

Pirólisis: un viaje hacia la descomposición térmica

Elizabeth Ibarra-Lizárraga,¹ David Ulises Santos-Ballardo^{1,2*}

¹ Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa

² Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán

* Dirección para correspondencia: ulises.ballardo@ciad.mx

En el mundo se producen cerca de 2 mil millones de toneladas de residuos orgánicos al año. Actualmente, la mayoría de dichos materiales no son aprovechados, por lo que representan agentes contaminantes que tienen un alto impacto ambiental; sin embargo, se ha descubierto que mediante algunos procesos de transformación estos materiales pueden ser convertidos en recursos valiosos. Esto es posible mediante el aprovechamiento de la biomasa; es decir, materia orgánica que puede ser utilizada como fuente de energía y que por lo general está compuesta esencialmente de moléculas complejas compuestas de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, y de elementos inorgánicos como el azufre en baja proporción. La biomasa puede ser árboles y arbustos de los bosques, plantas que crecen naturalmente o en producciones agrícolas, y materias acuáticas diversas, como los diferentes tipos de algas. La biomasa tiene un uso muy importante en la generación de energía (producción de biocombustibles) y contribuye, por tanto, en la disminución del uso de combustibles fósiles y en su progresiva sustitución (Mejía-Madrigal y Upegui-Sosa, 2022).

La forma y la composición de la biomasa es una barrera importante para la transformación rápida y fácil de la misma a biocombustibles. Una de las desventajas de la biomasa es que es difícil de manipular, almacenar o transportar, especialmente cuando se busca su conversión a bioenergía. La conversión de biomasa sólida en biocombustibles líquidos y gaseosos representa una motivación importante en el área de las energías renovables, y se puede lograr a través de diferentes procesos de transformación físicos, bioquímicos o termoquímicos (Basu, 2010).

La ruta física se refiere a procesos que implican cambios en la estructura de la biomasa en lugar de reacciones químicas (es decir, de composición), y puede incluir métodos mecánicos, como la trituración o el prensado, para obtener productos útiles o facilitar los procesos químicos necesarios para la transformación de biomasa en biocombustibles (Bridgwater, 2012).

La ruta bioquímica implica procesos que utilizan microorganismos, enzimas y otros componentes biológicos para descomponer la biomasa y generar productos químicos o biocombustibles; esta es una ruta un poco más lenta que las otras, pero no requiere de mucha energía externa (Basu, 2010).

En la conversión termoquímica se utiliza la aplicación de calor para transformar la biomasa en productos útiles (Figura 1) como biocombustibles u otros productos químicos; en esta ruta, toda la biomasa se convierte inicialmente en gases que luego se transforman en las sustancias químicas deseadas (o que se utilizan directamente como gas energético). Ejemplos de estos procesos termoquímicos son la combustión, la gasificación, la licuefacción hidrotérmica y la

pirólisis. Estos métodos aprovechan altas temperaturas en ausencia o presencia limitada de oxígeno (Vilca *et al.*, 2010).

