

# BIOCARBON PRODUCTION USING SOLID MATERIAL FROM THE AEROBIC-MICROBIOLOGICAL HYDROLISIS

## GENERACIÓN DE BIOCARBÓN A PARTIR DEL MATERIAL SÓLIDO EN LA HIDRÓLISIS AERÓBICO-MICROBIOLÓGICA

Mathias Schlegel, M.<sup>1</sup>; Bassel Ibrahim<sup>2</sup>; Kipping-Rössel, D.<sup>3\*</sup>; Ortiz-Laurel, H.<sup>4</sup>; Jozef Frasz<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universität Rostock, Agrar-und Umweltwissenschaftliche Fakultät, 18059 Rostock, Justus-von-Liebig Weg 6b, Deutschland, mathias.schlegel@uni-rostock.de. <sup>2</sup>Innovations-und Bildungszentrum e.V. Hohen Luckow, 18239 Hohen Luckow, Bützower Str. 1a, Deutschland, bassel.ibrahim@ibz-hl.de. <sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Iturbide No. 73, Salinas de Hgo., S.L.P., C.P. 78600. México. <sup>4</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, km 348, Carr. Fed. Córdoba-Veracruz, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. 94946. México, <sup>5</sup>Politechnika Poznanska, Katedra Nauk Ekonomicznych, 60-965 Poznan, Ul. Strzelecka 11, Polen, jozef.frasz@put.poznan.pl

\*Autor de correspondencia: edietmar@colpos.mx

### ABSTRACT

**Objective:** Exploring the effectiveness of two processing methods in sequential operation in order to increase the profitability of individual processes during biomass transformation and its wastes for obtaining other products.

**Design/methodology/approach:** Processes of hydrolysis and acidification are activated by the general process to obtain biogas, resulting in a highly acidic liquid biomass. The organic acids are removed through technical procedures to be utilized on other chemical processes. Leftover wastes contain few constituents able to be decomposed, and their appropriate disposal consumes resources, so they are processed through hydrothermal carbonization in order to obtain biocarbon.

**Results:** When vegetation biomass with high moisture content is exposed to high temperatures for hydrothermal carbonization, water evaporation takes place as well as a selective amount of some particles contained in the biomass. Leftover waste is a solid and hard material, with a high carbon concentration.

**Study limitations/limitations:** The technical process used to extract organic acids is slow, so the removal is partial and effectiveness is reduced.

**Findings/conclusions:** Integration of processes with sequential operation, where useful compounds are obtained and wastes produced from the first processing become raw material for the following process, originating hydrothermal carbonization, improve efficiency and attain financial profitability.

**Keywords:** innovation, carbonization, recycling, process wastes, plant biomass.

## RESUMEN

**Objetivo:** Explorar la efectividad de dos procesamientos en operación secuencial para incrementar la rentabilidad de los procesos individuales en la transformación de la biomasa y sus residuos para la obtención de productos.

**Diseño/metodología/aproximación:** Se activan los procedimientos de hidrólisis y ácido génesis del proceso general para producir biogás, en la que se obtiene una biomasa líquida muy ácida. Se rescatan los ácidos orgánicos mediante procedimientos técnicos para su utilización en otros procesos químicos. Los residuos resultantes contienen escasos elementos factibles de degradar y su apropiada disposición consume recursos, por lo que son sometidos al proceso de carbonización hidrotérmica, para obtener biocarbón.

**Resultados:** La biomasa vegetal con alto contenido de humedad al ser expuesta a altas temperaturas para el proceso de carbonización hidrotérmica, genera evaporación de agua y una porción selectiva de algunas partículas contenidas en esa biomasa. El residuo final es un material sólido y duro, con alta concentración de carbón.

**Limitaciones del estudio/implicaciones:** El proceso técnico de extraer los ácidos orgánicos es lento por lo que la separación es parcial y se reduce la efectividad.

**Hallazgos/conclusiones:** La integración de los procesamientos con el funcionamiento de manera secuencial, donde se obtiene compuestos útiles y se generan residuos del primer procesamiento se convierten en la materia prima del siguiente, derivando en la carbonización hidrotérmica, mejoran la eficiencia y alcanzan rentabilidad financiera.

