

Producción de biocombustibles en Costa Rica utilizando licuefacción hidrotérmica de biomasa: estimación preliminar de su potencial y huella de carbono

Biofuels production in Costa Rica utilizing hydrothermal liquefaction of biomass: preliminary estimation of its potential and carbon footprint

Susana Solórzano-Jiménez¹, susana.solorzano@ucr.ac.cr,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-9064-5037>

Natalia Montero-Rambla¹, natalia.monterorambla@ucr.ac.cr,

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0004-2896-2321>

Jessica Roccard-Pommerá^{1,2}, jessica.roccard@ucr.ac.cr,

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0001-3502-8746>

Esteban Durán-Herrera^{1*}, esteban.duranherrera@ucr.ac.cr,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-7382-0454>

Resumen

[Objetivo] Estimar el potencial de producción de biocombustibles a partir de la licuefacción hidrotérmica (LHT) de residuos biomásicos en Costa Rica y su respectiva huella de carbono. **[Metodología]** Se estimó el potencial de generación de residuos de biomasa que pueden ser aprovechados para la producción de biocombustibles mediante el proceso de LHT utilizando informes de diferentes instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería, la Cámara de Avicultores, Acueductos y Alcantarillados, entre otros. Posteriormente, mediante modelos matemáticos que predicen el rendimiento de biocrudo según el tipo de biomasa utilizado, se estimó el potencial de la posible producción de biocrudo y su respectivo mejoramiento a biodiésel y sus co-productos (biogasolina y biobúnker). Estos datos se compararon con el consumo actual de combustibles en Costa Rica. Por último, se calculó la huella de carbono del proceso de producción de estos biocombustibles utilizando la norma ISO 14067. **[Resultados]** Se obtuvo que Costa Rica posee, bajo las suposiciones de este estudio, un potencial de producción de biocrudo, biodiésel, biogasolina y biobúnker de 1 383 299 ton/año, 635 788 ton/año, 295 336 ton/año y 70 140 ton/año, respectivamente. Así mismo, se estimó que las huellas de carbono asociadas a la producción de biodiésel, biogasolina y biobúnker son 14,57 gCO_{2eq}/MJ, 13,88 gCO_{2eq}/MJ y 13,33 gCO_{2eq}/MJ, respectivamente. **[Conclusiones]** Se concluyó, bajo las suposiciones de este estudio, que en Costa Rica existe un potencial de reemplazo de combustibles fósiles del 71 %, 43 % y 76 % para biodiésel, biogasolina y biobúnker, respectivamente. También, se estimó que por medio de esta tecnología (LHT) se podría reducir un 18 %, 36 % y 6 % la huella de carbono al utilizar biodiésel, biogasolina y biobúnker, respectivamente, en lugar de sus correspondientes combustibles fósiles.

Palabras clave: biocombustibles; biomasa; huella de carbono; licuefacción hidrotérmica; residuos.

* Autor para correspondencia

¹ Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

² Centro de Investigación Observatorio del Desarrollo, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Abstract

[Objective] Estimate the production potential of biofuels from the hydrothermal liquefaction (HTL) of biomass residues in Costa Rica and their respective carbon footprint. **[Methodology]** The generation potential of biomass residues suitable to produce biofuels through the HTL process was estimated using reports from different institutions such as the Ministry of Agriculture and Livestock, Chamber of Poultry Farmers, Aqueducts and Sewers, among others. Then, using mathematical models that predict the biocrude yield according to the type of biomass being used, the production potential of biocrude and its respective upgrade to biodiesel and its co-products (biogasoline and biobunker) was estimated. These results were compared with current fuel consumption in Costa Rica. Finally, the carbon footprint for the production process of these biofuels was calculated using the ISO 14067 standard **[Results]** It was found that Costa Rica has, under the assumptions of this study, a production potential of biocrude, biodiesel, biogasoline, and biobunker of 1 383 299 tons/year, 635 788 tons/year, 295 336 tons/year, and 70 140 tons/year, respectively. In addition, it was estimated that the carbon footprints associated with the production of biodiesel, biogasoline, and biobunker are 14,57 gCO_{2eq}/MJ, 13,88 gCO_{2eq}/MJ, and 13,33 gCO_{2eq}/MJ, respectively. **[Conclusions]** Under the assumptions of this study, it was concluded that Costa Rica has a potential replacement of fossil fuels of 71 %, 43 % and 76 % for biodiesel, biogasoline, and biobunker, respectively. Also, it was estimated that by developing this technology (LHT), the carbon footprint could be reduced by 18 %, 36 %, and 6 % when using biodiesel, biogasoline, and biobunker, respectively, instead of the corresponding fossil fuels.

Keywords: biofuels; biomass; carbon footprint; hydrothermal liquefaction; residues.

