

Financiado por:



**Junta de Andalucía**

Consejería de Transformación Económica,  
Industria, Conocimiento y Universidades



# TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DEL SECTOR OLEÍCOLA

*LICUEFACCIÓN  
HIDROTHERMAL (HTL)*



Elaborado por:



**CIT  
OLIVA**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEL OLIVAR Y  
EL ACEITE

## INDICE

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.   | El proceso de licuefacción hidrotermal (HTL).....  | 4  |
| 1.1. | Parámetros del proceso de licuefacción hidrotermal (HTL).....  | 4  |
|      | Temperatura.....   | 4  |
|      | Tiempo de reacción.....  | 5  |
|      | Medio licuante.....  | 5  |
|      | Materia prima.....   | 6  |
|      | Presión.....   | 6  |
|      | Reactividad.....   | 6  |
|      | Catalizadores.....   | 6  |
| 1.2. | Etapas del proceso de licuefacción hidrotermal (HTL).....  | 7  |
|      | Calentamiento y Presurización.....   | 7  |
|      | Hidrólisis y Descomposición Química.....   | 7  |
|      | Reacciones Secundarias y Formación de Productos.....   | 8  |
|      | Separación de Fases.....   | 8  |
| 1.3. | Procesos Comerciales de Licuefacción Hidrotermal (HTL).....  | 8  |
|      | Licella Pty Ltd (Australia) - Cat-HTR™.....  | 8  |
|      | Steeper Energy (Dinamarca-Canadá) - Hydrofaction™.....   | 8  |
|      | Muradel Pty Ltd (Australia) - Green2Black™.....  | 8  |
|      | ENI SpA (Italia) - Waste-to-Fuel (W2F).....  | 9  |
|      | Shell-Biofuel BV-NextFuels LLC (Países Bajos/EE. UU.) - HTU.....                                       | 9  |
|      | SCF Technologies-Altaca Energji (Dinamarca-Turquía) - CatLiq®.....                                     | 9  |
|      | Changing World Technologies (CWT)-Ridgeline Energy Services (EE. UU.).....                             | 9  |
|      | Southern Oil Refining (Australia).....   | 9  |
| 2.   | Subproductos de la industria oleícola utilizables en el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL)..... | 9  |
| 2.1. | Alperujo.....  | 9  |
| 2.2. | Poda y Hojín.....  | 10 |
| 2.3. | Hueso.....   | 10 |
| 3.   | Productos obtenidos de la Licuefacción Hidrotermal (HTL).....  | 10 |
| 3.1. | Biocrudo.....  | 10 |



---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.2. | Fracción acuosa.....   | 11 |
| 3.3. | Residuos sólidos (Hydrochar) .....   | 11 |
| 3.4. | Gases.....   | 12 |
| 4.   | Industria andaluza dedicada a la Licuefacción Hidrotermal (HTL).....             | 12 |
| 5.   | Patentes sobre técnicas dedicadas a la Licuefacción Hidrotermal (HTL).....       | 13 |
| 6.   | Proyectos de investigación sobre la tecnología de Licuefacción Hidrotermal (HTL) | 20 |
| 7.   | Bibliografía.....  | 24 |

## **1. El proceso de licuefacción hidrotermal (HTL)**

La licuefacción hidrotermal (HTL, por sus siglas en inglés) es un proceso termoquímico que convierte biomasa en un biocrudo líquido de alto valor energético, simulando las condiciones de formación de petróleo en tiempos geológicos pero acelerado a unas pocas horas. Este proceso ocurre en un entorno acuoso bajo condiciones de alta temperatura (200-350 °C) y alta presión (10-25 MPa), lo que permite transformar materiales orgánicos húmedos, como residuos agrícolas o algas, en combustibles líquidos sin necesidad de secarlos previamente. Los productos resultantes, como biocrudo, gases, agua rica en nutrientes y sólidos carbonosos, pueden utilizarse en aplicaciones energéticas, químicas y de fertilización, contribuyendo a esquemas de economía circular y sostenibilidad (Toor et al., 2011). Esta tecnología se perfila como una solución prometedora para el manejo de residuos y la producción de bioenergía, ofreciendo además un camino para reducir las emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.

### **1.1. Parámetros del proceso de licuefacción hidrotermal (HTL)**

En el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL), intervienen varias variables críticas que afectan su eficiencia y desarrollo. A continuación, se describen los parámetros más relevantes:

#### **Temperatura.**

La temperatura es uno de los parámetros más relevantes en el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL), ya que proporciona la energía necesaria para superar la energía de activación, permitiendo que las reacciones químicas conviertan la biomasa en productos líquidos como el bio-oil. En el rango de temperaturas entre 200 y 400 °C, el agua adquiere propiedades únicas como solvente reactivo en su estado subcrítico o supercrítico, favoreciendo las reacciones químicas que ocurren durante el proceso (Sharma et al., 2021).

El rango óptimo de temperatura para maximizar el rendimiento del bio-oil se encuentra aproximadamente en los  $280 \pm 40$  °C, particularmente cuando se utiliza biomasa con un alto contenido de humedad, como las algas. En estas condiciones, el agua actúa como un medio reactivo efectivo, aumentando su producto iónico y reduciendo su viscosidad. Esto mejora la velocidad de reacción y la difusión de los compuestos reactivos. Sin embargo, el aumento continuo de la temperatura por encima de este rango óptimo puede reducir el rendimiento del bio-oil debido a la aparición de reacciones secundarias, como la repolimerización de los compuestos insaturados del biocrudo, que conducen a la formación de productos menos deseables (Chan et al., 2015; Yilgin & Pehlivan, 2004).

Las altas temperaturas son necesarias para romper los enlaces moleculares de la biomasa, lo que inicialmente favorece tanto el rendimiento del bio-oil como del gas producido. El gas obtenido está compuesto principalmente por CO<sub>2</sub>, aunque su composición se ve afectada por variaciones en la temperatura. A bajas temperaturas, la producción de CO disminuye debido a la predominancia de reacciones endotérmicas como la de Boudouard y el Steam Reforming, mientras que la formación de CH<sub>4</sub> se ve



favorecida a temperaturas más altas (Chan et al., 2015). El exceso de agua durante el proceso puede intensificar la reacción Water Gas Shift (WGS), aumentando la concentración de H<sub>2</sub> en el gas final, lo cual mejora su valor energético.