**Palabras clave:** innovación, carbonización, reciclaje, residuos de proceso, biomasa vegetal.

aclarar que, la palabra "rentable" no significa totalmente que esa rentabilidad sea factor suficiente para la introducción del procesamiento en el mercado. Aunque puede ser que, su aplicación práctica sea más interesante, respecto al tipo de proceso, que igual, pueden avanzar en paralelo o en cadena, como sucede en la producción de biogás, donde además de éste se obtiene un biofertilizante del efluente, ya que cada uno por sí solo, no es rentable. En ese sentido, el propósito del presente trabajo es ofrecer un análisis de dos procesamientos, en los cuales, al conjuntar los valores particulares de cada uno de ellos, se logra la rentabilidad suficiente para su aplicación económica. Primeramente, se explora la factibilidad de un procesamiento a partir del cual se documenta sobre la generación de ácidos orgánicos a partir de una masa orgánica líquida. De esta etapa del procesamiento queda una masa restante. El segundo procesamiento, se refiere a la carbonización hidrotérmica, donde es posible utilizar esa masa restante como fuente de materia prima para la generación de "biocarbón".

## MATERIALES Y MÉTODOS

La ruta a seguir para la degradación microbológica de la basura orgánica en forma líquida (alta concentración de agua), que provienen de las ciudades, de la cosecha de los cultivos o de otros procesos, es la degradación aeróbica. La degradación aeróbica puede ser dividida en cuatro fases (Schlegel *et al.*, 2013); la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. La hidrólisis modifica los enlaces complejos del material inicial, por ejemplo, los hidratos de carbono, las proteínas y las grasas, en enlaces orgánicos simples, como; ácidos

## INTRODUCCIÓN

La utilización de la biomasa ha originado un interés muy particular, que se ha convertido en un material cotidiano, y actualmente juega un papel de mayor jerarquía en lo que respecta a la protección del medio ambiente (Autorenkollektiv, 2007). Primeramente, conviene recalcar conceptos de actualidad que influyen en el proceso de la recolección del material biológico, así como de los métodos para su apropiada integración en un proceso de reciclado para su reutilización como un biomaterial. Los productos obtenidos del reciclaje pueden ofrecer un mayor potencial, que en esencia puede vincularse como un efecto compensatorio a través de la generación de combustible biogás, o de la producción de biocarbón, en respuesta a las perjudiciales emisiones de carbono.

Para dar fluidez a estas nuevas rutas sobre la reutilización de la biomasa, se desarrollan a lo largo del trayecto procesos simultáneos. Esto es común, ya que la biomasa (por ejemplo, restos de alimentos, residuos de la cosecha de cultivos) se convierte en materia prima, que puede seguir dos caminos para su reutilización. Ambos considerados procesamientos simultáneos, caracterizados por ser afines a crear una competencia, que al final se solucionará al seleccionarse un solo camino, en función de su efectividad. Aquí conviene

amínicos, azúcares y ácidos grasos. Las bacterias hidrolíticas participantes liberan durante el proceso enzimas, las cuales realizan la degradación de la materia inicial de una manera bioquímica. Los subproductos generados ahí son modificados en la siguiente fase; denominada acidogénesis, mediante la generación de ácidos, donde las bacterias fermentativas (generadores del ácido) se cambian en ácidos bajos grasos, así como de dióxido de carbono e hidrógeno, incluso se encuentran masas pequeñas de ácidos lácticos y de alcoholes. La composición de los productos generados en esta fase depende de la concentración resultante del hidrógeno, el cual es generado durante el desarrollo del proceso. En la tercera fase; acetogénesis, la generación del ácido cítrico modifica los productos debido a las bacterias acetogéneas en pre productos del biogás. En esta fase es muy importante la presión parcial del hidrógeno. Un valor demasiado alto evita por razones energéticas, la transformación de pre productos de la acetogénesis, con el resultado de que los ácidos orgánicos de cadenas largas se multipliquen y se interfiera con la generación de metano. Las bacterias de la acetogénesis (generadoras del ácido cítrico) tienen que vivir en una asociación con los microorganismos metanogénicos, los cuales utilizan el hidrógeno. Estos últimos transforman el hidrógeno junto con el CO<sub>2</sub> en metano, por lo que, se deben mantener las condiciones necesarias del ambiente para facilitar la actividad de esas bacterias que generan el ácido cítrico. En la última fase de la generación del biogás; metanogénesis, los orga-

nismos metanogénicos aeróbicos transforman, principalmente ácido cítrico y especialmente el hidrógeno y el CO<sub>2</sub> en metano.