Introducción

Todas las actividades humanas generan algún tipo de impacto en el ambiente, por lo que afectan al planeta. Entre estos impactos, se pueden resaltar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales intensifican el efecto invernadero, lo que a su vez genera un aumento en la temperatura promedio de la Tierra (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). De acuerdo con el II Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2019), en Costa Rica se emiten por año aproximadamente 10 882 Gg CO_{2eq}, de los cuales un 54 % (5 876 Gg CO_{2eq}) corresponden a los gases emitidos por el sector transporte, siendo esta la segunda fuente de generación de GEI. Por otro lado, el manejo de los residuos sólidos tiene un aporte del 5,8 % (631 Gg CO_{2eq}), con lo cual es la quinta actividad con mayor aporte a las emisiones de GEI. Por lo tanto, se puede concluir que el transporte y el manejo de residuos sólidos son actividades con un aporte importante a la generación de GEI y que si se desea mitigar su contribución al calentamiento global del planeta se deben tomar medidas correctivas en estas dos actividades humanas. Es por esto que la producción y uso de combustibles renovables a partir de desechos biomásicos representaría una gran opción para el país, tanto en el ámbito ambiental (menores emisiones de CO₂), como económico (independencia energética y disminución de la factura petrolera). En comparación con los combustibles fósiles, los biocombustibles ofrecen las siguientes ventajas (Cao et al., 2017): (I) son renovables porque provienen de plantas que almacenan energía solar, (II) su combustión presenta emisiones netas de CO₂ cercanas a cero y bajas en SO_x y NO_x, y (III) la biomasa es universal y abundante.

En Costa Rica existe una gran variedad de actividades que producen residuos orgánicos, entre ellas las actividades agrícolas, las actividades pecuarias, los sistemas de tratamientos de aguas residuales, la disposición final de alimentos, entre otros. Por ejemplo, Chacón et al. (2018) reportan que existen aproximadamente 6,03 millones de toneladas de biomasa (base seca) disponibles por año, de las cuales 2,71 millones de toneladas corresponden al sector agrícola y 2,05 millones de toneladas son del sector pecuario.

En las últimas décadas, la utilización de biomasa se ha centrado principalmente en su gasificación para la generación de electricidad, la producción de briquetas de combustible, la fermentación a etanol, la producción de biodiesel a partir de aceites y grasas, y la conversión termoquímica a combustibles líquidos. Dentro de este último grupo, la licuefacción hidrotérmica (LHT) es una tecnología que ha despertado gran interés para la producción de biocombustibles a partir de múltiples tipos de biomasa (residuos agrícolas y forestales, lodos de plantas de tratamiento de aguas, microalgas, algas marinas, desechos orgánicos urbanos, etc.). La LHT de biomasa proporciona varias ventajas sobre las otras tecnologías. En primer lugar, este proceso trabaja con la biomasa húmeda, por lo que no requiere del secado térmico previo necesario en otras tecnologías (por ejemplo, gasificación o pirólisis), resultando en una reducción considerable de los costos de producción. En segundo lugar, el medio de reacción típico consiste únicamente en agua caliente y presurizada, sin el requerimiento de otros productos químicos; esto hace que el proceso sea versátil y amigable con el medio ambiente (Cao et al., 2017). En términos generales, la LHT representa una alternativa para la síntesis de biocombustibles con un posible ahorro energético, mitigación de emisiones de GEI y valorización de residuos orgánicos (Martín Gil, 2009).

La LHT consiste en la fragmentación/depimerización catalizada de las macromoléculas presentes en biomasa, tales como: lignina, celulosa, proteínas y lípidos. Como resultado de este proceso se obtiene un biocrudo, el cual se caracteriza por tener una apariencia aceitosa y viscoso (Ramos & Gil, 2017). Esta tecnología ha mostrado tener un gran potencial debido a que es más sustentable; sin embargo, aún enfrenta dificultades importantes como por ejemplo la variación en la composición química y las propiedades físicas de su materia prima (biomasa), así como la posible presencia de contaminantes y el uso de altas temperaturas y presiones (Perkins et al., 2019). En cuanto a las variables que afectan este proceso, se puede listar las siguientes: la composición química de la materia prima, la temperatura (usualmente entre 300 °C y 350 °C), presión (entre 5 MPa y 20 MPa), la presencia de catalizadores (por ejemplo NaCO₃, K₂CO₃, KOH, NaOH, Pd/C, Pt/C, Ru/C, CoMo/Al₂O₃, Ni/(SiO₂-Al₂O₃)), tiempo de retención (entre 10 min y 60 min comúnmente) y la relación sólido/líquido (típicamente entre 10 % y 20 %) (Castro Vega, 2011; Dimitriadis & Bezergianni, 2017; Hassan et al., 2018; Matayeva et al., 2019).

