaría de ser vista como una simple abastecedora de alimentos para el hombre y sería considerada como una potencial fuente para la obtención de una amplia gama de compuestos químicos para suplir diversas necesidades.^[16,17] Se estima que aproximadamente un 10% de los productos químicos orgánicos son producidos a partir de biomasa, siendo la mayor parte compuestos de elevado peso molecular, como: oleo-químicos, ésteres derivados de celulosa, etc. Aunque el desarrollo de nuevos procesos ha permitido avanzar hacia la obtención de compuestos químicos de base (*bulk chemicals*) de menor peso molecular, como: etanol, ácido acético, acetato de etilo, furfural, etc.^[18]

Mediante el presente artículo se pretende dar una visión general sobre las potencialidades de la biomasa lignocelulósica como fuente renovable de materias primas para la producción de combustibles y/o compuestos químicos de interés industrial. El documento ha sido escrito con el objetivo de introducir al lector en el área de investigación sobre el aprovechamiento de la biomasa y de los distintos procesos químicos que pueden ser desarrollados. Se presentan una amplia serie de referencias que ayudaran al lector para continuar profundizando sobre temas específicos relacionados con procesos catalíticos para el aprovechamiento de la biomasa.

BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE LA BIOMASA

En las últimas décadas han sido desarrollados distintos proyectos de investigación orientados a incentivar el aprovechamiento de la biomasa, los cuales ha conseguido aplicar y poner en marcha una variada gama de procesos industriales. La mayor parte de estos procesos han sido orientados a la producción de biocombustibles; actualmente, podemos establecer una clasificación en generaciones dependiendo de la antigüedad y complejidad de

los procesos para su producción: biocombustibles de 1.^{ra}, 2.^{da}, 3.^{ra} y 4.^{ta} generación.^[19]

Los biocombustibles de 1.^{ra} generación son producidos empleando procesos como: la fermentación de azúcares y/o carbohidratos, la *trans*-esterificación de aceites y grasas, y la digestión anaerobia para el caso de los desperdicios orgánicos. Mediante éstos procesos se obtiene a partir de azúcares: etanol, metanol y *n*-butanol, a partir de los aceites vegetales y grasas: biodiesel; y a partir de los residuos orgánicos: bio-gas. Las ventajas de éstos biocombustibles son la relativa facilidad de procesamiento, sus bajos niveles en emisiones de gases de efecto invernadero. Pero, presentan como principal desventaja el desvío de cultivos alimenticios (*i.e.* caña de azúcar y maíz) hacia la producción de vectores energéticos.^[20,21]

Para superar la principal desventaja que presentan los biocombustibles de 1.^{ra} generación, han sido desarrollados procesos para la obtención de biocombustibles de 2.^{da} generación cuyos insumos son residuos agrícolas y forestales (*i.e.* bagazo de caña de azúcar, rastrojos de maíz, paja de trigo, serrín, hojas y ramas secas de árboles, etc.), éstos materiales están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad mayor que los procesos de 1.^{ra} generación, se puede citar el proceso de sacarificación/fermentación utilizado principalmente para la producción a gran escala de etanol y *n*-butanol, y el proceso Fischer-Tropsch. El proceso *Fischer-Tropsch* se basa en la producción de gas de síntesis –mezcla de CO + H₂–, para posteriormente mediante procesos catalíticos sintetizar combustibles líquidos, como: el etanol o hidrocarburos en el rango de la gasolina.^[22,23]

La ventaja principal de los biocombustibles de 2.^{da} generación es que no se producen desviaciones de cultivos alimenticios hacia el sector energético. Sin embargo, su mayor desventaja es la escasa aportación en relación a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, cuando se compara el procesado de los insumos con respecto al procesado de los insumos de los biocombustibles de 1.^{ra} generación.^[20,21]

En años recientes encontramos nuevos desarrollos para la producción de biocombustibles denominados de 3.^{ra} generación, las materias primas en este caso son cultivos

no alimenticios de crecimiento rápido y con una elevada densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estas especies vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas. En general, la mayoría de los procesos para la obtención de biocombustibles de 3.^{ra} generación se encuentran en fase de investigación y desarrollo. Las ventajas de éstos biocombustibles son el secuestro de CO₂ para la producción de los insumos y un balance en economía de emisión de gases de efecto invernadero. presentan incluso como ventaja la utilización de tierras con suelos pobres en nutrientes debido a los bajos requerimientos nutricionales de algunas especies de cultivos energéticos.^[24]

Finalmente, existe una 4.^{ta} generación de biocombustibles los cuales son producidos mediante el uso de bacterias genéticamente modificadas que emplean dióxido de carbono u otra fuente de carbono como materia prima. A diferencia de las generaciones previas en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados para realizar alguna etapa de los procesos, para esta 4.^{ta} generación de biocombustibles la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción. Actualmente, esta generación de biocombustibles se encuentra en fase de investigación, ya que implica desarrollar tecnologías que involucren la optimización de dispositivos y sistemas biológicos para producir biocombustibles de alta calidad (*i.e.* diseño y modificación genética de sistemas biológicos naturales).^[25]

En la Figura 3 se presenta un resumen de las principales características de las cuatro generaciones de biocombustibles obtenidos a partir de la biomasa.

PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA

Además de la producción de biocombustibles existe también un interés por parte de la comunidad científica y del sector industrial para el desarrollo de nuevos procesos de valorización de la biomasa y obtener productos químicos con aplicaciones industriales. Así, después de un tratamiento primario de la biomasa se pueden obtener una gran variedad de mezclas de productos (*i.e.* azúcares vía



Figura 3. Principales características de las generaciones de biocombustibles.^[26]

hidrólisis o aceites vía pirólisis) y también productos de especial interés vía procesos fermentativos y de hidrólisis (*i.e.* ácido succínico, ácido levulínico, derivados furánicos, entre otros).

Los procesos de transformación de biomasa lignocelulósica pueden clasificarse en procesos primarios y secundarios (*downstream processes*). Los procesos primarios tratan la biomasa o sus distintas fracciones obteniéndose como productos intermedios mezclas de compuestos de interés. Estos intermedios son posteriormente procesados, es decir mejorados y aislados mediante procesos secundarios para así obtener los productos finales. Mientras que los procesos primarios de tratamiento de biomasa se encuentran en un estadio muy avanzado de desarrollo y aplicación a nivel industrial, los procesos secundarios en cambio tienen un menor grado de avance siendo la mayoría de ellos procesos adaptados de la industria del refino del petróleo.

Diferentes procesos primarios han sido utilizados para la transformación de biomasa lignocelulósica, entre ellos: tecnologías fermentativas o de bioconversión,^[27,28] gasificación a elevada temperatura,^[29] pirólisis térmica y/o catalítica,^[30] licuefacción^[31] y otros procesos catalíticos.^[32,33] (Ver Figura 4).

Como puede observarse en la Figura 4 entre los procesos primarios para el procesado de la biomasa destacan, la gasificación proceso mediante el cual se obtiene una mezcla de gases denominada *syn gas* o gas de síntesis mayoritariamente compuesto por CO e H₂, de manera análoga al *syn gas* obtenido mediante gasificación de carbón. Este gas de síntesis puede ser convertido a combustibles líquidos o compuestos químicos plataforma mediante procesos con tecnologías muy bien establecidas, por ejemplo: *Fischer-Tropsch* o síntesis de metanol. Sin embargo, además de las aplicaciones mencionadas ha sido reportado una intere-

sante alternativa al uso del gas de síntesis o bien mezclas de CO₂ + H₂ como materia prima en procesos para la producción de compuestos químicos mediante fermentación microbiana, una tecnología que está iniciando a comercializarse por, *inter alia*, Lanzatech y Coskata.^[34]

La conversión hidrolítica de la biomasa lignocelulósica es otro de los procesos primarios mostrados en la Figura 4, este puede llevarse a cabo mediante catálisis homogénea con ácidos minerales a elevadas temperaturas o bien mediante catálisis enzimática a temperaturas moderadas. En el primero de los casos son formadas cantidades significativas de residuos inorgánicos como resultado de la neutralización del ácido mineral (*i.e.* cloruros o sulfatos), debido a lo anterior se están centrando esfuerzos en la investigación para el desarrollo de catalizadores ácidos de tipo heterogéneos. En el caso de hidrólisis enzimática suele necesitarse un pre-tratamiento del material mediante vapor de agua o mediante amoníaco para abrir las redes de la estructura lignocelulósica y exponer los enlaces glicosídicos al ataque de las enzimas.

Pueden considerarse tres tipos de estrategias como potencialmente aplicables para la transformación de la biomasa lignocelulósica:^[35] 1) de biomasa a productos a través de moléculas degradadas tipo C1-C3 (*i.e.* procesos termoquímicos: gasificación y/o pirólisis),^[36,37] 2) de biomasa a productos a través de moléculas plataforma tipo C5-C8, el concepto de biorefinería (*i.e.* proceso de despolimerización seguido de procesos catalíticos para obtener moléculas plataforma)^[38-40] y 3) de biomasa a productos a través de reacciones en cascadas *one-pot* (*i.e.* combinación de proceso de despolimerización con procesos catalíticos para obtener productos químicos).^[41-43]

Los procesos industriales que han sido desarrollados y optimizados para producir hidrocarburos y compuestos