El proceso microbiológico de esas cuatro fases hasta llegar a la generación del biogás ocurre sin contratiempos, siempre y cuando, se garanticen las condiciones del proceso al regular los parámetros del procesamiento. Esas condiciones permiten la transformación de las estructuras de los polímeros a monómeros, para que al final se obtenga biogás y los respectivos residuos, como el efluente, el cual es usando como biofertilizante. Para el mejoramiento de la efectividad del proceso conviene tener una concentración de la masa seca del insumo. El Cuadro 1 muestra el efecto de incrementar la concentración de la masa seca para aumentar la concentración de los elementos químicos en el efluente. Además, al reducirse la humedad se tiene un ahorro significativo en el agua utilizada para el proceso, lo cual reduce adicionalmente el transporte de los insumos.

Al incrementar la masa seca de los insumos en el proceso desde 8% a 35%, se duplica la concentración de macro y microelementos debido a la disminución del 50% del agua utilizada en el proceso. Por lo que, para recorrer una misma distancia del transporte para la distribución del efluente y el lodo en los terrenos agrícolas como fertilizante, se suministra el doble de nutrientes en el lote, lo cual representa un ahorro de energía, solo del transporte

**Cuadro 1.** Comparación de las características nutritivas del efluente y del lodo de un biodigestor de proceso convencional y de uno con alta concentración de masa seca.

Determinación	Método	Unidad	Efluente	Lodo
Cond. eléctrica	NMX-FF-109-SCFI-2007	(dSm <sup>-1</sup> )	15.80 (31.0)	15.90 (31.0)
* Nitrógeno total	Kjeldahl	(%)	0.16 (31.8)	2.02 (2.06)
* Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Digestión en microondas/ espectrofotometría	(%)	0.02 (0.05)	0.68 (1.31)
* Potasio (K)	Elementos solubles en agua /AA	(%)	0.36 (76)	2.14 (430)
* Calcio (Ca)	Elementos solubles en agua /AA	(%)	0.11 (0.23)	3.00 (6.20)
* Magnesio (Mg)	Elementos solubles en agua /AA	(%)	0.04 (0.09)	0.58 (1.21)
* Sodio (Na)	Elementos solubles en agua /AA	(%)	0.06 (0.13)	0.42 (0.85)
* Azufre (S)	Digestión microondas / turbidimetría	(%)	0.02 (0.05)	0.55 (1.12)
* Hierro (Fe)	Digestión en microondas /AA	(mg kg <sup>-1</sup> )	24 (49)	2296 (4608)
* Cobre (Cu)	Digestión en microondas/AA	(mg kg <sup>-1</sup> )	0.5 (1.04)	16.5 (33.4)
* Manganeso (Mg)	Digestión en microondas/AA	(mg kg <sup>-1</sup> )	3.8 (7.65)	204.0 (410.0)
* Zinc (Zn)	Digestión en microondas/AA	(mg kg <sup>-1</sup> )	1.8 (3.65)	91.6 (184.5)
* Boro (B)	Digestión en microondas/AA	(mg kg <sup>-1</sup> )	2.1 (4.3)	45.3 (91.2)
* Materia orgánica	Calcinación	(%)	6.47 (12.98)	12.20 (24.70)
Humedad	Método gravimétrico	(%)	91.8 (184.3)	83.5 (168.2)

\* Resultados reportados en función de base húmeda. ( ) valores para una alta masa seca