El biocrudo producido mediante LHT, al igual que el crudo de petróleo, debe ser sometido a un mejoramiento/afinamiento para generar combustibles líquidos aptos para ser utilizados en los motores de combustión interna. Algunos de los principales retos que enfrentan los biocrudos de LHT son: niveles de pH bajos, viscosidades altas, calor de combustión inferior al de los combustibles fósiles y poca estabilidad. Estas características dificultan el uso directo del biocrudo como combustible, por ejemplo, niveles bajos de pH ocasionarían corrosión en motores y otros equipos (Ahamed et al., 2021; Baloch et al., 2018; Hansen et al., 2020; Sanna & Abd Rahman, 2015). Con el fin de que el biocrudo tenga características similares a los combustibles tradicionales se han desarrollado diversos procesos que permiten modificar propiedades físicas (densidad y viscosidad) y químicas

(calor de combustión y composición elemental) del biocrudo. La gran mayoría de los procesos de mejoramiento fueron basados en las técnicas desarrolladas para mejorar biocrudos sintetizados por medio de pirólisis, o técnicas que actualmente se utilizan para mejorar el crudo de petróleo, ya que estos poseen un comportamiento similar (Ramirez et al., 2015). Sin embargo, estudios recientes han propuesto nuevas metodologías para mejorar biocrudos; esto con el propósito de eliminar las limitaciones de los métodos más estudiados (Ahamed et al., 2021; Hansen et al., 2020; Kumar & Strezov, 2021). En la figura 1 se muestra un resumen de los productos de la técnica de licuefacción hidrotérmica y las posibles rutas de mejoramiento para biocrudos que se han reportado recientemente en literatura.

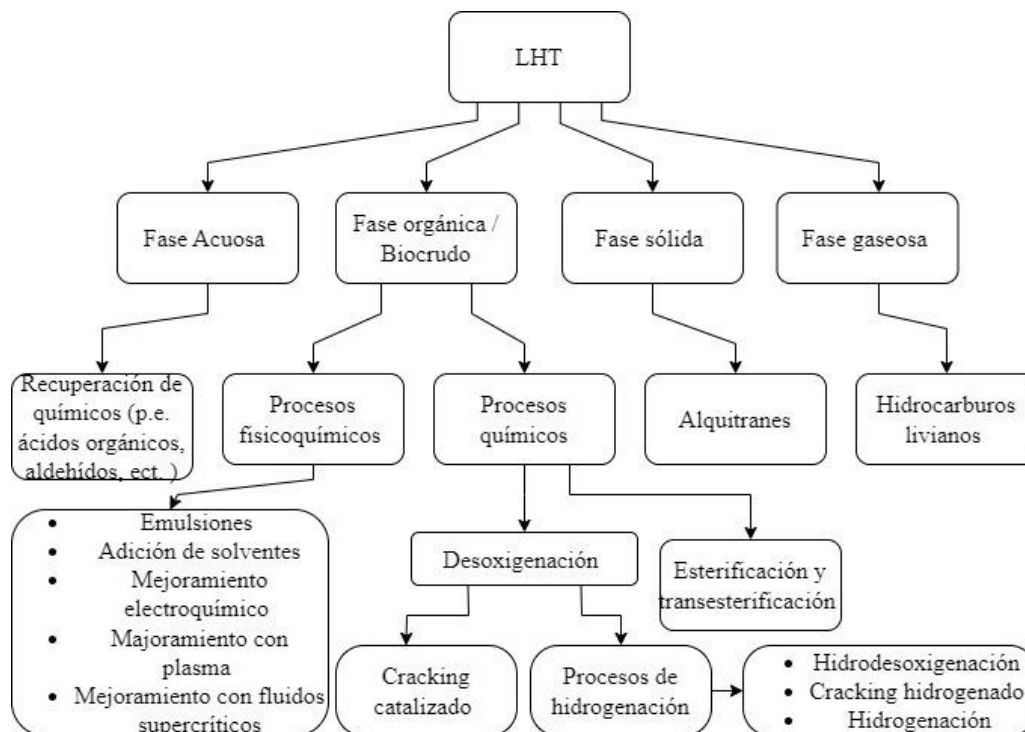


Figura 1. Mapa conceptual de los productos de proceso de LHT y sus opciones para mejorar el biocrudo. Elaboración propia

La huella de carbono se entiende como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes, y sirve como una útil herramienta de gestión para conocer o comparar las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar nuestras emisiones, cómo podemos mejorarlas y realizar un uso más eficiente de los recursos (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2021). De esta manera, el determinar la huella de carbono de biocombustibles es importante porque permite evaluar su impacto ambiental y compararlo con el de los combustibles fósiles tradicionales, permitiendo entender si realmente son una alternativa más sostenible. Esta información es crucial para tomar decisiones informadas y avanzar hacia opciones energéticas más limpias y amigables con el medio ambiente.