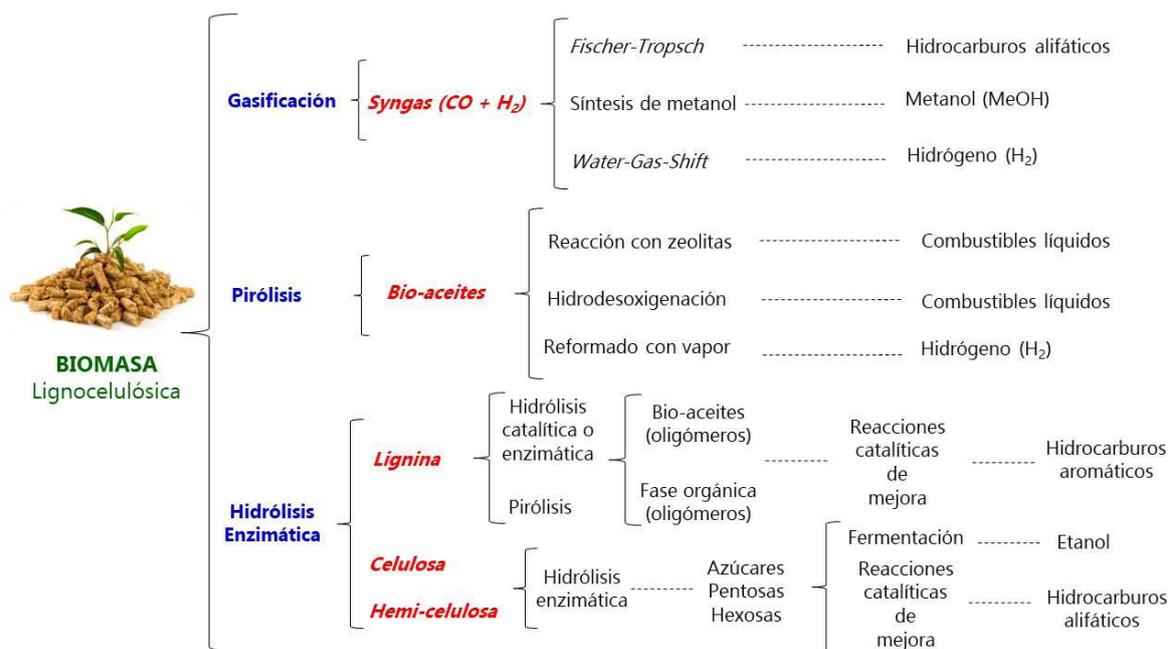


Figura 4. Diversos procesos para la transformación de biomasa lignocelulósica y posibles productos a obtener a partir de las distintas fracciones

químicos a partir de fracciones del petróleo no son adecuados para la transformación de fracciones orgánicas derivadas de la biomasa debido a que éstas últimas contienen compuestos altamente funcionalizados. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar procesos catalíticos para producir combustibles y productos químicos a partir de fracciones orgánicas derivadas de la biomasa.

EL CONCEPTO DE BIOREFINERÍA

El concepto general de biorefinería ha ido evolucionando desde una planta para la producción de etanol mediante el procesado de un tipo de biomasa hasta concebirse como una instalación industrial capaz de procesar distintos tipos de biomasa (*i.e.* madera, pastos, etc.), separar sus componentes principales y aplicar distintos procesos (*i.e.* térmicos, biológicos y/o catalíticos) para convertirlos en productos de mayor valor: energía, combustibles y productos químicos.^[44,45]

Una clasificación general permite identificar tres tipos de biorefinerías, el primero produce etanol vía fermentación de carbohidratos provenientes de maíz, trigo o caña de azúcar como materia prima. El segundo tipo utiliza los mismos tipos de materia prima, pero apunta a la producción de una gama más amplia de productos de mayor valor. El tercer tipo de biorefinerías utiliza como materia prima fracciones de biomasa (*i.e.* celulosa, hemicelulosa y lignina) para la producción de productos químicos y combustibles avanzados.^[46]

Existe una clasificación más específica que permite identificar distintos tipos de biorefinería de acuerdo con aspectos como, la materia prima utilizada (*i.e.* biorefinería de cultivo completo, biorefinería lignocelulósica y bio-

refinería marina), el tipo de tecnología (*i.e.* biorefinería termoquímica o biorefinería biológica) y la madurez de la tecnología (*i.e.* biorefinerías de primera o segunda generación).

En una biorefinería típica se emplean diversos procedimientos para fraccionar la biomasa y convertir sus componentes en productos de mayor valor (Figura 5). Estos procesos se pueden clasificar en cuatro diferentes grupos: mecánicos (*i.e.* fraccionamiento, prensado y reducción del tamaño), bioquímicos (*i.e.* fermentación y conversión enzimática), térmicos (*i.e.* gasificación y pirólisis) y químicos (*i.e.* hidrólisis ácida y esterificación).^[47]

Actualmente se está tratando de orientar el diseño de planta de las biorefinerías de manera análoga al diseño de las plantas petroquímicas, de manera que puedan aprovecharse las distintas fracciones de la biomasa lignocelulósica para producir combustibles en una de las líneas y productos químicos y/o polímeros en otra de las líneas.^[48,49] Como primera etapa de los procesos para este tipo de biorefinería encontramos el pretratamiento de la biomasa, esta etapa es muy importante ya que involucra tratamientos físicos (*i.e.* reducción del tamaño de partícula), termo-químicos (*i.e.* hidrólisis ácida) y/o bioquímicos (*i.e.* hidrólisis enzimática).^[50] El objetivo es separar los componentes principales del material de partida (*i.e.* celulosa, hemicelulosa y lignina) para continuar en planta con las distintas líneas de procesamiento y transformación.^[15,51]

Según Wyman C. *et al.*,^[52,53] las características más importantes a considerar para un proceso de pretratamiento de biomasa, son: 1) reactivos químicos de bajo costo, 2) mínima generación de residuos, 3) reacciones rápidas y reactivos no corrosivos para minimizar costos de mantenimiento de los reactores, 4) buenos rendimientos en la