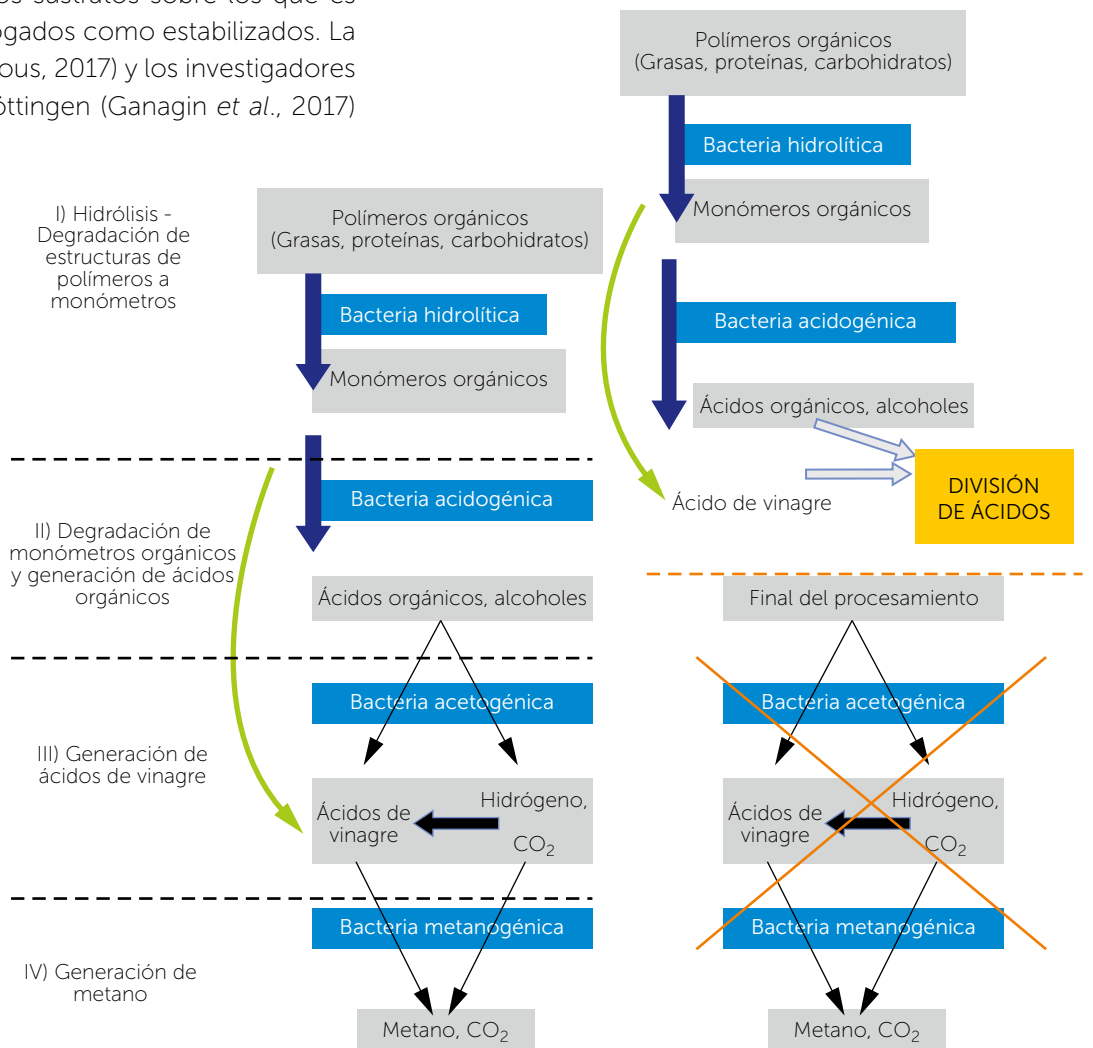
del 50% de la energía utilizada. En el caso en que, las condiciones del proceso son reguladas diferencialmente, por ejemplo, por el control de la temperatura durante el tiempo del desarrollo de un proceso específicamente orientado, es decir, no hacia las bacterias mesófilas, pero si a las termófilas y la carga del espacio, es demasiado elevado, las condiciones de los microbiológicos se modifican frecuentemente, de tal forma que las condiciones del proceso de transformación ya mencionadas son tan cambiantes que, los microorganismos que utilizan los ácidos pueden morir o inactivarse. El proceso de las cuatro fases para generar biogás no está exento de complicaciones, ya que puede ser que, el reactor se encuentre demasiado ácido, con un valor pH mucho más bajo de 7. Puede ser posible que, se registren valores de pH de alrededor de 3.5. Los valores bajos afectan a los microorganismos metanogénicos que actúan sobre los sustratos en el reactor, ya que esos requieren condiciones casi neutras para efectuar la degradación, por lo que no llegan a transformarlos. Los sustratos sobre los que es posible actuar están catalogados como estabilizados. La empresa GICON (Anonymous, 2017) y los investigadores de la institución HAWK Göttingen (Ganagin *et al.*, 2017)

ya han demostrado la factibilidad de alterar el material ácido para la generación de biogás. Así, el objetivo de este estudio es mostrar una tercera y nueva visión científica, la cual combina los dos procesamientos previos (Universität Rostock, 2014).