El contenido de lignina en la biomasa está relacionado con la temperatura óptima en la que se logra un mejor rendimiento del bio-oil. Biomasa rica en lignina genera un biocrudo con mayor contenido de carbono, lo que incrementa el poder calorífico del producto final. Además, a medida que la temperatura aumenta, el contenido de oxígeno en el bio-oil disminuye, mejorando la calidad del combustible obtenido (Xu & Lad, 2008).

En las temperaturas más elevadas también tienen lugar las reacciones de deshidratación, favoreciendo la formación de un subproducto sólido conocido como hydrochar, rico en carbono y útil en aplicaciones como enmienda del suelo o fuente de energía. Sin embargo, este subproducto puede aumentar si se excede el rango de temperatura óptimo, reduciendo la cantidad de bio-oil producido (Chan et al., 2015).

### Tiempo de reacción.

El tiempo de reacción influye en el rendimiento del producto final. A medida que aumenta el tiempo de contacto entre la biomasa y el medio licuante, se produce una mayor descomposición de la materia orgánica y un incremento en la proporción de bio-aceite. Sin embargo, tiempos prolongados pueden conducir a reacciones secundarias, generando sólidos residuales no deseados como el coque (Perkins et al., 2019). Las condiciones de presión y temperatura de la tecnología HTL permiten una conversión rápida de la biomasa, ya que la formación de biocombustible líquido ocurre mediante reacciones secundarias entre los productos de la hidrólisis. Aumentar el tiempo de reacción favorece la formación de gas o biochar debido a reacciones de cracking, polimerización o condensación. A bajas temperaturas, tiempos prolongados promueven la generación de fracciones gaseosas, mientras que a altas temperaturas predominan el biochar o la fracción sólida (Kang et al., 2013). Además, los productos intermedios derivados de la descomposición de la lignina juegan un papel crucial en la velocidad de reacción (Deng et al., 2010).

### Medio licuante.

El tipo de medio empleado en la licuefacción determina la eficiencia del proceso y la calidad del bio-aceite:

- Agua subcrítica/supercrítica: El uso de agua en condiciones subcríticas (200-374 °C y presiones elevadas) o supercríticas (superior a 374 °C y 22 MPa) permite disolver y descomponer la biomasa eficientemente. El agua supercrítica actúa como un agente reactivo y solvente, facilitando la ruptura de enlaces y mejorando el rendimiento del aceite (Kumar et al., 2018). La relación de biomasa y agua es muy importante en la tecnología HTL, ya que favorece reacciones como la hidrólisis y la Water Gas Shift, además de contribuir a la degradación de la biomasa. Si la biomasa contiene suficiente agua, esto facilita tanto las reacciones químicas como la transferencia de calor. Un aumento en la proporción de agua respecto a la biomasa puede incrementar el rendimiento del bio-aceite. Estudios



---

realizados con biomásas húmedas, como algas o microalgas, han utilizado proporciones de agua en un rango de 1:5 a 1:10, mostrando resultados prometedores (Sharma et al., 2021).

- Solventes orgánicos: Solventes como etanol o metanol pueden mejorar la conversión de biomasa y estabilizar el bio-aceite, reduciendo la formación de coque. Estos solventes también permiten operar a temperaturas y presiones más bajas que en procesos con agua (Akhtar & Amin, 2012).

### Materia prima.

La biomasa utilizada como materia prima para la licuefacción debe poseer un alto contenido de carbono y baja humedad. La estructura química y el contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa son factores determinantes en la calidad del producto final. Por ejemplo, un alto contenido de lignina produce un bio-aceite más aromático, mientras que la celulosa y hemicelulosa generan compuestos oxigenados más ligeros (Akhtar & Amin, 2012; Perkins et al., 2019; Buzzian Salmi, 2022).

### Presión.

La licuefacción se lleva a cabo en condiciones de presión moderada a alta (5-20 MPa), lo cual es esencial para mantener el medio licuante en estado líquido o supercrítico. La presión favorece la disolución de la biomasa y evita la formación de gases, aumentando así el rendimiento del bio-aceite (Kumar et al., 2018; Buzzian Salmi, 2022). Además, el aumento de la presión, que suele acompañar al incremento de la temperatura, no solo incrementa la densidad del agua, facilitando la descomposición de compuestos complejos como la lignina, sino que también mejora la eficiencia de la gasificación y del carbono. Este efecto influye significativamente en la cinética de la reacción, generando altos porcentajes de hidrógeno y metano, y reduciendo la cantidad de dióxido de carbono en los productos gaseosos (Kang et al., 2013).

### Reactividad.

La reactividad de la biomasa está relacionada con su composición química, su estructura y la presencia de compuestos inorgánicos. Elementos como el potasio y el sodio, presentes en las cenizas, pueden actuar como catalizadores o inhibidores durante la licuefacción, influyendo en la eficiencia del proceso (Buzzian Salmi, 2022).

### Catalizadores.

El uso de catalizadores, como ácidos, bases o materiales heterogéneos (zeolitas, óxidos metálicos), ayuda a mejorar el rendimiento del bio-aceite y reducir la formación de productos secundarios. Los catalizadores aceleran las reacciones de despolimerización y deshidratación, facilitando la conversión de la biomasa en productos líquidos de mayor valor energético (Perkins et al., 2019; SundarRajan et al., 2021). Además, los catalizadores desempeñan un papel crucial en la selectividad de las reacciones químicas, permitiendo la formación de compuestos específicos y minimizando subproductos indeseables. Por ejemplo, las zeolitas y los óxidos metálicos no solo mejoran la descomposición térmica de la biomasa, sino que también favorecen procesos de craqueo



y reestructuración molecular, resultando en una mayor proporción de hidrocarburos útiles. La elección del catalizador adecuado depende de las características de la biomasa y los objetivos del proceso, ya que puede influir significativamente en la eficiencia global y la calidad del bio-aceite obtenido.