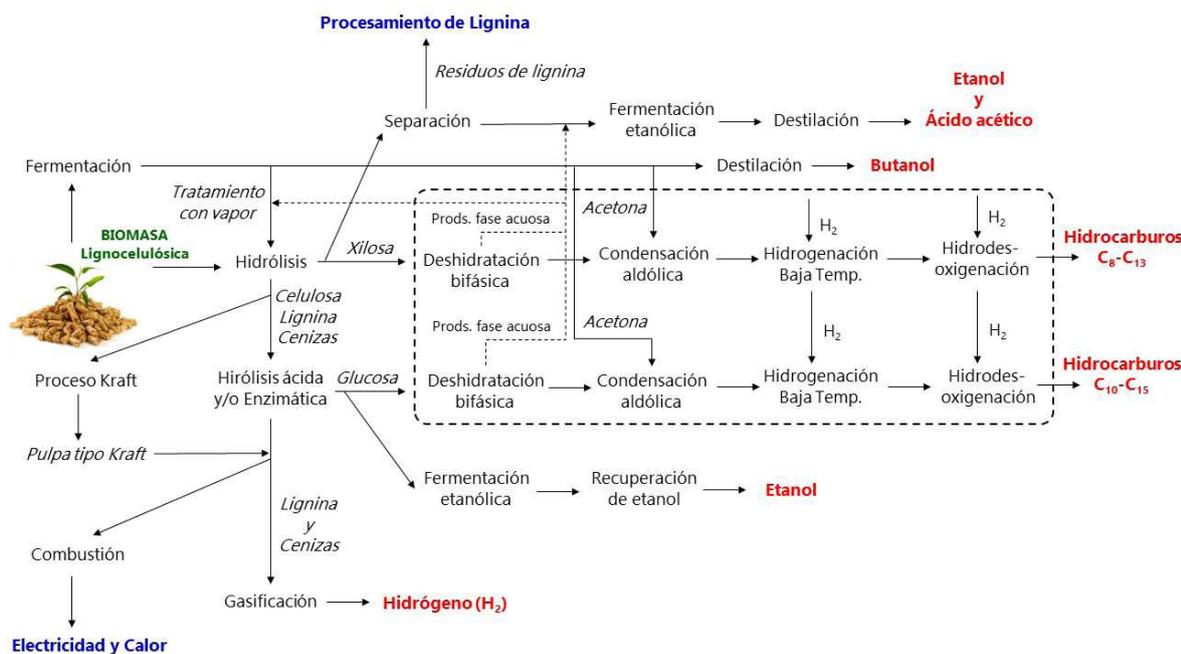


Figura 5. Esquema básico de una biorefinería para procesar biomasa lignocelulósica.^[44,45]

etapa de hidrólisis ácida para minimizar los costos de la etapa enzimática, 5) facilitar la recuperación de la lignina como otra fracción valorable.

Para el pretratamiento de la biomasa han sido empleados diferentes disolventes, entre ellos: H₂O₂, etilenglicol, dioxano, etc., pero resultan demasiado costosos para un proceso a escala industrial. Por lo que, en función de la relación costo/efectividad resultan más viables, el pretratamiento con vapor de agua, el pretratamiento con ácido diluido o el pretratamiento con bases (NH₃ o Ca(OH)₂).^[51]

Para una ampliación sobre los procesos de pretratamiento de biomasa, estudio de condiciones de operación, ventajas, desventajas y mecanismos de acción, se recomiendan los trabajos de Akhtar N. *et al.*,^[54] Oh Y., *et al.*^[55] y Kim J., *et al.*^[56]

Una vez se lleva a cabo la etapa de pretratamiento cada una de las fracciones obtenidas (*i.e.* celulosa, hemicelulosa y lignina) pueden ser sometidas a procesos fermentativos y/o catalíticos para su transformación en compuestos químicos de interés. Estas transformaciones pueden dar lugar a productos con aplicación directa, como es el caso de los biocombustibles y en particular del etanol, o pueden generar una serie de compuestos intermedios o moléculas plataforma (*i.e.* compuestos furánicos, compuestos fenólicos, etc.) que constituyen la materia prima para procesos de producción de compuestos químicos con interesantes aplicaciones industriales.

PRODUCTOS QUÍMICOS A PARTIR DE LA BIOMASA

Un compuesto químico plataforma –*chemical building block*– es una molécula que puede ser convertida en productos químicos intermedios o productos finales, cuando esta molécula

se obtiene a partir de la biomasa es conocida como biocompuesto químico plataforma –*bio-based chemical building block*–. Estos biocompuestos se pueden clasificar en dos tipos: 1) los que son idénticos a sus equivalentes de origen petroquímico y 2) los que son completamente nuevos y con características propias. El primer tipo de biocompuestos puede ser utilizado directamente y transformado mediante la infraestructura y procesos industriales existentes, mientras que el segundo tipo de biocompuestos supone el desarrollo de nuevos procesos industriales para su transformación en productos de utilidad. Los mercados más grandes para los biocompuestos químicos plataforma son la producción de polímeros, lubricantes, disolventes y fármacos.