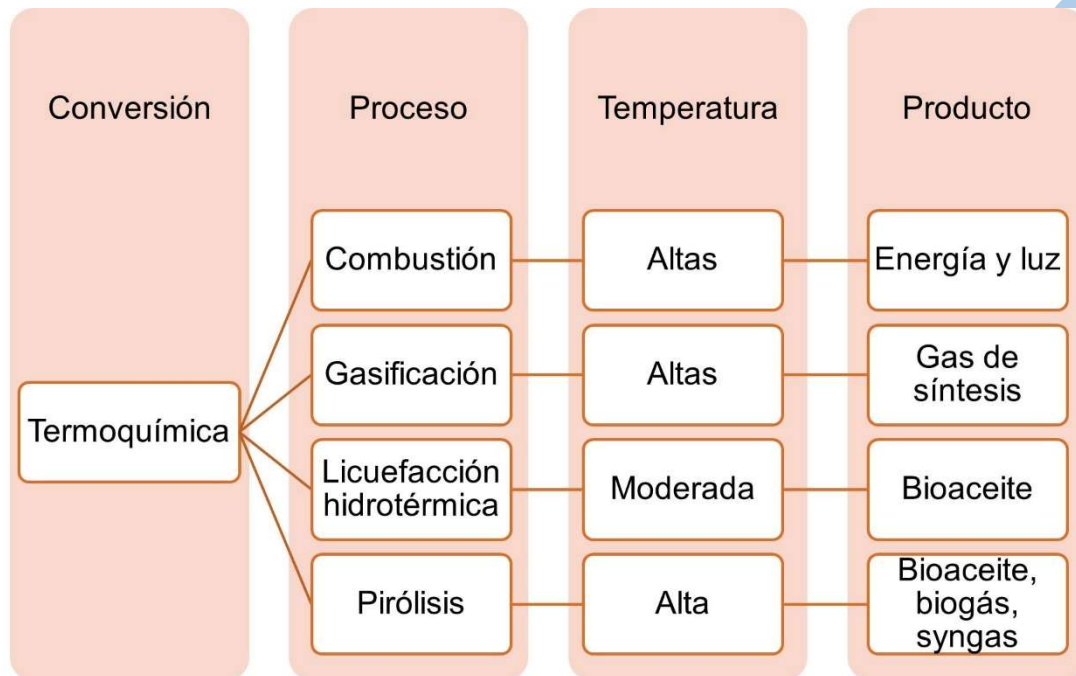


Figura 1. Procesos termoquímicos para el aprovechamiento de biomasa.

Es importante mencionar que todas estas rutas termoquímicas difieren en temperaturas de operación, aplicación de presión, uso de catalizadores, y en si el material necesita estar seco o no.

Entonces, la pirólisis es...

La palabra “pirólisis” proviene del griego *Pyr*, que significa fuego, y *lysis*, que significa descomposición. En conjunto, la pirólisis se refiere al proceso de

descomposición química de un material mediante la aplicación de calor, ya sea en ausencia total de oxígeno o con un suministro limitado de este, de manera que no permita alcanzar la combustión o la gasificación en un grado apreciable. Durante la pirólisis, las moléculas grandes y complejas de carbohidratos (como la celulosa) que se encuentran en la biomasa, se descomponen en moléculas relativamente más pequeñas y simples, en forma de gas, líquido o carbón (Figura 2) (Bridgwater, 2012).

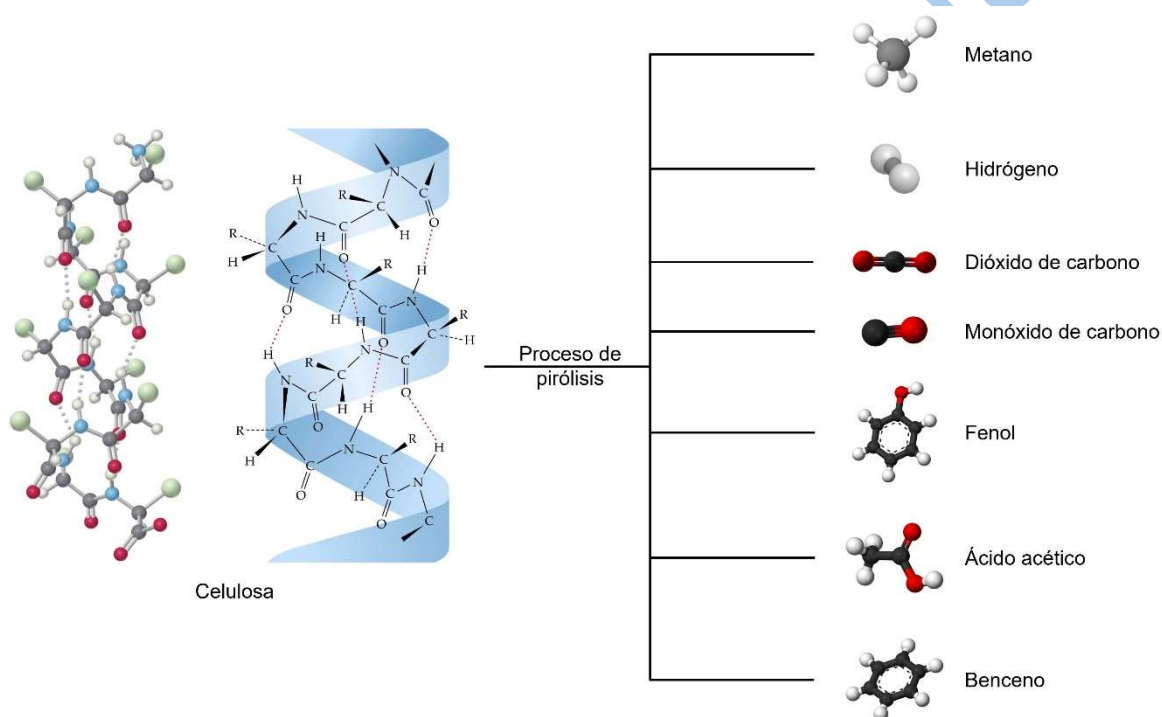


Figura 2. Rompimiento de celulosa por pirólisis. Elaboración propia.