En Costa Rica se han desarrollado varias investigaciones en las cuales se ha evaluado la producción de biocrudo mediante LHT utilizando diversas biomásas disponibles en el país,

específicamente rastrojo de piña, raquis de banano, pulpa de café y sargazo marino (Crespo-Delgado, 2022; Escalante-Castro, 2021; Santamaría-Chinchilla, 2022; Ulate-Sancho, 2020) obteniéndose rendimientos muy alentadores entre un 25 % y 45 % en base seca. Esto motivó a realizar la presente investigación, donde se estimó preliminarmente el potencial de producción de biocombustibles (biocrudo y su posterior mejoramiento a biodiésel, biogasolina y biobúnker) a partir de la licuefacción hidrotérmica (LHT) de residuos biomásicos en Costa Rica, así como el cálculo de su respectiva huella de carbono utilizando la norma ISO 14067. Es importante aclarar que el potencial de producción se entiende como la cantidad máxima “ideal” que se podría producir si se lograra aprovechar el 100 % de los residuos de biomasa generados en el país; al ser un valor “ideal”, permite establecer una referencia sobre cuál podría ser el impacto del aprovechamiento de esta tecnología en el país.

Metodología

Estimación del potencial de producción de residuo biomásicos en Costa Rica:

Con el fin de cuantificar la cantidad de biomasa residual producida en Costa Rica, se aplicaron las metodologías descritas por Chacón et al. (2018) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2012). Estas metodologías fueron aplicadas a todas las actividades agropecuarias reportadas en el Ministerio de Agricultura y Ganadería. Para otros tipos de residuos orgánicos como los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), recortes de aserraderos y los residuos orgánicos domésticos se consultó directamente la entidad responsable, es decir, Acueductos y Alcantarillados, Oficina Nacional Forestal y municipalidades, respectivamente.

Identificación de residuos biomásicos predominantes en Costa Rica: Con la información recabada en la sección anterior y con el objetivo de centrar la investigación en los residuos con mayor volumen de generación, se construyó un gráfico de Pareto para aplicar la regla 80/20 y así identificar las actividades generadoras de residuos más relevantes.

Caracterización de residuos biomásicos predominantes: Después de identificar los residuos con mayor importancia de generación, se procedió a recompilar información reportada de su composición química (celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, lípidos y carbohidratos) y se calcularon intervalos de confianza al 95 % para cada componente, determinándose el valor central de cada intervalo con el fin de estimar valores representativos de la composición química de cada residuo de interés.

Estimación del potencial de producción de biocrudo en Costa Rica: Se realizó una búsqueda bibliográfica de modelos matemáticos que permiten estimar el rendimiento de biocrudo producido mediante LHT a partir de los valores promedios de la composición química de la biomasa utilizada. Los modelos identificados se compararon utilizando criterios como la aplicabilidad a los residuos biomásicos estudiados, el ajuste del modelo a los datos experimentales y las condiciones de reacción de la LHT. Por medio de esta comparación se seleccionó el modelo con mayor aplicabilidad a cada residuo estudiado y se procedió con la estimación del potencial de producción de biocrudo para cada residuo.

Selección de ruta de mejoramiento de biocrudo: Para completar esta sección, se realizó una investigación bibliográfica sobre las técnicas disponibles para mejorar el biocrudo. Las rutas de mejoramiento identificadas se compararon enfocándose en puntos como madurez de la tecnología, rendimiento de biocombustibles, costo asociado, impacto ambiental y condiciones de operación. Una vez seleccionada la mejor ruta, se estimó un

rendimiento promedio según lo reportado en la literatura, considerando que las condiciones de operación fuesen las óptimas, o muy cercanas a estas. Por último, se estimó el volumen de producción de biocrudo mejorado y sus co-productos (fase acuosa y fase orgánica).

Estimación del potencial de biodiésel en Costa Rica: Con el fin de conocer la cantidad posible de biocrudo mejorado que corresponde a biodiésel y a otros coproductos (gasolina y búnker), se propuso un sistema de destilación para separar los biocombustibles en las fracciones deseadas. Como primer paso se asumió una composición química representativa de un biocrudo mejorado por la ruta seleccionada anteriormente. Luego, se simuló el sistema de destilación en el programa COCO. Dicho simulador aplica las ecuaciones MESH (método riguroso) para dar solución a los procesos de destilación. En la simulación se utilizó un paquete termodinámico de condiciones ideales (ley de Raoult y entalpía ideal), también se asumió que las columnas se comportaban adiabáticamente. Para la primera torre de destilación se utilizó un sistema de 50 platos, una presión de 370 kPa y 1-etenil-4-etil benceno y 1,3-dimetiladamanto como componentes clave, ligero y pesado, respectivamente. En cuanto a la segunda torre, se utilizó un sistema de 20 platos, presión atmosférica y 4-metilfenantreno e indeno[1,2,3-cd]pireno como componentes clave, ligero y pesado, respectivamente.