En los años 2004 y 2007 el Departamento de Energía de los Estados Unidos (US-DOE) presentó dos reportes en los cuales identificaba una serie de biocompuestos químicos plataforma, así como también los procesos y tecnologías necesarias para su producción a partir de carbohidratos obtenidos de fuentes renovables. Además, en estos documentos se describe como la conversión de éstos biocompuestos químicos plataforma abre la puerta hacia la producción de una amplia gama de productos químicos secundarios los que pueden ser incorporados en formulaciones de surfactantes, resinas, polímeros, adhesivos, etc.^[57,58]

Las fracciones de celulosa y hemicelulosa son sometidas a procesos de hidrólisis ácida obteniendo así un grupo de azúcares (*i.e.* glucosa, fructosa, xilosa, arabinosa) a partir de las cuales y mediante la aplicación de diversos procesos químicos y/o biológicos pueden ser obtenidos una gran variedad de compuestos plataforma entre los que destacan: ácido levulínico, sorbitol, ácido glucónico y principalmente derivados furánicos, como: furfural y 5-hidroxi metilfurfural, según se muestra en la Figura 6.^[57]

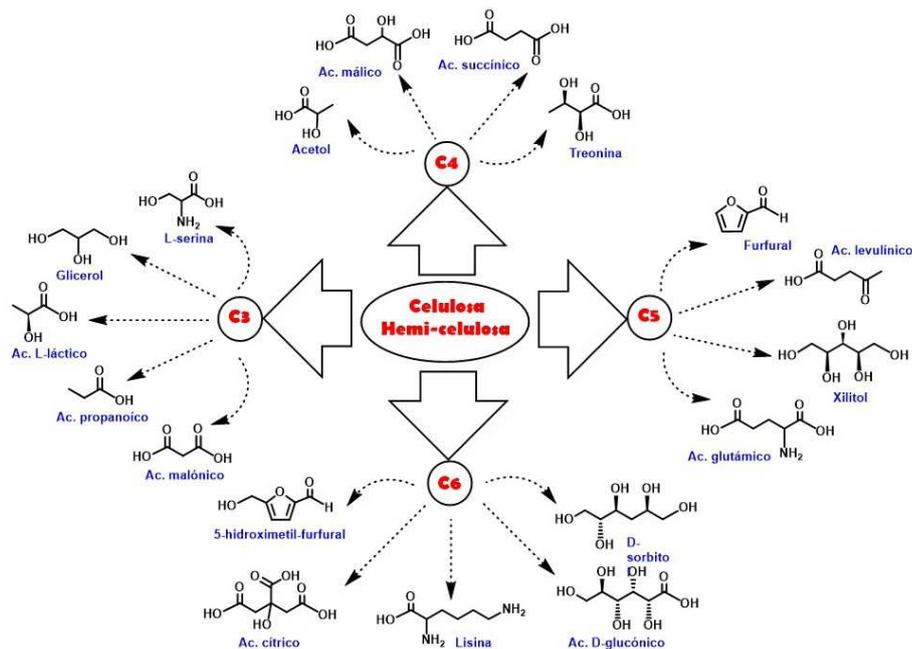


Figura 6. Esquema representativo de la variedad de compuestos que pueden ser obtenidos a partir de fracciones de celulosa y hemicelulosa.^[58]

Diversos autores han escrito revisiones en las que se describen y detallan una variedad de procesos para la transformación de estos compuestos, en dichas revisiones destacan procesos primarios como la hidrólisis y deshidratación de los carbohidratos, además de procesos secundarios específicos como el reformado, condensaciones aldólicas, hidrogenación o hidrodeseoxigenación. La combinación de los distintos tipos de procesos dependerá de los compuestos finales que se deseen obtener.^[10,35,38,59]

La lignina es otra de las fracciones que representa una fuente potencialmente valiosa para la obtención de compuestos químicos de tipo aromático.^[58] Actualmente hay un interés en distintos procesos para la fragmentación de lignina (*i.e.* biológicos y catalíticos: despolimerización e hidrodeseoxigenación) y producir combustibles y/o productos químicos aromáticos tipo fenoles, catecoles, etc., así como se destaca en distintos artículos de revisión sobre el tema.^[60-65]

En la Figura 7 se presenta un resumen de los procesos y transformaciones a las cuales puede ser sometida la lignina con el objetivo de producir compuestos químicos de mayor valor.

Además, la lignina presenta aplicaciones directas como es el caso de los lignosulfonatos polímeros aniónicos solubles agua que son obtenidos como subproducto en la producción de pulpa de celulosa mediante el proceso de sulfito, estos son utilizados como dispersantes de pesticidas, emulsificantes y secuestradores de metales pesados. La lignina puede ser utilizada como copolímero en polímeros tipo poliolefinas-lignina, poliésteres-lignina, poliuretanos-lignina, etc. Así también, la lignina puede modificarse químicamente (*i.e.* fenolización, desmetilación, etc.) y formar parte en formulaciones para mejorar las propiedades de desempeño de resinas o adhesivos.^[60,62,66]

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En décadas recientes ha habido un mayor impulso hacia la transición desde una industria y economía basadas en materias primas no renovables (*i.e.* fuentes fósiles) hacia las fuentes de materias primas renovables.

La idea para la sustitución de las fuentes fósiles por fuentes renovables está enmarcada dentro de uno de los objetivos de la Química Verde,^[67] filosofía que ha atraído el interés tanto de la comunidad científica como de la industria. Por lo que actualmente se encuentra considerado como una de las líneas prioritarias de investigación de cara a un desarrollo sostenible.