La materia orgánica de la biomasa, más la aplicación de calor, produce tres productos principales: el bioaceite, que corresponde a la parte líquida; syngas, correspondiente a la parte gaseosa; y biocarbón, correspondiente a la parte sólida.

Explorando la materia prima

La pirólisis puede utilizar diversas fuentes de materia prima, principalmente materiales orgánicos que contienen mucho carbono. Entre las principales materias primas encontramos:

1. Biomasa residual: como subproductos agrícolas y forestales.
2. Estiércol animal.
3. Residuos biológicos industriales.
4. Organismos marinos y acuáticos.

La versatilidad de la pirólisis radica en su capacidad para procesar una amplia variedad de materiales orgánicos (incluso inorgánicos), convirtiéndolos en productos útiles. Esto no solo contribuye a la gestión sostenible de residuos, sino que también les da valor agregado a estos, ya que puede generar productos valiosos y energía a partir de fuentes que usualmente se consideran desechos, mismos que si no se tratan de manera adecuada pueden representar problemas ambientales (Kataki *et al.*, 2018).

Temperatura o tiempo, esa es la cuestión

Esta tecnología se clasifica según la temperatura utilizada y la velocidad a la que se alcanza esta. Los principales tipos de pirólisis son: lenta, rápida e instantánea.

La pirólisis lenta o convencional se usa principalmente para producción de biocarbón, es la forma más antigua de pirólisis. La biomasa se calienta lentamente en ausencia de oxígeno hasta alcanzar una temperatura relativamente baja por un periodo prolongado de tiempo. La pirólisis lenta ocurre a una temperatura en un rango de 300 a 500 °C, una velocidad de calentamiento de 5 a 7 °C/min y con un tiempo de residencia que puede ser de horas o incluso días, dependiendo las características de la biomasa inicial (Mejía-Madrigal & Upegui-Sosa, 2022).

La pirólisis rápida tiene como objetivo principal maximizar la producción de líquido o bioaceite. La biomasa se calienta tan rápidamente que alcanza la temperatura máxima antes de descomponerse. Las características importantes que ayudan a aumentar el rendimiento de bioaceite son: velocidad de calentamiento muy alta, temperatura de reacción dentro de su rango, tiempo de residencia corto del vapor en el reactor y enfriamiento rápido del gas de síntesis. La pirólisis rápida ocurre a temperaturas en un rango entre 400 y 800 °C, una velocidad de calentamiento de 300 a 800 °C/min y con un tiempo de residencia menor a 2 segundo (Bridgwater *et al.*, 1999).

En la pirólisis instantánea, la biomasa se calienta extremadamente rápido, el gas (condensable y no condensable) sale del pirolizador en un periodo muy corto de tiempo; al enfriarse el vapor condensable se condensa en un combustible líquido. Con esto se aumenta el rendimiento líquido al tiempo que reduce la producción de carbón. La pirólisis instantánea ocurre a temperaturas entre 700 y 1000 °C, una velocidad de calentamiento de 800 a 1000 °C/min y un tiempo de residencia muy

bajo, menor a 0.5 segundos. Como producto principal obtenemos syngas y bioaceite (Mejía-Madrigal y Upegui-Sosa, 2022).

Principales productos de la pirólisis

Durante el proceso de pirólisis se obtienen tres principales productos, como son el biocarbón, syngas o gas de síntesis y bioaceite. Las cantidades relativas de estos productos dependen de varios factores, incluida la velocidad de calentamiento y la temperatura final alcanzada, además del tipo de biomasa que se utilice (Kataki *et al.*, 2018).

El syngas (gas natural sintético o gas de síntesis) generalmente está compuesto de metano, monóxido y dióxido de carbono e hidrógeno; se forma por gasificación, que es un proceso altamente endotérmico y requiere altas temperaturas por tiempo prolongado. La biomasa que favorece la producción de syngas incluye materiales orgánicos como madera, residuos agrícolas, cáscaras de nueces y residuos de cultivos (Vilca *et al.*, 2022).