En la primera parte del procesamiento, el sustrato solo recibe un tratamiento de degradación de dos fases; hidrólisis y acidogénesis, por lo que el producto final no es biogás (Figura 1 izquierda). El producto es una biomasa muy ácida (Figura 1 derecha). Este escenario puede ser deseable y

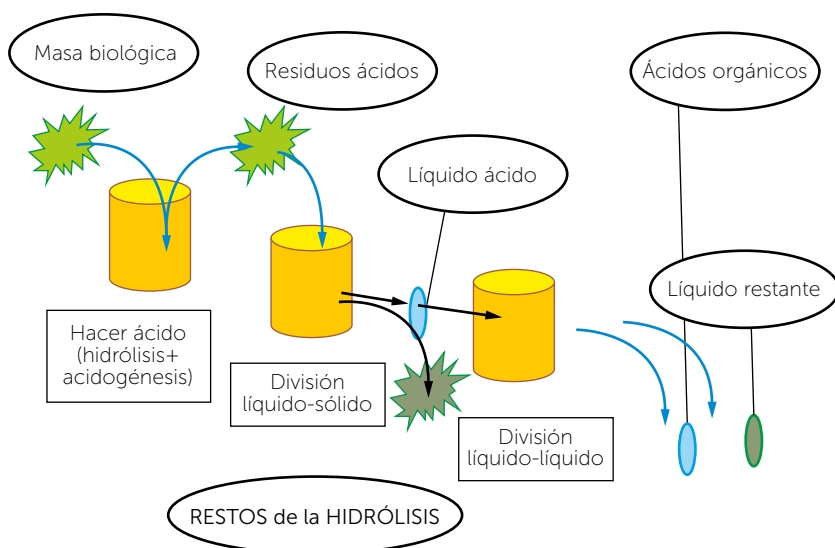
puede estar organizado sistemáticamente por el manejo del procesamiento. La mayor ventaja de mantener el ambiente ácido se hace para evitar la continuidad de una degradación microbiológica. Con este efecto se garantiza un periodo estable del tiempo, el cual permite una extracción técnica de los ácidos. Esta extracción técnica de los ácidos orgánicos generados es la segunda parte del nuevo procesamiento.

En caso de que, se carezca de un ambiente demasiado ácido; cuando las condiciones son neutras, también puede ocurrir una extracción técnica, que puede deberse a otros procesos, donde se utilizan los ácidos orgánicos generados. Este proceso es mucho más natural: los microorganismos (metanogénicos) tienen la posibilidad de usar la energía que contienen los ácidos. Este proceso se sucede demasiado rápido, pero solo ocurre en condiciones neutras. El proceso técnico para extraer los



**Figura 1.** Generación de biogás a partir de cuatro fases de degradación aeróbica (izquierda) y generación de ácidos orgánicos con dos fases de degradación aeróbica (derecha).

ácidos orgánicos del sustrato líquido no es tan rápido como el proceso natural realizado por los microorganismos, por lo que, técnicamente se extrae solo una parte de los ácidos orgánicos. La parte restante de los ácidos que permanece es utilizada por los microorganismos para el proceso natural y de forma simultánea a la extracción técnica. Esa parte utilizada en el proceso natural no está disponible para el proceso técnico, por lo que, se reduce la efectividad de la producción de ácidos orgánicos. De ahí que, debido el efecto del incremento hacia un ambiente ácido, se reducen las condiciones neutras, lo que bloquea a los microorganismos metanogénicos, y se logra la extracción técnica de los ácidos orgánicos debido a la disponibilidad de tiempo. Ante esas posibilidades para utilizar los ácidos orgánicos y los materiales residuales se puede conseguir una mayor rentabilidad de los procesos para el tratamiento de la masa orgánica. Estos valores representan la base para una evaluación económica más completa, ya que los costos son un factor determinante y no se pueden obviar. Aunque también, es importante el costo que implica eliminar los restos de la hidrólisis (Figura 2). En estos desechos escasean los elementos que sean sencillos de reducir por los microorganismos, ya que se carece de proteínas y de grasas casi en su totalidad. Igualmente, aunque la hemicelulosa es más sencilla de degradar con respecto a la celulosa-lignina, su presencia es bastante limitada. Esos elementos ya fueron degradados por los ácidos orgánicos en el proceso. De ahí la importancia de generar un proceso novedoso para los desechos resultantes del procesamiento previó, con el propósito de reducir los costos para eliminar estos residuos.