El presente artículo muestra un panorama general sobre la alternativa que se plantea a través del aprovechamiento de la biomasa mediante la aplicación de distintos tipos de procesos químicos para la obtención de productos de interés industrial.^[68,69] Dentro de las fuentes renovables de materias primas destaca la biomasa lignocelulósica ya que es la única a partir de la cual se puede producir energía y además se pueden obtener fracciones orgánicas que servirán como materia prima para la producción de combustibles y de compuestos químicos con aplicaciones a nivel industrial.

Cabe destacar que para transformar materias primas como la biomasa lignocelulósica se necesita desarrollar procesos catalíticos eficientes (*i.e.* buenas conversiones y selectividades), de preferencia estos procesos deben involucrar catalizadores de tipo heterogéneo. Estos materiales deben ser activos y estables en fase acuosa, ya que los procesos primarios para transformar la biomasa implican el uso de agua como disolvente.^[70,71]

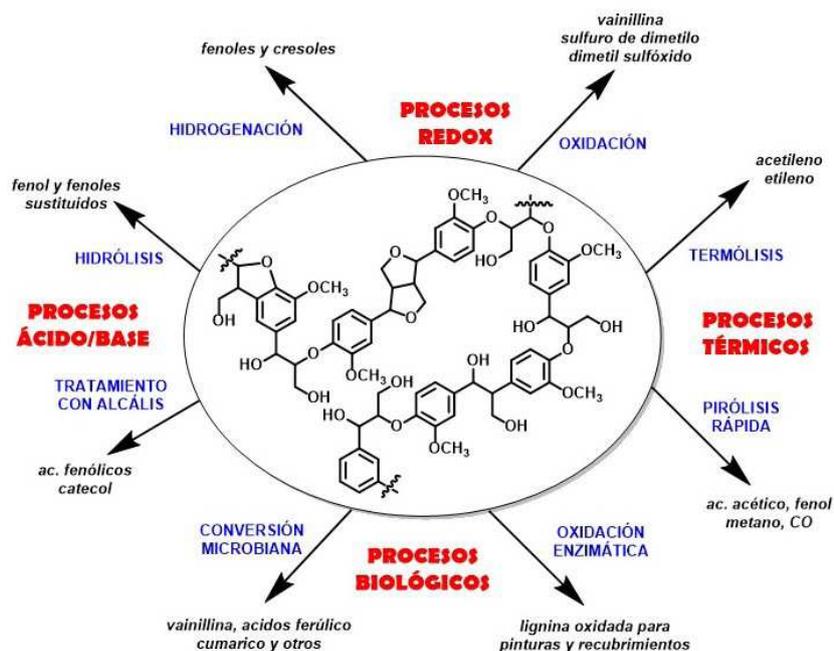


Figura 7. Esquema representativo de los diferentes procesos para transformar la lignina en compuestos químicos de interés.^[68]

Además, se debe tener en consideración que dichos procesos generen la menor cantidad de residuos en relación a la cantidad de productos (factor E).^[72,73]

Lo anterior será lo que permita e impulse la integración de los nuevos procesos con los ya existentes, así como también la progresiva sustitución de los métodos de producción antiguos por métodos de producción alternativos.

Es necesario remarcar que a pesar de las notables perspectivas para la producción de combustibles y productos químicos a partir de la biomasa lignocelulósica, actualmente los procesos que se emplean poseen ciertas limitaciones técnicas, por lo que es necesario continuar con la investigación y el desarrollo de nuevas metodologías industriales que operen con una elevada eficiencia para ser competitivos (*i.e.* procesos catalíticos, enzimáticos, o combinados).