El biocarbón es un compuesto rico en carbono producido a partir de biomasa calentada a una temperatura entre 300 y 1000 °C en condiciones de poco oxígeno. Puede ser obtenido a través de procesos como la torrefacción seca, la carbonización hidrotermal y la pirólisis lenta. Está compuesto de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas. La producción de biocarbón se beneficia de biomasa rica en carbono y con bajos niveles de humedad, es decir,

materiales como madera o residuos agrícolas (Mejia-Madrigal & Upegui-Sosa, 2022; Vilca *et al.*, 2022).

El bioaceite es un líquido que tiene cierta mezcla de compuestos, principalmente hidrocarburos complejos con grandes cantidades de oxígeno y agua, obtenidos de la condensación de vapores producidos por pirólisis. El bioaceite es la motivación principal de la pirólisis para combustible. La producción de bioaceite se favorece utilizando biomasa rica en lípidos y aceites. Fuentes comunes de biomasa incluyen microalgas, plantas oleaginosas como la jatropha, colza o soya, así como residuos grasos y aceites de cocina usados (Hasan *et al.*, 2021).

Reactores en acción

Actualmente se utilizan varios tipos de reactores de pirólisis para la producción de syngas, biocarbón y bioaceite, como los reactores de lecho fijo, de lecho fluidizado (burbujeante y circulante), de horno rotatorio, ablativos y de tornillo sin fin (barrena). Para que el proceso de pirólisis sea eficiente, el reactor debe garantizar una elevada transferencia de calor a la materia prima y un corto tiempo de residencia, es por ello que el más utilizado es el reactor de lecho fluidizado de tipo burbujeante (Figura 3) (Grycová *et al.*, 2016; Vilca *et al.*, 2022).