Cuantificación de huella de carbono: se aplicó la metodología de la norma ISO 14067, para la cual se definieron los siguientes parámetros:

1. Unidad funcional: $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{combustibles}}$.
2. Límites del sistema: El enfoque utilizado se le conoce como ‘De puerta a puerta’. En la figura 2 se pueden ver las etapas del proceso que se encuentran dentro de los límites del sistema y las operaciones unitarias que corresponden a cada etapa. Este estudio se limitó geográficamente a Costa Rica.
3. Requisitos de calidad: Se estableció que los datos utilizados en esta investigación fueran de reportes técnicos presentados por el *National Renewable Energy Laboratory*, documentos de instituciones gubernamentales como: la Secretaria de Planificación del Subsector de Energía, el Ministerio de Agricultura y Ganadería, la Cámara de Avicultores, Acueductos y Alcantarillados, artículos científicos, especificaciones en manuales de equipos presentados por fabricantes industriales, recomendaciones de expertos del sector, entre otros similares. De esta manera se favoreció la representatividad, reproducibilidad, precisión y coherencia del estudio. Por otro lado, se priorizó el uso de datos que sean aplicables a la realidad nacional, por ejemplo: los factores de emisión reportados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN).
4. Límite temporal de datos: base anual para ser consistentes con los ciclos de las actividades agrícolas, que a su vez son las productoras de la materia prima de este proceso.
5. Procedimiento de asignación: se realizó con base al contenido energético.
6. Limitaciones del estudio: se omiten las etapas de transporte de materias primas y distribución de los combustibles. También, el estudio de huella de carbono se limita únicamente a la producción de GEI, por lo que otros impactos ambientales (por ejemplo, uso de recursos naturales) no se toman en consideración.

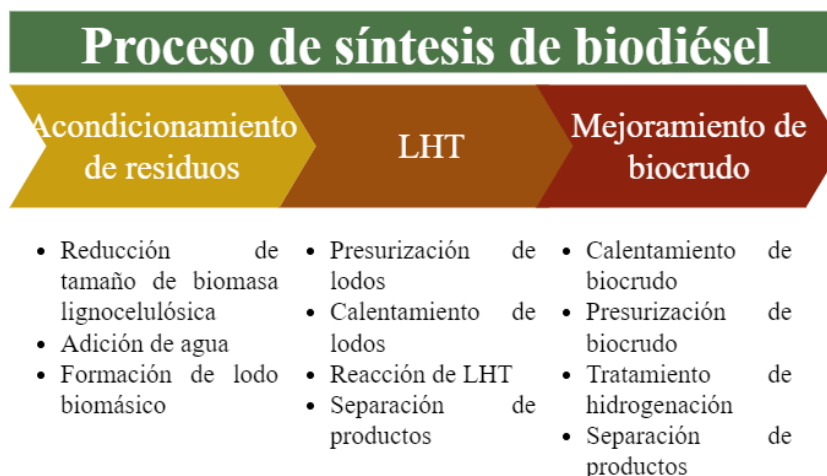


Figura 2. Límites del sistema para estudio de huella de carbono. Elaboración propia.

Análisis y resultados

A partir de la compilación de información y los cálculos realizados para estimar las tasas de producción de residuos biomásicos en Costa Rica según la actividad que los genera, se procedió a construir el gráfico de Pareto de la gráfica 1. Esta gráfica permite seleccionar objetivamente las actividades con mayor impacto en la generación de residuos biomásicos al utilizar la regla 80/20; es decir, limitar el estudio al 20 % de las actividades que son responsables del 80 % de los residuos generados en el país. Tal como se puede comprobar en la gráfica 1, las actividades que conforman el 80 % de la biomasa generada son: caña de azúcar (bagazo, cachaza y residuos de campo), ganadería vacuna (excretas), banano (pinzote, vástago y rechazo), piña (rastroyo y corona), residuos urbanos (fracción orgánica), porcicultura (excretas), ganadería de leche (excretas) y palma aceitera (fibra de mesocarpio, cascarilla de coquito y fibra de pinzote). Este resultado es similar a lo reportado por Chacón et al. (2018).