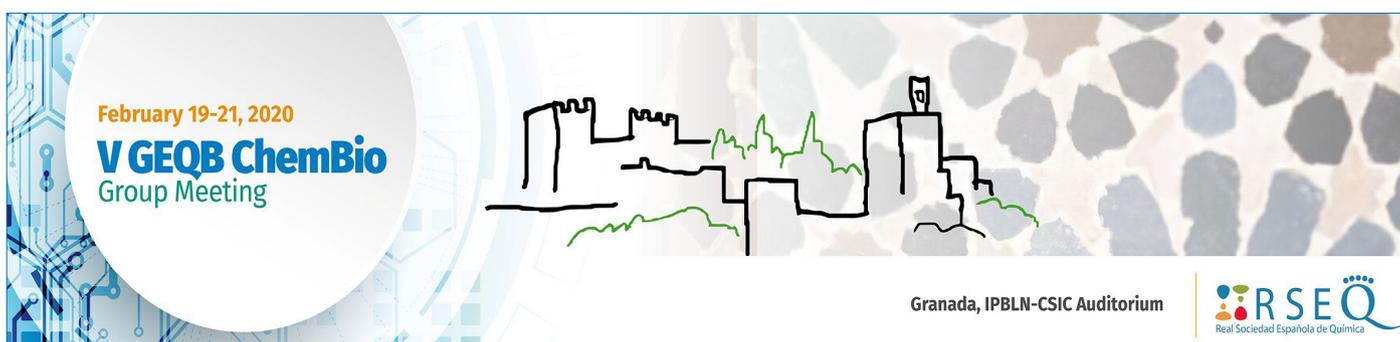
AGRADECIMIENTOS

M. C-S. agradece a la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática por el financiamiento proporcionado y al ITQ-UPV/CSIC por las facilidades prestadas para realizar una estancia durante octubre/diciembre de 2018.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Matar, S.; Hatch, L. F. *Chemistry of Petrochemical Processes*, 2nd Ed.; Elsevier Inc., 2001.
- [2] Fahim, M.; Taher, A.-S.; Amal, E. *Fundamentals of Petroleum Refining*, 1st Ed.; Elsevier Science, 2009.
- [3] Shafiee, S.; Topal, E. *Energy Policy* **2009**, *37* (1), 181-189.
- [4] Greenhouse Gas (GHG) Emissions <https://www.epa.gov/ghgemissions> (accessed Sep 20, 2018).
- [5] Saboori, B.; Sapri, M.; bin Baba, M. *Energy* **2014**, *66*, 150-161.
- [6] Poliakoff, M.; Licence, P. *Nature* **2007**, *450* (December), 810-812.
- [7] Panwar, N. L.; Kaushik, S. C.; Kothari, S. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15* (3), 1513-1524.
- [8] Hussain, A.; Arif, S. M.; Aslam, M. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *71* (January), 12-28.
- [9] Huber, G. W.; Sara, I.; Corma, A. *Chem Rev.* **2006**, *2* (106), 4044-4098.
- [10] Corma, A.; Iborra, S.; Velty, A. *Chem. Rev.* **2007**, *107* (6), 2411-2502.
- [11] Bisaria, V. S.; Kondo, A. *Bioprocessing of Renewable Resources to Commodity Bioproducts*; Bisaria, V. S., Kondo, A., Eds.; John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [12] Gupta, V. G.; Tuohy, M.; Kubicek, C. P.; Saddler, J.; Xu, F. *Bioenergy Research: Advances and Applications*; Gupta, V. G., Tuohy, M., Kubicek, C. P., Saddler, J., Xu, F., Eds.; Elsevier B.V., 2014.
- [13] Kopetz, H. *Nature* **2013**, *493* (7435), 29-31.
- [14] Bajpai, P. *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*; Springer Singapore, 2016.
- [15] Lange, J.; Solutions, S. G. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* **2007**, *1*, 39-48.
- [16] Elliott, D. C. *Encyclopedia of Energy*; Elsevier Inc., 2004; pp 163-174.
- [17] Caes, B. R.; Teixeira, R. E.; Knapp, K. G.; Raines, R. T. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2015**, *3* (11), 2591-2605.
- [18] Kircher, M. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **2015**, *29*, 26-31.
- [19] Dutta, K.; Daverey, A.; Lin, J. G. *Renew. Energy* **2014**, *69*, 114-122.
- [20] Demirbas, A. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2007**, *33* (1), 1-18.
- [21] Naik, S. N.; Goud, V. V.; Rout, P. K.; Dalai, A. K. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, *14* (2), 578-597.
- [22] Nguyen, N.; Yegiyants, S.; Kaloostian, C.; Abbas, M. A.; DiFronzo, L. A.; Dry, M. E. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2002**, *77* (1), 43-50.
- [23] Van Steen, E.; Claeys, M. *Chem. Eng. Technol.* **2008**, *31* (5), 655-666.
- [24] Ho, D. P.; Ngo, H. H.; Guo, W. *Bioresour. Technol.* **2014**, *169*, 742-749.
- [25] Aro, E. M. *Ambio* **2016**, *45* (1), 24-31.
- [26] Sikarwar, V. S.; Zhao, M.; Fennell, P. S.; Shah, N.; Anthony, E. *J. Prog. Energy Combust. Sci.* **2017**, *61*, 189-248.
- [27] Brethauer, S.; Studer, M. H. *Chimia (Aarau)*. **2015**, *69* (10), 572-581.
- [28] Monlau, F.; Sambusiti, C.; Ficara, E.; Aboulkas, A.; Barakat, A.; Carrère, H. *Energy Environ. Sci.* **2015**, *5*, 2600-2621.
- [29] Molino, A.; Chianese, S.; Musmarra, D. *J. Energy Chem.* **2016**, *25* (1), 10-25.
- [30] Carpenter, D.; Westover, T. L.; Czernik, S.; Jablonski, W. *Green Chem.* **2014**, *16* (2), 384-406.
- [31] Elliott, D. C.; Biller, P.; Ross, A. B.; Schmidt, A. J.; Jones, S. B. *Bioresour. Technol.* **2015**, *178*, 147-156.
- [32] Ennaert, T.; Van Aelst, J.; Dijkmans, J.; De Clercq, R.; Schutyser, W.; Dusselier, M.; Verboeckend, D.; Sels, B. F. *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45* (3), 584-611.
- [33] Bhanja, P.; Bhaumik, A. *Fuel* **2016**, *185*, 432-441.
- [34] Sheldon, R. A.; Sheldon, R. *Green Chem.* **2014**, *16*, 950-963.
- [35] Gallezot, P. *Catal. Today* **2007**, *121* (1-2), 76-91.
- [36] Baus, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory*; Elsevier Inc., 2010.
- [37] Brown, R. C. *Thermochemical Processing of Biomass. Conversion into Fuels, Chemicals and Power*; Brown, R. C., Ed.; John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [38] Serrano-Ruiz, J. C.; Luque, R.; Sepúlveda-Escribano, A. *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40* (11), 5266-5281.
- [39] Climent, M. J.; Corma, A.; Iborra, S. *Green Chem.* **2014**, *16* (2), 516-547.
- [40] Saha, B.; Fan, M.; Wang, J. *Sustainable Catalytic Processes*; Saha, B., Fan, M., Wang, J., Eds.; Elsevier B.V., 2015.
- [41] Li, H.; Bhadury, P. S.; Riisager, A.; Yang, S. *Catal. Sci. Technol.* **2014**, *4* (12), 4138-4168.
- [42] Luterbacher, J. S.; Martin Alonso, D.; Dumesic, J. A. *Green Chem.* **2014**, *16* (12), 4816-4838.
- [43] Xia, Q.; Chen, Z.; Shao, Y.; Gong, X.; Wang, H.; Liu, X.; Parker, S. F.; Han, X.; Yang, S.; Wang, Y. *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 11162.
- [44] Cherubini, F. *Energy Convers. Manag.* **2010**, *51* (7), 1412-1421.
- [45] Xing, R.; Subrahmanyam, A. V.; Olcay, H.; Qi, W.; van Walsum, G. P.; Pendse, H.; Huber, G. W. *Green Chem.* **2010**, *12* (11), 1933-1946.