**Figura 2.** Flujo que sigue el procesamiento para la generación de ácidos orgánicos de la biomasa, mostrando los desechos de la hidrólisis.

En un análisis realizado sobre los residuos del procesamiento se encontró que, el material residual presentó una notable característica física; una alta porosidad en la estructura. Asociado el hecho de que, casi todos los elementos del tipo inestable ya fueron degradados en el proceso. Estas características son fundamentales para la producción de biocarbón. Así que, como los residuos del proceso contienen humedad y al aplicar un proceso hidrotérmico de carbonización (HTC) se genera el biocarbón.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El biocarbón es generado por el calentamiento de la biomasa, principalmente vegetal y que posea un alto contenido de humedad. Debido a las altas temperaturas del proceso de la pirolisis o de carbonización hidrotérmica, se efectúa una evaporación selectiva de algunas partículas contenidas en esa biomasa. El residuo final es un material sólido y duro, con una gran concentración de carbón, conocido generalmente como biocarbón (Titrizi, 2013). Sus características físicas finales determinan su posible utilización como un biomaterial, o como una fuente para generar energía (Figura 3), llegando incluso a sustituir a los combustibles convencionales fósiles actuales.

La rentabilidad del biocarbón como fuente energética es altamente apreciada siempre y cuando, el transporte de la biomasa sea más costoso, debido en parte a su alto contenido de humedad y de que ésta, contribuye a un proceso de una incineración ineficiente. El biocarbón también puede complementar el combustible en

las plantas de energía que operan con carbón mineral. En este caso y en particular, su efecto al medioambiente es positivo. El biocarbón ofrece características físicas y químicas interesantes para ser utilizado como biomaterial. Por un lado, su estructura presenta una alta solidez, de ahí su resistencia contra los procesos naturales, los químicos y los biológicos, lo que resulta en que, la degradación del carbón en la masa orgánica que sirve de base para el biocarbón se acelere. Se ha diagnosticado que, el carbón en el suelo derivado del biocarbón exhibe una longevidad de más de 1000 años (Lehmann, 2007). Debido a esta cualidad de estabilidad surgen mayores oportunidades para su utilización, como es su incorporación dentro del suelo, lo

cual ofrece dos ventajas: primero, por el secuestro de carbono, el suelo actúa como un almacén de carbono (C), evitando que éste se esparza en la atmósfera (Autorenkollektiv, 2016). Segundo, se mejora la capacidad del suelo para retener la humedad, lo cual se debe a su superficie altamente porosa, consiguiendo almacenar mayor cantidad de los elementos solubles en el agua (Favoio y Hogg, 2006). Al producto de esta relación se le conoce coloquialmente como Terra Preta (Scheub *et al.*, 2013).

La presencia de esos poros, lo habilita también para ser utilizado para la limpieza de líquidos y la eliminación de impurezas presentes en los gases. Por ejemplo, la limpieza del aire en el interior de los establos debido a la acumulación de amoníaco (NH<sub>3</sub>) (Ibrahim *et al.*, 2014). La gran superficie de poros del carbón es fundamental para el éxito de esa cualidad, lo cual se explica por la presencia de fuerzas físico-químicas entre las moléculas (Schrage *et al.*, 2013), las cuales atrapan las moléculas indeseables junto al carbón, separándolas del aire del establo. De ahí la importancia de evaluar la estabilidad del biocarbón y así disponer de elementos para validar su aplicación en otros casos. Este atributo está estrechamente vinculado con el carbón y su estructura, por lo que es valioso que, mediante parámetros medibles se efectúe una evaluación de esta característica. El Cuadro 2 muestra algunos de esos parámetros, los cuales provienen de varios tratamientos termoquímicos a los que puede ser sometida la masa biológica.