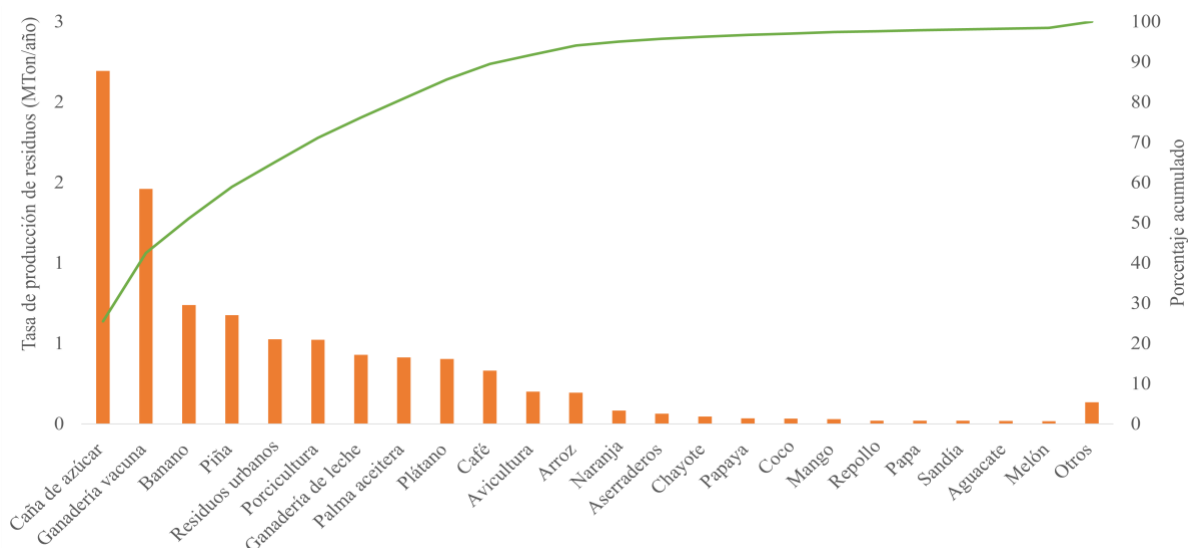
Luego de establecer cuáles son las biomásas en las que se enfoca el estudio, se procedió a realizar la estimación de la composición típica de las mismas. Debido a la alta variabilidad de los materiales orgánicos es complicado conseguir un valor único, por lo que se procedió a calcular intervalos de confianza de los cuales se tomó el valor más probable (valor central) para realizar las posteriores estimaciones matemáticas. Los valores centrales obtenidos se reportan en la tabla 1.

Para la selección de los modelos matemáticos de estimación del rendimiento del proceso de LHT, se analizaron catorce modelos reportados en la literatura (Aierzhati et al., 2019; Biller & Ross, 2011; Déniel et al., 2017; Hietala et al., 2017; Leow et al., 2015; Li et al., 2017; Lu et al., 2018; Palomino et al., 2019; Shakya et al., 2017; Sheng et al., 2018; Teri et al., 2014; Wagner et al., 2016; Yang et al., 2018) utilizando criterios como la aplicabilidad a los residuos biomásicos estudiados, el ajuste del modelo a los datos experimentales, las condiciones de reacción de la LHT y si se realizaron pruebas de validación. Luego de dicho análisis se concluyó que para el cálculo con materiales lignocelulósicos y excretas de

actividades pecuarias, el modelo más favorable es el de Déniel et al. (2017), ya que se desarrolló bajo condiciones de operación comparables, tiene un ajuste de 0,988 y reporta buenas aproximaciones para estos materiales por medio de la validación. Respecto a los residuos urbanos y el banano de rechazo se considera que el modelo propuesto por Aierzhati et al. (2019) es el que daría un resultado más confiable, puesto que es el que cumple adecuadamente con los todos los criterios de selección para este tipo de material.

Gráfica 1

Gráfico de Pareto de las actividades generadoras de residuos biomásicos en Costa Rica conforme a su tasa de producción. 2022.



Nota: Fuente propia de la investigación.

Tabla 1

Valores centrales de composición química estimada para los residuos biomásicos predominantes en Costa Rica. 2022.

Residuos	Tipo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Lípidos	Protéina	Carbohidratos
Caña de azúcar	Bagazo	41	27	21	5	2	68
	Cachaza	11	19	9	8	4	30
	Rastrojo	37	29	23	8	6	66
Banano	Pinzote	31	16	11	10	4	47
	Vástago	45	14	15	4	4	59
	Banano rechazo	-	-	-	1	4	25
Piña	Rastrojo	61	20	12	5	9	81
	Corona	42	19	12	3	5	61
Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	33	30	26	9	4	63

	Cascarilla de coquito	24	22	51	5	3	46
	Fibra del pizote	39	27	22	7	4	65
Residuos orgánicos urbanos	Domésticos	4	5	12	11	13	43
	Residuos de madera y jardines	25	18	19	5	4	42
Porcicultura	Excreta	13	16	6	12	18	37
Ganadería de leche	Excreta	21	20	12	4	13	35
Ganadería de carne	Excreta	21	20	15	7	12	36

Nota: Fuente propia de la investigación.

Con ayuda de estos modelos se estimó el potencial de producción de biocrudo de los residuos seleccionados, esta información se muestra en la tabla 2. Es de importancia resaltar que las 1 383 299 ton/año de biocrudo estimadas no contemplan pérdidas que se podrían generar en el proceso de LHT, así como la fracción de residuos retenidos por los mismos productores debido a que actualmente se les dan otro uso, sino que los cálculos se basan en la cantidad de materia total disponible.

Tabla 2

Resultados del cálculo del potencial de producción de biocrudo para los residuos biomásicos seleccionados. 2022.