Tabla 1. Diferentes catalizadores utilizados con su correspondiente presión y temperatura.

| Autor                      | Catalizador   | Temperatura | Presión       |
|----------------------------|---|-------------|---------------|
| Remón, J., et al. (2019)   | Ni-Co/Al-Mg   | 150-250 °C  | 50-120 bar    |
| Arun, J., et al. (2018)    | Arcilla de bentonita  | 340-440 °C  | 50 bar        |
| Buzzian Salmi, S. (2022)   | MeCl <sub>2</sub> Me-Cu,Zn,Ni   | 300 °C      | 220 bar       |
| Zhu, Z., et al. (2015)     | Ni/SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ni <sub>2</sub> P y zeolita KOH, K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , ácido fórmico | 300-350 °C  | No disponible |
| Miyata, Y., et al. (2018)  | Hierro metálico   | --          | --            |
| Rana, B. S., et al. (2010) | MoO/SBA-15  | --          | --            |
| Withrow, G. (1967)         | Na <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> , CeZROx  | 350 °C      | 206 bar       |

## 1.2. Etapas del proceso de licuefacción hidrotermal (HTL)

Aunque las reacciones que tienen lugar en el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL) son simultáneas y continuas, dividir el proceso en etapas facilita su explicación y comprensión. A continuación, se describen las principales etapas involucradas.

### Calentamiento y Presurización

En esta etapa inicial, la biomasa húmeda se introduce en el reactor, donde se somete a condiciones controladas de temperatura y presión. Estas condiciones mantienen el agua en un estado subcrítico o supercrítico, permitiéndole actuar como solvente y reactivo. Este entorno facilita las reacciones iniciales, como la hidrólisis, que descomponen las macromoléculas principales de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina) en compuestos más pequeños y solubles (Kumar et al., 2018). El agua también mejora la transferencia de calor y elimina la necesidad de secado previo, optimizando el proceso desde el inicio (Sharma et al., 2021).

### Hidrólisis y Descomposición Química

A medida que la temperatura y la presión se mantienen, las moléculas grandes de la biomasa se descomponen aún más a través de reacciones de hidrólisis. Estas reacciones convierten componentes como carbohidratos, lípidos y proteínas en productos intermedios como azúcares, ácidos grasos y compuestos fenólicos. Los compuestos intermedios generados en esta etapa son esenciales para la formación de biocrudo en las fases siguientes. Simultáneamente, algunas reacciones secundarias producen gases y sólidos como biochar (Deng et al., 2010; Kang et al., 2013).



## Reacciones Secundarias y Formación de Productos

Durante esta etapa, los compuestos intermedios experimentan reacciones como deshidratación, descarboxilación y despolimerización, que conducen a la formación del biocrudo. Este biocrudo es un producto líquido con alto contenido energético. Además, se generan gases como  $H_2$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$ , así como biochar, un residuo sólido que puede ser utilizado como fertilizante o en aplicaciones energéticas. Las condiciones específicas de esta etapa, como el tiempo de residencia y la temperatura, influyen en la proporción de productos obtenidos (Akhtar & Amin, 2011; Perkins et al., 2019).

## Separación de Fases

Al enfriarse y despresurizarse el sistema, los productos obtenidos se separan en diferentes fases. La fase líquida orgánica, o biocrudo, es el producto principal y puede ser refinado para producir biocombustibles de alta calidad. La fase gaseosa contiene compuestos útiles como hidrógeno y metano. La fase acuosa incluye productos solubles que pueden requerir tratamiento adicional, mientras que la fase sólida, el biochar, puede aprovecharse como enmienda del suelo o para otras aplicaciones industriales (Sharma et al., 2021; Kumar et al., 2018).

### 1.3. Procesos Comerciales de Licuefacción Hidrotermal (HTL)

La licuefacción hidrotermal (HTL) es una tecnología emergente que está ganando terreno en el ámbito industrial. Diversas empresas de diferentes países están desarrollando procesos que han avanzado desde la etapa piloto hasta la precomercial. Aunque gran parte de los detalles técnicos permanecen confidenciales, se dispone de información sobre algunos de los proyectos más destacados:

#### Licella Pty Ltd (Australia) - Cat-HTR™

Compañía australiana que ha desarrollado el Cat-HTR™ (Reactor Hidrotermal Catalítico), diseñado para procesar biomasa no comestible y residuos como papel, pulpa y plásticos. Este proceso ha evolucionado desde una planta piloto con capacidad para 100 toneladas anuales hasta instalaciones industriales capaces de procesar 125,000 toneladas por año.

#### Steeper Energy (Dinamarca-Canadá) - Hydrofaction™

Steeper Energy, con operaciones en Dinamarca y Canadá, desarrolló el proceso Hydrofaction™, que utiliza desechos agrícolas, municipales y animales como materia prima. Este sistema, que opera en condiciones supercríticas, destaca por su eficiencia energética y por la recirculación de fases acuosas y aceitosas. Con una capacidad de producción de 4,000 litros diarios en plantas piloto, Hydrofaction™ alcanza un rendimiento del 45% y produce biocrudo con un contenido de oxígeno reducido al 10.5%.

#### Muradel Pty Ltd (Australia) - Green2Black™

Esta compañía ha implementado el proceso Green2Black™, que utiliza lodos de depuradora como materia prima. Su planta de demostración opera en condiciones subcríticas, con un tiempo de residencia de 45 minutos y un rendimiento del 60%.





### ENI SpA (Italia) - Waste-to-Fuel (W2F)

La empresa italiana ha patentado el proceso Waste-to-Fuel (W2F), enfocado en residuos alimentarios. Operando a temperaturas de 250-310 °C y con tiempos de residencia de 1-2 horas, su planta piloto tiene una capacidad de 1-5 kg/h. Se ha anunciado su ampliación para escalar el proceso a nivel comercial.

### Shell-Biofuel BV-NextFuels LLC (Países Bajos/EE. UU.) - HTU

Este proceso comenzó con Shell y fue refinado por Biofuel BV antes de pasar a NextFuels LLC. Inicialmente procesaba pulpa de remolacha y residuos agrícolas en una planta piloto de 100 kg, y ahora opera una planta de demostración con capacidad para producir 1,000 barriles de biocombustible al día.