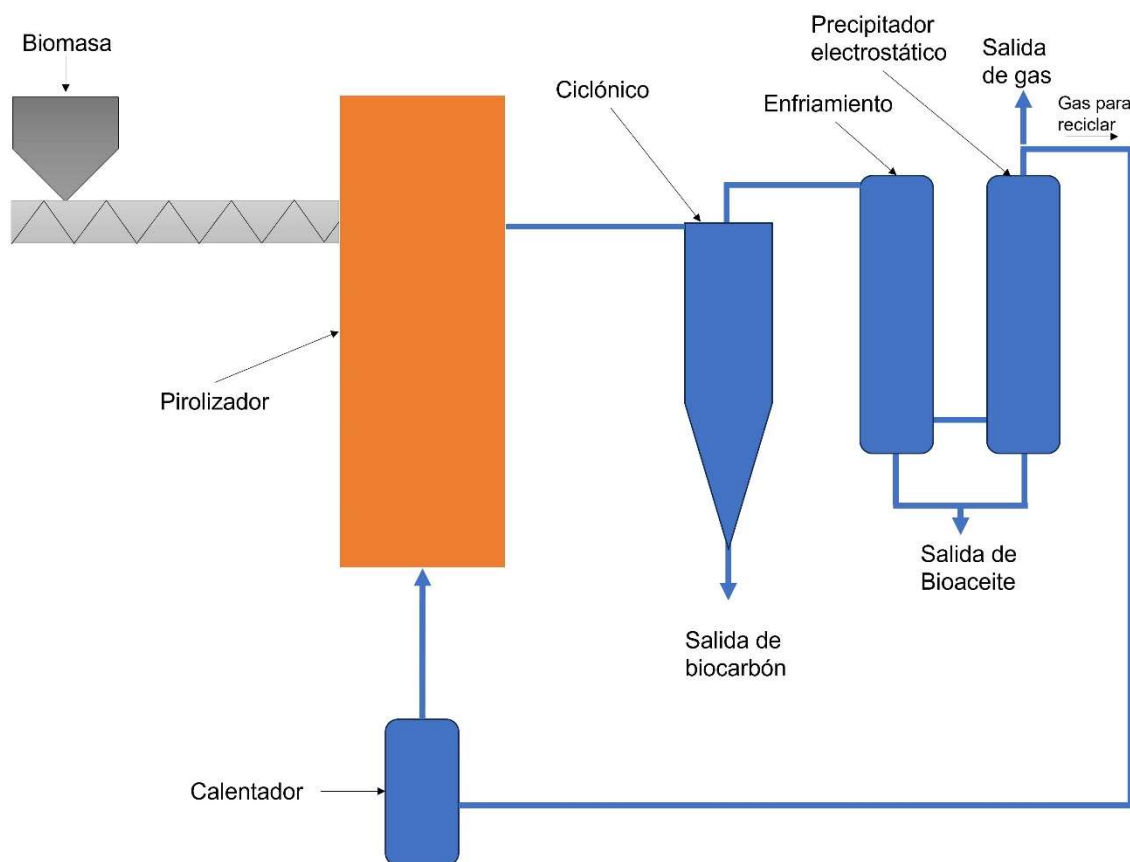


Figura 3. Diagrama de reactor de lecho fluidizado. Elaboración propia.

Los reactores de lecho fluidizado son muy eficaces debido a la naturaleza continua de la alimentación de la materia prima, lo que permite una buena producción de syngas, biocarbón y bioaceite. En este tipo de reactor, la biomasa se introduce en una cámara de pirólisis mediante sólidos calientes que garantizan una alta transferencia de calor a la materia prima hasta la temperatura de pirólisis, en la que comienza su descomposición. Los vapores condensables y no condensables liberados abandonan la cámara, mientras que el biocarbón sólido producido permanece una parte en la cámara y la otra en el gas (Hasan *et al.*, 2021).

Por otro lado, el gas se separa del carbón y se enfría con agua en la parte baja del reactor. El vapor condensable se condensa como bioaceite o aceite de pirólisis; los gases no condensables salen de la cámara como gas de síntesis, que es otro producto de interés. Como este gas está libre de oxígeno, parte de él puede reciclarse como portador de calor a la cámara de pirólisis. De manera similar, el carbón sólido puede recolectarse como producto comercial o quemarse en una cámara separada para producir el calor necesario para la pirólisis (Kataki *et al.*, 2018; Hasan *et al.*, 2021).

Conclusión

El proceso de pirólisis se realiza en tres etapas; la primera es la dosificación y alimentación de la materia prima en el reactor, después ocurre la transformación de la masa orgánica en productos útiles, y finalmente, la obtención y separación de los productos de interés: syngas, bioaceite y biocarbón. La pirólisis emerge como una valiosa herramienta para la gestión sostenible de residuos, al convertir desechos orgánicos que tienen un impacto ambiental negativo, en recursos valiosos. Por otro lado, ayuda a la producción de syngas y aceites pirolíticos que pueden utilizarse como fuentes de energía. Esto no solo diversifica la matriz energética, sino que también reduce la dependencia de combustibles fósiles, al tiempo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al evitar la

descomposición anaeróbica de los residuos, por lo que representa una alternativa más limpia.

Comparada con algunos métodos tradicionales de eliminación de residuos, la pirólisis destaca por tener un menor impacto ambiental al ofrecer una alternativa más eficiente y sostenible.

Aunque la tecnología de pirólisis aún no ha sido ampliamente adoptada en nuestro país, su potencial futuro para el desarrollo en México es innegable. La pirólisis no solo ofrece soluciones efectivas para la gestión de residuos, sino que también representa una oportunidad para avanzar hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Referencias

Basu P. (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design. USA. Elsevier Inc.

Bridgewater AV, Meier D, Radlein D. (1999) An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic geochemistry*. 30(12): 1479-1493.

Bridgewater AV. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 38: 68-94.

Grycová B, Koutník I, Pryszcz A. (2016). Pyrolysis process for the treatment of food waste. *Bioresource Technology*. 218: 1203-1207.

Hasan MM, Rasul MG, Khan MMK, Ashwath N, Jahirul MI. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 145: 111073.

Kataki R, Bordoloi NJ, Saikia R, Sut D, Narzari R, Gogoi L and Bhuyan N (2018) Waste valorization to fuel and chemicals through pyrolysis: technology, feedstock, products, and economic analysis. In: Singhanian RR *et al.*, *Waste to wealth, energy, environment, and sustainability* (pp 477-514). Springer Nature Singapore Pte. Ltd.

Mejia-Madrigal SA y Upegui-Sosa SA. (2022). La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. *Cuaderno Activa* 13(1):41–60.

Vilca K, Rodríguez S, Atarama U, Cueva C, Concha WJ, Atausupa MA y Gosgot W (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable* 6(1):43–56.

Manuscrito aceptado