Residuos orgánicos	Biocrudo (ton/año)
Caña de azúcar	459 938
Banano	164 304
Piña	133 638
Palma aceitera	102 474
Residuos urbanos	155 264
Porcicultura	100 719
Ganadería de leche	46 400
Ganadería vacuna	220 562
Total	1 383 299

Nota: Fuente propia de la investigación.

Posteriormente, fue necesario seleccionar el proceso de mejoramiento de biocrudo más conveniente para este estudio. De los diferentes procesos identificados y listados en la figura 1, se descartaron los procesos fisicoquímicos de mejoramiento electroquímico, con plasma, mediante emulsión y adición de solventes o fluidos supercríticos, ya que con estos no se generan productos similares a los biocombustibles deseados, o al menos no con las capacidades requeridas. Por lo tanto, se realizó una comparación de los procesos de cracking, hidrogenación, esterificación y transesterificación, de acuerdo con los siguientes criterios: sus condiciones de operación, el rendimiento de biodiésel obtenido, los costos de capital y de operación, el impacto ambiental y la madurez de la tecnología. Del análisis se concluyó que la ruta más adecuada para la síntesis de biodiésel (principalmente) y otros

biocombustibles, es mejorando el biocrudo mediante hidrogenación, ya que a pesar de que esta es considerada la tecnología con condiciones de operación más demandantes y muestra tener un costo más elevado, sus otras características como nivel de madurez, impacto ambiental y rendimiento de biodiésel son determinantes a la hora de seleccionar una ruta de mejoramiento.

Una vez definida la tecnología de mejoramiento, se procedió a estimar las cantidades de productos (fase oleosa, fase acuosa y fase gaseosa) que se obtendrían de la hidrogenación del biocrudo, utilizando como referencia los resultados publicados por Snowden-Swan et al. (2016); Yu et al. (2017) y Zhu et al. (2015). En estos estudios se utilizaron biocrudos sintetizados únicamente a partir de materiales lignocelulósicos, bajo condiciones de reacción típicas (350 °C, 10 MPa, 228 mol H₂/kg de biocrudo y un catalizador de Co–Mo soportado en Al₂O₃). A pesar de que esto podría generar algún nivel de desviación en el cálculo, ya que el biocrudo de este estudio se genera utilizando también excretas de animales y residuos domésticos, hay una falta de estudios relacionados con la hidrogenación de biocrudos producidos a partir de esas otras materias primas. Para realizar esta estimación, se multiplicó la cantidad total de biocrudo calculado (1 383 299 ton/año) por cada dato de rendimiento reportado en las referencias mencionadas. Estos resultados se pueden apreciar en la tabla 3.

Tabla 3

Resultados del cálculo de productos generados por la hidrogenación del biocrudo estimado. 2022.

Productos	Rendimiento promedio (kg producto/kg biocrudo)	Producción (ton/año)
Fracción oleosa	0,7225	999 406
Fracción acuosa	0,2319	320 815
Fracción gaseosa	0,0456	63 078

Nota: Fuente propia de la investigación.

La fracción oleosa producida de la hidrogenación del biocrudo es la fracción de interés, ya que es la mezcla de biocombustibles (gasolina, diésel y componentes pesados) que requieren ser separados mediante operaciones de destilación. Con la finalidad de diseñar el sistema de separación se asumió una composición química representativa de la fracción oleosa, ya que al igual que el petróleo, no tiene una composición exacta; la composición asumida fue la reportada por Tews et al. (2014). Como criterio para realizar la separación de los biocombustibles se utilizó la cantidad de carbonos de las moléculas componentes; específicamente, la fracción de gasolina debe contener los componentes en el ámbito de C₅ a C₁₀, la fracción de diésel corresponde a los hidrocarburos en el ámbito de C₁₀ a C₁₆ y los componentes pesados son los que posean más de C₁₆. Estos criterios de separación fueron fundamentados en lo que indica la Junta de Castilla y León (n.d.).

El sistema de destilación se simuló en el programa COCO, con lo que se obtuvieron los flujos de producción de los biocombustibles antes mencionados. En la simulación se utilizó un paquete termodinámico ideal, lo que podría implicar desviaciones en las estimaciones realizadas. A pesar de esto, Bouillot (2021) indica que un modelo ideal puede ser utilizado para una mezcla de hidrocarburos, especialmente para simulaciones con presiones relativamente bajas, temperaturas altas y con fuerzas de interacción débiles; tal

como es en este caso. La principal dificultad que presenta la mezcla es el uso de moléculas con más de siete carbonos, lo que hace que se desvíen del comportamiento ideal.

Tabla 4

Potencial de producción de biodiésel, biogasolina y biobúnker producidos con LHT a partir de los residuos biomásicos generados en Costa Rica. 2022.