### SCF Technologies-Altaca Energji (Dinamarca-Turquía) - CatLiq®

SCF Technologies, adquirida posteriormente por Altaca Energji, desarrolló el proceso CatLiq®, que emplea subproductos del bioetanol, como los granos secos de destilería con solubles (DDGS). Este sistema, que combina catálisis homogénea y heterogénea, ha evolucionado desde una planta piloto con un rendimiento de 60 kg/h hasta una planta de demostración con capacidad de 15 t/h.

### Changing World Technologies (CWT)-Ridgeline Energy Services (EE. UU.)

CWT desarrolló un proceso basado en la despolimerización térmica (TDP) para procesar residuos sólidos, incluidos subproductos del procesamiento de pavo. Tras la quiebra de CWT, Ridgeline Energy Services adquirió la tecnología.

### Southern Oil Refining (Australia)

Southern Oil Refining ha construido una planta de demostración con capacidad para procesar hasta 1 millón de toneladas de biosólidos al año. Su objetivo es refinar el biocrudo producido para su uso directo como combustible.

## 2. Subproductos de la industria oleícola utilizables en el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL)

### 2.1. Alperujo

El alperujo, con su elevada humedad, elimina la necesidad de un secado previo, lo que reduce tanto los costes como el consumo energético. Su composición química, rica en lignina, celulosa, hemicelulosa, grasas y proteínas, permite alcanzar un rendimiento másico del 60% y un rendimiento energético del 104%. Este último dato no implica una violación de las leyes de la física, sino que refleja que el contenido energético del bio-oil producido supera al considerado inicialmente en la biomasa procesada. Esto se debe a la contribución de reacciones químicas promovidas por el agua supercrítica, que actúa tanto como reactivo como medio, y a la liberación eficiente de energía contenida en componentes como lípidos y proteínas que, en algunos casos, no se contabilizan por completo en la energía inicial de la materia prima. Además, su valorización mediante licuefacción hidrotermal fomenta la economía circular al integrar la bioeconomía en la



---

industria del olivar, minimizando residuos y emisiones de CO<sub>2</sub> gracias a la reutilización de agua dentro del proceso (Buzzian Salmi, 2022).

### **2.2. Poda y Hojín**

Aunque no existen estudios específicos sobre el uso de poda y hojín en procesos de licuefacción hidrotermal (HTL), su composición lignocelulósica los hace comparables a residuos como el pericarpio de almendra, que ha sido investigado en este tipo de tecnologías. Según estos estudios, la lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en los residuos agrícolas pueden transformarse en biocrudo bajo condiciones de alta temperatura y presión. Esto sugiere que los componentes de la poda y hojín del olivar podrían comportarse de manera similar en HTL, generando productos de valor añadido como bio-oil y gases ricos en energía (Remón et al., 2019).

### **2.3. Hueso**

Siguiendo con los subproductos lignocelulósicos de la industria oleícola, el hueso de aceituna presenta un perfil interesante para su posible aplicación en procesos de licuefacción hidrotermal (HTL). Aunque no existen estudios específicos sobre su uso directo, su composición rica en lignina y celulosa lo hace comparable a otros residuos agrícolas, como el pericarpio de almendra, que ya han sido investigados en esta tecnología con resultados prometedores (Remón et al., 2019).

Al igual que ocurre con la poda y el hojín, el hueso de aceituna podría beneficiarse de su combinación con materiales húmedos, como el alperujo o los lodos de depuradora, para optimizar las condiciones del proceso HTL.

## **3. Productos obtenidos de la Licuefacción Hidrotermal (HTL).**

La licuefacción hidrotermal (HTL) es una tecnología prometedora para la valorización de subproductos de la industria oleícola. Este proceso convierte la biomasa húmeda en biocrudo, un biocombustible líquido con características similares al petróleo crudo, además de generar otros productos de valor añadido (Gómez et al., 2019).

### **3.1. Biocrudo**

El biocrudo es el principal producto obtenido mediante HTL. Su composición y calidad dependen de las características de la biomasa utilizada y de las condiciones del proceso. En general, el biocrudo contiene una mezcla compleja de compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos, ácidos grasos y compuestos oxigenados. Su poder calorífico inferior (PCI) suele oscilar entre 30 y 36 MJ/kg, lo que lo hace adecuado para su uso como combustible en aplicaciones de generación de energía o como materia prima para la producción de biocombustibles avanzados (Tabla 2) (Ocampo et al., 2023; Delgado et al., 2022).

Tabla 2. Composición media del biocrudo (Ocampo et al., 2023; Delgado et al., 2022).

| PARÁMETRO                       | %           | OBSERVACIONES   |
|---------------------------------|-------------|---|
| C                               | 65-75       | Alto contenido energético, similar al petróleo crudo.         |
| H                               | 6-9         | Mejora la calidad del biocrudo para aplicaciones energéticas. |
| O                               | 15-25       | Influye en la estabilidad y densidad del biocrudo.            |
| N                               | 1-3         | Puede requerir tratamiento adicional para reducir emisiones.  |
| S                               | <0,5        | Baja concentración, favorable para usos directos.             |
| PCI (Poder calorífico inferior) | 30-36 MJ/kg | Similar al del carbón y superior al de la biomasa sin tratar. |

Estos valores pueden variar dependiendo de la materia prima utilizada y las condiciones específicas del proceso HTL, como la temperatura, la presión y el uso de catalizadores (Delgado et al., 2022; Ocampo et al., 2023; Gómez et al., 2019).

### 3.2. Fracción acuosa

Además del biocrudo, el proceso de licuefacción hidrotermal (HTL) genera una fracción acuosa rica en diversos compuestos químicos. En esta fracción se encuentran hidrocarburos, ésteres, amidas, aminas, compuestos N-heterocíclicos, compuestos oxigenados cíclicos, alcoholes, aldehídos y cetonas, entre otros (Terroba Parrado, 2023).

Esta fracción puede valorizarse mediante la recuperación de compuestos de valor añadido ya que, algunos de los componentes que la conforman tienen aplicaciones industriales en la fabricación de productos químicos. Por otro lado, la fracción acuosa también puede ser utilizada en procesos de digestión anaerobia para la producción de biogás. En cualquier caso, debido a la presencia de compuestos orgánicos y nitrogenados, la fracción acuosa requiere tratamiento previo si se desea su vertido o reutilización en entornos industriales.