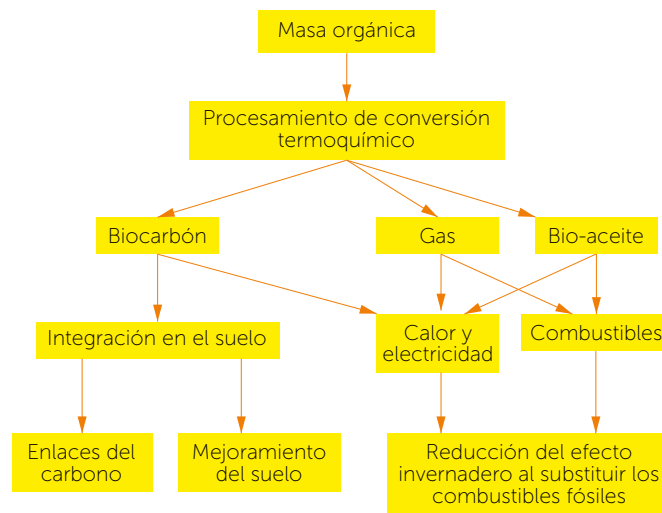


Figura 3. Flujo de la generación de biocarbón, adaptado de Teichmann (2014).

La eficiencia de conversión del carbón y la eficiencia de la masa sólida tienen una relación directa con las características propias de la materia prima de la biomasa, tales como insumo en el proceso. Otro factor importante es la composición de la biomasa sobre la calidad del biocarbón. Como se mencionó anteriormente, el contenido de la celulosa-lignina tiene una relación respecto a los contenidos de las

grasas y las proteínas. Esa es el componente con la mayor estabilidad; y es la base para la generación del biocarbón. La composición de la celulosa-lignina por sí sola, es muy superior a las grasas y las proteínas; de ahí que, son tres los componentes de interés; la hemicelulosa, la celulosa y la lignina. La hemicelulosa es más débil que la lignina. Para que la lignina sea el arranque de la reacción, la eficiencia de la masa será mayor, siempre y cuando la masa que entra como insumo sea rica en lignina respecto a la celulosa (Funke, 2007). En el procesamiento para la carbonización no se altera significativamente la composición de la lignina (Liebeck, 2015). El calor y la presión tienen un efecto mayor sobre los contenidos débiles de la lignocelulosa. Aunque a los contenidos más resistentes se les apliquen los mismos tratamientos, sus cambios son menos significativos. Se tiene así la posibilidad de que, al ejecutarse el proceso de la carbonización de una masa biológica inicial, la cual contenga una menor parte de carbón débil, el efecto del resto sobre el proceso de la hidrólisis puede ser que: el rendimiento sea mejorado, porque el contenido del material resistente en la masa inicial se

**Cuadro 2.** Concentraciones y eficiencia durante la generación del carbón y la masa sólida de biocarbón (Meyer *et al.*, 2011).

Proceso	Velocidad del proceso	Temperatura del proceso (°C)	Tiempo del proceso	Carbón		Eficiencia de masa sólida <sup>1)</sup>
				Concentración	Eficiencia <sup>1)</sup>	
				M.-%	(%)	
Pirólisis	lento	aprox. 400	-	95	aprox. 58	aprox. 30
	rápido	aprox. 500	aprox. 1 s	74	12-26	12-26
HTC <sup>2)</sup>	-	180 - 250	1-12 h	< 70	88	< 66
Gasificación	-	aprox. 800	< 20 s	-	-	aprox. 10

<sup>1)</sup> masa del producto/masa orgánica de entrada; <sup>2)</sup> carbonización hidrotérmica.

incrementa en respuesta en la cantidad de biocarbón generado. La energía necesaria del proceso se reduce, porque se reduce la masa a evaporar. El agua del proceso (por HTC) tiene menos elementos como productos de la degradación, los cuales están vinculados con la masa biológica débil y las partes del carbón.