- [46] Luo, L.; van der Voet, E.; Huppel, G. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101* (13), 5023-5032.
- [47] Qureshi, N.; Hodge, D. B.; Vertès, A. A. *Biorefineries. Integrated Biochemical Processes for Liquid Biofuels*; Qureshi, N., Hodge, D. B., Vertès, A. A., Eds.; Elsevier B.V, 2014.
- [48] Maity, S. K. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *43*, 1427-1445.
- [49] Maity, S. K. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *43*, 1446-1466.
- [50] Galbe, M.; Zacchi, G. *Biomass and Bioenergy* **2012**, *46*, 70-78.
- [51] Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R.; Lee, Y. Y.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. *Bioresour. Technol.* **2005**, *96*, 673-686.
- [52] Wyman, C. E.; Dale, B. E.; Elander, R. T.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. R.; Lee, Y. Y. **2005**, *96*, 1959-1966.
- [53] Wyman, C. E.; Dale, B. E.; Elander, R. T.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. R.; Lee, Y. Y. **2005**, *96*, 2026-2032.
- [54] Akhtar, N.; Gupta, K.; Goyal, D.; Goyal, A. *Environ. Prog. Sustain. Energy* **2016**, *35* (2), 489-511.
- [55] Oh, Y. H.; Eom, I. Y.; Joo, J. C.; Yu, J. H.; Song, B. K.; Lee, S. H.; Hong, S. H.; Park, S. J. *Korean J. Chem. Eng.* **2015**, *32* (10), 1945-1959.
- [56] Kim, J. S.; Lee, Y. Y.; Kim, T. H. *Bioresour. Technol.* **2016**, *199*, 42-48.
- [57] Werpy, T.; Petersen, G. *Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I - Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*; 2004.
- [58] Bozell, J. J.; Holladay, J. E.; Johnson, D.; White, J. F. *Top Value-Added Chemicals from Biomass. Volume II - Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin*; 2007.
- [59] Chheda, J. N.; Huber, G. W.; Dumesic, J. A. *Angew. Chemie - Int. Ed.* **2007**, *46* (38), 7164-7183.
- [60] Lora, J. H.; Glasser, W. G. *J. Polym. Environ.* **2002**, *10* (1), 39-48.
- [61] Stewart, D. *Ind. Crops Prod.* **2008**, *27* (2), 202-207.
- [62] Calvo-Flores, F. G.; Dobado, J. A. *ChemSusChem* **2010**, *3* (11), 1227-1235.
- [63] Doherty, W. O. S.; Mousavioun, P.; Fellows, C. M. *Ind. Crops Prod.* **2011**, *33* (2), 259-276.
- [64] Rinaldi, R.; Jastrzebski, R.; Clough, M. T.; Ralph, J.; Kennema, M.; Buijninx, P. C. A.; Weckhuysen, B. M. *Angew. Chemie - Int. Ed.* **2016**, *55* (29), 8164-8215.
- [65] Ventura, M.; Domine, M. E.; Chávez-Sifontes, M. *Curr. Catal.* **2019**, *8* (1), 20-40.
- [66] Gandini, A.; Belgacem, M. N. In *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*; Naceur Belgacem, M., Gandini, A., Eds.; Elsevier, 2008; p Chapter 11 (243-271).
- [67] Anastas, P. T.; Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*; Oxford University Press, 2000.
- [68] Luque, R. *An. Quím.* **2010**, *106* (4), 296-303.
- [69] Serrano-Ruiz, J. C.; Luque, R. *An. Quím.* **2011**, *107* (4), 383-389.
- [70] Hara, M.; Nakajima, K.; Kamata, K. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2015**, *16* (3), 034903.
- [71] Wu, K.; Wu, Y.; Chen, Y.; Chen, H.; Wang, J.; Yang, M. *ChemSusChem* **2016**, *9* (12), 1355-1385.
- [72] Sheldon, R. A. *Catal. Today* **2011**, *167* (1), 3-13.
- [73] Sheldon, R. A. *Chem Soc Rev* **2012**, *41* (4), 1437-1451.



February 19-21, 2020
VGEQB ChemBio
 Group Meeting

Granada, IPBLN-CSIC Auditorium

RSEQ
 Real Sociedad Española de Química