### 3.3. Residuos sólidos (Hydrochar)

El hydrochar es el subproducto sólido resultante de la licuefacción hidrotermal (HTL) de biomasa. Su composición y propiedades físicas varían según las condiciones del proceso y el tipo de biomasa utilizada, lo que permite adaptar este material para usos específicos.

Destaca por su alto contenido de carbono, acompañado de oxígeno, hidrógeno y pequeñas cantidades de nitrógeno y otros elementos. Estas características lo hacen especialmente interesante para aplicaciones ambientales e industriales. Por ejemplo, la estructura porosa que desarrolla durante el proceso de HTL le confiere una gran capacidad adsorbente, ideal para la eliminación de contaminantes de aguas residuales y suelos afectados por derrames de hidrocarburos o metales pesados. Además, esta porosidad y su composición química permiten su transformación en carbón activado, un

material ampliamente utilizado en la industria para filtración y purificación (Delgado et al., 2022; Ocampo et al., 2024).

Otra de las aplicaciones destacadas del hydrochar es su uso como enmienda del suelo. Al incorporarse en sistemas agrícolas, mejora la retención de agua y nutrientes, favoreciendo el crecimiento de cultivos. Asimismo, actúa como un sumidero de carbono, contribuyendo a mitigar el cambio climático al almacenar CO<sub>2</sub> de forma estable durante largos periodos (Delgado et al., 2022).

En el ámbito energético, el hydrochar también tiene potencial como combustible sólido. Aunque su poder calorífico es generalmente inferior al del biochar, sigue siendo una fuente energética renovable que puede utilizarse en calderas y otros sistemas térmicos. Además, al ajustar las condiciones del proceso de HTL, como la temperatura o el tiempo de residencia, es posible modificar las propiedades del hydrochar para mejorar su rendimiento energético y otras características (Gómez et al., 2019; Miranda et al., 2021).

La variabilidad de las propiedades del hydrochar depende, en gran medida, de la biomasa utilizada como materia prima. Subproductos como el alperujo o el orujillo de la industria oleícola presentan una composición inicial rica en lignocelulosa que favorece la formación de hydrochar con características adsorbentes y energéticas destacadas. Por otro lado, residuos más húmedos, como los lodos de depuradora, tienden a generar hydrochars con mayor contenido de oxígeno, lo que puede ser ventajoso para aplicaciones ambientales específicas (Ocampo et al., 2023).

### **3.4. Gases**

El proceso de HTL también genera una pequeña fracción de gases, principalmente CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Aunque su proporción es menor en comparación con otros productos, estos gases pueden ser aprovechados energéticamente o utilizados en otros procesos industriales (Ocampo et al., 2023; Gómez et al., 2019).

La eficiencia y selectividad de la HTL para la producción de estos productos dependen de diversos factores, incluyendo la naturaleza de la biomasa, las condiciones de operación (temperatura, presión, tiempo de residencia) y el uso de catalizadores. La optimización de estos parámetros es esencial para maximizar la producción de biocrudo y otros productos de interés, contribuyendo así a la sostenibilidad y rentabilidad de la industria oleícola (Ocampo et al., 2024; Miranda et al., 2021).

## **4. Industria andaluza dedicada a la Licuefacción Hidrotermal (HTL)**

Actualmente, en Andalucía no se registran plantas de generación eléctrica a partir de biomasa que utilicen la tecnología de licuefacción hidrotermal (HTL); la mayoría emplea tecnologías de combustión. Tampoco se han identificado empresas andaluzas especializadas en ofrecer asesoramiento específico para la implementación de plantas de HTL.

## 5. Patentes sobre técnicas dedicadas a la Licuefacción Hidrotermal (HTL)

Tabla 3. Listado de patentes sobre técnicas de Licuefacción Hidrotermal (HTL).

| N.º de publicación | Título  | Solicitantes | Inventores   | Descripción   | Fecha de publicación |
|--------------------|---|--------------|--|---|----------------------|
| ES2976502          | Producción de hidrocarburos a partir de material orgánico reciclado o renovable | Neste Oyj    | Jouni Tournonen;<br>Marina Lindblad; Mats Källdström;<br>Kaisa Lamminpää | Este documento presenta un método optimizado para la producción de hidrocarburos a partir de material orgánico reciclado o renovable, que contiene entre 5 y 30% de oxígeno en forma de compuestos orgánicos y entre 1 y 1000 ppm de fósforo. El proceso comprende varias etapas: (a) proporcionar el material orgánico; (b) opcionalmente, realizar un tratamiento térmico para convertir los compuestos de silicio en formas volátiles; (c) someter el material a craqueo térmico, reduciendo su contenido de oxígeno y fósforo, obteniendo así una fracción de vapor rica en compuestos volátiles y una fracción sólida con menor contenido de oxígeno y fósforo; (d) opcionalmente, eliminar los volátiles de la fracción de vapor; (e) retirar sólidos y precipitados de la fracción sólida craqueada; y (f) someter la fracción sólida a un proceso de hidrotreatment, en presencia de un catalizador, para obtener hidrocarburos con menos del 1% de | 02/08/2024           |

|              |  |                      |                               |   |            |
|--------------|--|----------------------|-------------------------------|---|------------|
|              |  |                      |                               | oxígeno en peso y una cantidad reducida de fósforo.   |            |
| MX2024008492 | Sistemas y métodos para la conversión de una biomasa a biocombustible utilizando una fuente de calor geotérmica. | Premium Oceanic INC. | Tracy McSheery;<br>Perry Beau | Un sistema para convertir una biomasa en un biocombustible que incluye una estación de procesamiento de biomasa configurada para recibir la biomasa de una cosechadora de biomasa, enviar la biomasa a un convertidor de licuefacción hidrotérmica (HTL) y recibir una biomasa procesada del convertidor HTL. El sistema incluye un conducto dispuesto para transportar la biomasa desde la estación de procesamiento de biomasa hasta el convertidor HTL y transportar la biomasa procesada desde el convertidor HTL hasta la estación de procesamiento de biomasa. El convertidor HTL incluye un intercambiador de calor configurado para transferir energía térmica de una fuente de calor geotérmica a la biomasa para convertir la biomasa en la biomasa procesada. El sistema también incluye un controlador configurado para monitorear las condiciones de la biomasa en | 04/07/2024 |