## CONCLUSIONES

La rentabilidad del uso de la masa biológica en un proceso desarrollado en forma de cascada es viable al realizarse dos procesos en forma de cadena, siempre y cuando se establezcan las condiciones del proceso. Por lo que, la rentabilidad depende de: la producción y la venta/aplicación de los ácidos orgánicos; una reducción de los costos en la eliminación de los desechos de la hidrólisis, y la producción de carbón, su venta y aplicación. Es posible reutilizar los gases de la hidrólisis que contengan hidrógeno o un biogás, para utilizarse en calentar el reactor del proceso de la carbonización y coadyuvar a mejorar la rentabilidad. Con este estudio se sientan las bases para validar que, solo para generar biocarbón a partir de los restos de la hidrólisis aplicando la carbonización hidrotérmica es posible obtener mayor eficiencia de conversión, que empleando otros procesos termoquímicos.

## LITERATURA CITADA

- Anonymous. 2017. Das GICON-Biogasverfahren. <http://www.gicon-engineering.com/gicon-biogas-technologien/das-gicon-biogasverfahren.html> [consultado el 11/09/2017].
- Autorenkollektiv. 2016. Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsmittel oder für die C-Sequestrierung in Böden. Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften. Hrsg. Umweltbundesamt, p. 205.
- Autorenkollektiv. 2007. Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU). Erich Schmidt Verlag. ISBN 978-3-503-10602-8.
- Favoino E., Hogg D. 2006. The potential contribution of biowaste to tackle climate change: shortcomings of life cycle analysis concerning biowaste and relevance to policy-making. ORBIT 2006: Biological Waste Management. From Local to Global; Proceedings of the International Conference ORBIT 2006. Eckhard Kraft (Hrsg.) Weimar. ISBN 3-935974-09-4.
- Funke A. 2012. Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse – Reaktionsmechanismen und Reaktionswärme. Dissertation. Berlin: Fakultät III-Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin.
- Ganagin W., Loewen A., Hahn H., Nelles M. 2017. Flexible Biogaserzeugung durch technische und prozessbiologische Verfahrensanpassung. [https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Flexible\\_Biogaserzeugung\\_durch\\_technische\\_uun\\_prozessbiologische\\_Verfahrensanpassung.pdf](https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Flexible_Biogaserzeugung_durch_technische_uun_prozessbiologische_Verfahrensanpassung.pdf). [consultado el 11/09/2017].
- Ibrahim B., Schlegel M., Kanswohl N. 2014. Investigation of applicability of wetland biomass for producing biochar by hydrothermal carbonization (HTC). *Landbauforschung. Applied Agriculture and Forestry Research*. 64(2): 119-124.
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5 (7), P. 381-387.
- Liebeck M. 2015. Untersuchung zur Hydrothermalen Carbonisierung an Modellsubstanzen. Dissertation. Darmstadt: Fachbereich Chemie, Technische Universität Darmstadt.
- Meyer S., Glaser B., Quicker P. 2011. Technical, Economical, and Climate-Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature review. *Environmental Science & Technology*, 45(22): 9473-9483.
- Scheub U., Pieplow H., Schmidt H.P. 2013. Terra Preta: die schwarze Revolution aus dem Regenwald; mit Klimagärtnern die Welt retten und gesunde Lebensmittel produzieren. Verlag Oekom. p. 206, ISBN 978-3-865-81407-4.
- Schlegel M., Pérez-Pineda E., Ortiz-Laurel H., Schnabel D., Kanswohl N., Rössel D. 2013. Adaptación de un biocontenedor para la generación de biogás en instalaciones descentralizadas en zonas marginadas. En: *Energía Alterna y Biocombustibles: innovación e investigación para el desarrollo sustentable*. Pérez Vázquez, A. y García Pérez, E. editores. bba. Colegio de Postgraduados. 1-12.
- Schrage C., Modrow A., Fichtner S., Giebelhausen, J.M., Böhringer B. 2013. Funktionalisierte polymerbasierte sphärische Aktivkohle für Flüssig- und Gasphasenanwendungen. *Chemie Ingenieur Technik* 2014, 86, No. 1-2, pp. 27-34.
- Teichmann I. 2014. Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. 81. Jahrgang. DIW Wochenbericht Nr.1+2.
- Titrici M.M. 2013. Sustainable Carbon Materials from Hydrothermal Processes. WILEY, p. 372. ISBN 978-1-119-97539-7.
- Universität Rostock. 2014. Einrichtung und Verfahren zum biologischen Abbau eines Substrats. Erfinder: Mathias SCHLEGEL. Anmeldung: 18.03.2014. DE10 2014 103 660.