|           |   |                         |  |  |            |
|-----------|---|-------------------------|--|--|------------|
|           |   |                         |  | ubicaciones a lo largo del conducto y ajustar las operaciones de los componentes a lo largo del conducto para, de este modo, ajustar las condiciones de la biomasa en una o más ubicaciones a lo largo del conducto.   |            |
| ES2968392 | Procedimiento de etapas múltiples con licuefacción hidrotérmica | UPM-Kymmene Corporation | Andrea Gutierrez; Pekka Jokela; Roel Westerhof; Sascha Kersten; Bert Heesink | La presente divulgación describe un proceso optimizado para la conversión de materia prima lignocelulósica en productos renovables, mediante una serie de etapas clave. El proceso inicia con el tratamiento de la materia prima lignocelulósica con una solución acuosa para formar una mezcla homogénea. Posteriormente, la mezcla se somete a un calentamiento a temperaturas de 290 a 340 °C y presiones de 90 a 120 bar, generando una primera mezcla de productos. A continuación, se lleva a cabo la separación de las distintas fases: acuosa, oleosa, y opcionalmente gas y sólidos. La fase oleosa obtenida se somete a un segundo calentamiento junto con un disolvente para su posterior refinamiento. Finalmente, el proceso puede incluir una etapa opcional de fraccionamiento, obteniendo así una fracción ligera, una fracción pesada, y, de manera opcional, una | 09/05/2024 |

|           |  |            |   |  |            |
|-----------|--|------------|---|--|------------|
|           |  |            |   | fracción de residuo del fondo y/o una fracción gaseosa.  |            |
| ES2935166 | Proceso para la producción de bioaceite y biogás a partir de biomasa | ENI S.p.A. | Roberta Miglio;<br>Roberto Paglino;<br>Cristian Torri;<br>Alisar Kiwan;<br>Daniele Fabbri | La invención describe un proceso para la producción de combustible líquido y gaseoso a partir de biomasa, que incluye un pretratamiento para homogeneizarla, eliminar impurezas y reducir su tamaño, seguido de una licuefacción hidrotermal subcrítica a temperaturas entre 240°C y 310°C para obtener una fase licuada. Esta fase se somete a una separación que permite dos rutas alternativas: en la primera, la fase acuosa se somete a digestión anaeróbica para generar biogás, mientras que la fase oleosa se divide en bioaceite y residuo sólido; en la segunda, la fase mixta se separa por densidad en fase acuosa, bioaceite y gaseosa, y la fase acuosa resultante se procesa anaeróbicamente para obtener biogás, lodos y otra fase acuosa. | 02/03/2023 |



|           |  |                    |  |   |            |
|-----------|--|--------------------|--|---|------------|
| ES2933451 | Proceso de mejora de hidrocarburos líquidos renovables | Steeper Energy ApS | Steen B. Iversen; Julie Katerine Rodriguez Guerrero; Pedro Rafael Pereira Almao; Monica Bartolini Tiberi; Marianna Isabel Trujillo Vaccari; Lante Antonio Carbognani | La invención describe un proceso catalítico para la mejora de crudo renovable derivado de biomasa y/o residuos, mediante un tratamiento en dos etapas. Primero, el crudo renovable se presuriza entre 60 y 150 bar, se mezcla con hidrógeno y un catalizador heterogéneo en una primera zona de reacción, operando a temperaturas entre 150 °C y 360 °C y con una velocidad espacial horaria de 0.1 a 2.0 h <sup>-1</sup> , obteniendo un crudo parcialmente mejorado que se separa en fracciones ligeras, pesadas, agua y gas. La fracción pesada y el gas de proceso se envían a una segunda zona de reacción, compuesta por reactores en paralelo que operan en dos modos: craqueo catalítico con vapor (a 10-150 bar y 350-430 °C) para mejorar la fracción pesada, y reformado catalítico con vapor (a 0.1-10 bar y 350-600 °C) para producir un gas rico en hidrógeno. La fracción mejorada se separa en productos renovables ligeros, pesados, gas rico en hidrógeno y agua. El hidrógeno recuperado se recicla a la primera zona de reacción, y los reactores alternan entre ambos modos para permitir la regeneración del catalizador, asegurando un proceso | 09/02/2023 |
|-----------|--|--------------------|--|---|------------|

|           |   |            |   |  |            |
|-----------|---|------------|---|--|------------|
|           |   |            |   | continuo y eficiente.  |            |
| ES2847349 | Proceso para la producción de bioaceite a partir de biomasa | ENI S.p.A. | Stefano Carlo Chiaberge;<br>Mauro Burattini;<br>Roberta Miglio;<br>Marina Cabrini | Este proceso optimizado para la producción de bioaceite a partir de biomasa consta de varias etapas clave, comenzando con la preparación de una biomasa con un contenido de proteínas entre 5% y 50%, lípidos entre 5% y 60%, y un pH ajustado entre 4,5 y 10, utilizando como materia prima residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales se someten a una homogeneización preliminar. Posteriormente, la biomasa es procesada mediante licuefacción hidrotermal, a temperaturas de 240°C a 300°C, con presiones superiores a la de vapor de agua y tiempos de residencia de 50 a 270 minutos, obteniendo una mezcla compuesta por una fase oleosa (bioaceite), una fase sólida, una fase gaseosa y una fase acuosa. El proceso se realiza bajo condiciones operativas optimizadas, seleccionadas entre distintos escenarios que maximizan la eficiencia y la calidad del bioaceite obtenido, proporcionando una solución sostenible para la valorización de | 02/08/2021 |

|           |   |  |  |  |            |
|-----------|---|--|--|--|------------|
|           |   |  |  | residuos urbanos.  |            |
| ES2828398 | Procedimiento mejorado de conversión de biomasa algal en un gas o en biocrudo respectivamente por gasificación o licuefacción hidrotermal | Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives | Jonathan Texier;<br>Pierre Castelli;<br>Anne Roubaud | El procedimiento de conversión de biomasa algal en gas o biocrudo para la producción de combustibles líquidos u otros productos de síntesis consta de varias etapas clave: primero, la gasificación o licuefacción hidrotermal de la biomasa en un reactor; luego, la separación del gas o biocrudo generado junto con los efluentes acuosos y el CO <sub>2</sub> ; posteriormente, la recuperación de los efluentes acuosos, que se someten a un proceso de oxidación hidrotermal (OHT) en un segundo reactor bajo condiciones supercríticas. El calor generado en esta etapa de oxidación se reutiliza en el primer reactor para optimizar el proceso de conversión de la biomasa. | 21/12/2015 |

## 6. Proyectos de investigación sobre la tecnología de Licuefacción Hidrotermal (HTL)

Tabla 4. Listado de proyectos de investigación en Andalucía sobre la tecnología de Licuefacción Hidrotermal (HTL).

| Nombre del proyecto                          | Entidades  | Investigadores            | Descripción   | Fecha de ejecución     |
|--|--|---------------------------|---|------------------------|
| <b>BL<sub>2</sub>F: Black Liquor to fuel</b> | Tampere University (Finlandia) <sup>1</sup> ; Brunel University London (Reino Unido); Karlsruhe Institut fuer Technologie (Alemania); SINTEF AS (Noruega); SINTEF Energi AS (Noruega); Paul Scherrer Institut (Suiza); Teknologian Tutkimuskeskus VTT OY (Finlandia); The Navigator Company SA (Portugal); RAIZ - Instituto de Investigacao da Floresta e Papel (Portugal); Valmet Technologies OY (Finlandia); Neste OYJ (Finlandia); Ranido, SRO (Chequia); LGI Sustainable Innovation | Tero Joronen <sup>1</sup> | El proyecto Black Liquor to Fuel (BL <sub>2</sub> F) tiene como objetivo convertir el licor negro, un subproducto de la industria papelera, en un biocombustible limpio y de alta calidad, reduciendo los desechos y proporcionando una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. Lanzado en abril de 2020, BL <sub>2</sub> F desarrollará el primer proceso integrado de licuefacción hidrotermal (HTL) en plantas de celulosa, lo que permitirá reducir significativamente las emisiones de carbono durante la producción de combustible intermedio. Este producto será posteriormente refinado en instalaciones petroleras para su uso en combustibles marítimos y de aviación, con el potencial de lograr una reducción del 83% de CO <sub>2</sub> en comparación con los combustibles convencionales. | 1/04/2020 – 31/03/2024 |

|                    |  |   |   |                           |
|--------------------|--|---|---|---------------------------|
|                    | (Francia).   |   |   |                           |
| <b>BIOGASOLANA</b> | Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) (España);<br>Universidad Pública de Navarra (UPNA) (España) | Pedrorena Apezteguía, Iván;<br>Grande López, Lucía; Torrez-Herrera, Jonathan Josué;<br>Korili, Sofía A.; Gil Bravo, Antonio | El proyecto BIOGASOLANA ha demostrado la viabilidad del proceso de licuefacción hidrotermal (HTL) para la producción de biocombustibles líquidos avanzados a partir de bio-residuos, concretamente lodos de depuradora. El proceso genera un bio-crudo que requiere un posterior upgrading o co-procesamiento en refinerías para su conversión en biocombustibles como bio-gasolina, bio-queroseno y bio-diésel. Desarrollado en tres fases a lo largo de 30 meses, el proyecto incluyó ensayos en discontinuo para la producción de bio-crudo (Fase 1), su caracterización y evaluación de mejoras (Fase 2), y la conversión de la unidad de HTL en un sistema continuo a TRL 4 (Fase 3). Los resultados obtenidos han validado la obtención de un bio-crudo con características adecuadas para su refinado, logrando una reducción significativa del contenido de nitrógeno en muestras pretratadas. El proyecto ha sentado las bases | 1/01/2020 –<br>31/12/2022 |

|   |                       |   |  |            |
|---|-----------------------|---|--|------------|
|   |                       |   | para el diseño y construcción de una planta piloto en continuo a TRL 5, actualmente en fase de puesta en marcha en el centro BIO <sub>2</sub> C de CENER. Se ha definido un protocolo de mejora para el bio-crudo y se han seleccionado los catalizadores más adecuados.   |            |
| <b>PRODUCCIÓN DE BIOCRUDO MEDIANTE LICUEFACCIÓN HIDROTHERMAL CATALÍTICA DE BIOMASA DE DISTINTA NATURALEZA</b> | Universidad de Málaga | María Concepción Herrera Delgado; Luis Alemany; Marina Cortes; Ma. Ángeles Larrubia; Sergio Molina; Carlos A. Moreira; Essounani Sofia. | Se ha estudiado la licuefacción hidrotermal (HTL) para la producción de combustibles a partir de biomásas de distinta naturaleza, utilizando un reactor a presión con agitación en condiciones subcríticas a 280°C durante 1 hora. Se evaluaron cinco biomásas: tres con alto contenido de lignina (bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz y cáscara de piñón) y dos con alto contenido en lípidos (semillas de Yellow Horn y microalgas Scenedesmus Al. parcialmente desgrasadas). La licuefacción hidrotermal asistida catalíticamente con Ni-Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> reducido alcanzó un rendimiento de biocrudo del 95% utilizando microalgas, con un poder calorífico (HHV) entre 30 y 55 MJ·kg <sup>-1</sup> , dependiendo de la biomasa. La presencia del catalizador favorece reacciones en tándem, incluyendo reformado de glicerol en fase acuosa, hidrogenación y desoxigenación, lo que permite obtener compuestos de cadena larga, más saturados y con menor contenido de | 01/07/2023 |

|                         |  |  |   |                        |
|-------------------------|--|--|---|------------------------|
|                         |  |  | oxígeno, haciendo viable su uso como biocombustible.  |                        |
| <b>Cepsa Microalgae</b> | Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) (España) <sup>1</sup> ; Centro de Investigación de Cepsa (España) <sup>2</sup> . | Panadero, Asier <sup>2</sup> ; Larraz, Rafael <sup>2</sup> ; Megías, Gabriel <sup>1</sup> ; Frontela, Joana <sup>2</sup> ; Piernavieja, Gonzalo <sup>1</sup> | El proyecto Cepsa Microalgae, desarrollado por Cepsa y el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), tiene como objetivo la producción de biocombustibles sostenibles a partir de microalgas, contribuyendo a la descarbonización del transporte terrestre, marítimo y aéreo. Lanzado en enero de 2023, el proyecto busca demostrar la viabilidad técnica y económica del cultivo de microalgas como materia prima para la producción de combustibles renovables en los Parques Energéticos de Cepsa, integrando su producción en procesos industriales existentes. El proyecto se centra en la optimización del cultivo, cosecha y transformación de microalgas, aprovechando su capacidad para capturar CO <sub>2</sub> y generar aceites renovables de alto valor energético. Mediante tecnologías innovadoras, se pretende escalar la producción de biocombustibles avanzados que puedan sustituir a los combustibles fósiles en sectores difíciles de electrificar, como la aviación y el transporte marítimo. | 1/01/2023 – 30/09/2024 |

## 7. Bibliografía

- Akhtar, J., & Amin, N. S. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5101-5109.
- Arun, J., Varshini, P., Prithvinath, P. K., Priyadarshini, V., & Gopinath, K. P. (2018). Enrichment of bio-oil after hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae *C. vulgaris* grown in wastewater: Bio-char and post HTL wastewater utilization studies. *Bioresource Technology*, 261, 182-187.
- Buzzian Salmi, S. (2022). *Producción de bio-oil a partir de alperujo utilizando la tecnología HTL* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.
- Chan, Y. H., Yusup, S., Quitain, A. T., Tan, R. R., Sasaki, M., Lam, H. L., & Uemura, Y. (2015). Effect of process parameters on hydrothermal liquefaction of oil palm biomass for bio-oil production and its life cycle assessment. *Energy Conversion and Management*, 104, 180-188.
- Delgado, M. C. H., Alemany, L., Cortes, M., Larrubia, M. Á., Molina, S., Moreira, C. A., & Sofia, E. (2022). Producción de Biocrudo mediante Licuefacción Hidrotermal Catalítica de Biomasa de Distinta Naturaleza.
- Deng, H., Lin, L., & Liu, S. (2010). Catalysis of Cu-doped Co-based perovskite-type oxide in wet oxidation of lignin to produce aromatic aldehydes. *Energy & fuels*, 24(9), 4797-4802.
- Gómez, E. A., Osorio, A., Ocampo, D., & Ríos, L. A. (2019). Optimización de la Producción de Biocrudo mediante Licuefacción Hidrotermal Catalizada de Buchón de Agua. *Información tecnológica*, 30(5), 147-160.
- Kang, S., Li, X., Fan, J., & Chang, J. (2013). Hydrothermal conversion of lignin: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 546-558.
- Kumar, M., Oyedun, A. O., & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1742-1770.
- Miranda, A. M., Sáez, A. A., Hoyos, B. S., Gómez, D. A., & Vargas, G. J. (2021). Improving microalgal biomass production with industrial CO<sub>2</sub> for bio-oil obtention by hydrothermal liquefaction. *Fuel*, 302, 121236.
- Miyata, Y., Sagata, K., Yamazaki, Y., Teramura, H., Hirano, Y., Ogino, C., & Kita, Y. (2018). Mechanism of the Fe-assisted hydrothermal liquefaction of lignocellulosic biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(44), 14870-14877.
- Ocampo, D., Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Vargas, G. J. (2024). Effects of the use of acetone as co-solvent on the financial viability of bio-crude production by



- hydrothermal liquefaction of CO<sub>2</sub> captured by microalgae. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 89, 102960.
- Ocampo, E., Beltrán, V. V., Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Ocampo, D. (2023). Hydrothermal liquefaction process: Review and trends. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 7, 100382.
- Perkins, G., Batalha, N., Kumar, A., Bhaskar, T., & Konarova, M. (2019). Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109400.
- Rana, B. S., Singh, B., Kumar, R., Verma, D., Bhunia, M. K., Bhaumik, A., & Sinha, A. K. (2010). Hierarchical mesoporous Fe/ZSM-5 with tunable porosity for selective hydroxylation of benzene to phenol. *Journal of Materials Chemistry*, 20(39), 8575-8581.
- Remón, J., Latorre Viu, J., Pinilla Ibarz, J. L., & Suelves Laiglesia, I. (2019). Producción de bio-combustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotermal de pericarpios de almendra.
- Sharma, K., Castello, D., Haider, M. S., Pedersen, T. H., & Rosendahl, L. A. (2021). Continuous co-processing of HTL bio-oil with renewable feed for drop-in biofuels production for sustainable refinery processes. *Fuel*, 306, 121579.
- SundarRajan, P., Gopinath, K. P., Arun, J., GracePavithra, K., Joseph, A. A., & Manasa, S. (2021). Insights into valuing the aqueous phase derived from hydrothermal liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111019.
- Terroba Parrado, R. (2023). Estudio de la licuefacción hidrotérmica de biomasa algal para la producción de biocrudo y dimensionamiento de una planta piloto para la LHT de la biomasa algal seleccionada (Bachelor's thesis).
- Toor, S. S., Rosendahl, L., & Rudolf, A. (2011). Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. *Energy*, 36(5), 2328-2342.
- Withrow, G. (1967). Metabolism of selenium-75 in the erythrocyte of growing sheep and swine.
- Xu, C., & Lad, N. (2008). Production of heavy oils with high caloric values by direct liquefaction of woody biomass in sub/near-critical water. *Energy & Fuels*, 22(1), 635-642.
- Yilgin, M., & Pehlivan, D. (2004). Poplar wood–water slurry liquefaction in the presence of formic acid catalyst. *Energy conversion and management*, 45(17), 2687-2696.
- Zhu, Z., Toor, S. S., Rosendahl, L., Yu, D., & Chen, G. (2015). Influence of alkali catalyst on product yield and properties via hydrothermal liquefaction of barley straw. *Energy*, 80, 284-292.