	Diésel	Gasolina	Búnker	Unidades
Consumo de combustibles fósiles en CR 2020	898 785	693 019	91 890	ton
Potencial de biocombustibles	635 788	295 336	70 140	ton
Potencial de reemplazo	71	43	76	%

Nota: El consumo de combustibles fósiles fue extraído de la (Refinadora Costarricense de Petróleo, 2020), los otros resultados son propios de la investigación.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4, donde también se comparan con el consumo de combustibles fósiles en Costa Rica durante el año 2020. Estos resultados reflejan que por medio de la integración de las tecnologías de LHT de los residuos biomásicos y la hidrogenación correspondiente del biocrudo producido, idealmente sería posible sustituir poco más de dos tercios del diésel y búnker, y poco menos de la mitad de la gasolina consumidos a nivel nacional. Con la potencial implementación de estas tecnologías en el país, se podría alcanzar una independencia significativa de los combustibles fósiles en el sector transporte, donde actualmente se utiliza alrededor del 66 % de los combustibles fósiles importados (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2015). También es valioso resaltar que se podría aumentar aún más la producción de estos biocombustibles si se implementara un segundo tratamiento al búnker obtenido; según Tews et al. (2014) el uso de hidrocracking favorece la conversión de los componentes pesados en fracciones más ligeras, tales como diésel y gasolina.

En cuanto a la estimación de huella de carbono, en la gráfica 2 se muestra los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a los procesos de producción de biocombustibles estudiados, estos según el biocombustible y la etapa de producción; así mismo, se muestra esta misma información para los procesos de producción de combustibles fósiles. Lo primero que se puede apreciar es que la etapa de producción de biocrudo posee una huella de carbono superior a la de producción de crudo tradicional. Es posible que la diferencia se deba a que es necesario acondicionar los residuos orgánicos antes de ser sometida al proceso de LHT. Por otra parte, las emisiones asociadas al proceso de mejoramiento de biocombustibles son mucho menores en comparación a las de los combustibles fósiles. Esta diferencia puede ser debida a que, en el caso de los combustibles fósiles, se invierte en procesos adicionales como reformado de gases, cracking, hidrogenación, entre otros, con el fin de producir una mayor gama de productos. Debido a lo discutido anteriormente se logra obtener una huella de carbono total menor en comparación con la huella de los combustibles fósiles tradicionales. La reducción lograda es de 18 %, 36 % y 6 % para diésel, gasolina y búnker, respectivamente.

Gráfica 2

Huella de carbono de la producción de biocombustibles mediante LHT e hidrogenación y de combustibles fósiles, según etapa del proceso y combustible.2022.



Nota: La huella de carbono de combustibles fósiles fue extraído de (Cooney et al., 2017; Elgowainy et al., 2014), los otros resultados son propios de la investigación.

Conclusiones

Luego de revisar el inventario de generación de residuos biomásicos en Costa Rica y aplicarle la regla de 80/20 se concluye que las actividades que generan el 80 % de los residuos aprovechables para la producción de biocombustibles por medio de LHT e hidrogenación son: el cultivo de caña de azúcar, banano, piña, palma aceitera, la ganadería de carne y leche, la porcicultura y las actividades urbanas (fracción orgánica de residuos domésticos), a partir de las cuales se estima un potencial de generación de biocrudo de 1 383 299 ton/año.

Se concluye que la ruta de hidrogenación es la más favorable para el mejoramiento de los biocrudos generados por medio de la técnica de LHT, de acuerdo con los criterios condiciones de operación, madurez de la tecnología, costo, impacto ambiental y rendimiento.

Se estimó que el potencial de reemplazo de diésel, gasolina y búnker en Costa Rica son de 71 % (635 788 ton/año), 43 % (295 336 ton/año) y 76 % (70 140 ton/año), respectivamente. Además, se concluyó que la huella de carbono del diésel, la gasolina y el búnker producidos por medio de LHT e hidrogenación son inferiores a las del proceso de producción de combustibles fósiles en un 18 %, 36 % y 6 %, respectivamente. Esta reducción de emisiones se asocia principalmente a las diferencias presentes en cada proceso de mejoramiento.

A pesar de que los datos obtenidos en esta investigación corresponden a una estimación preliminar del potencial de producción de biocombustibles utilizando LHT y esto es un escenario ideal pues implica el aprovechamiento del 100 % de los desechos biomásicos generados en el país y no se considera las pérdidas propias de los procesos, los resultados obtenidos son alentadores pues demuestran el gran impacto que podría tener la implementación de estos procesos en Costa Rica. Con ello se insta a continuar explorando la viabilidad técnica y económica del desarrollo de esta tecnología en el país.

Financiamiento (si no aplica borrar esta sección)

Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Número de proyecto: B9032

Agradecimiento (si no aplica borrar esta sección)

El equipo de autores agradece el apoyo de la Escuela de Ingeniería Química y de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: S.S.J. 50 %, N.M.R. 15 %, J.R.P. 10 % y E.D.H. 25 %.

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente [S.S.J], previa solicitud razonable.

Referencias

- Ahamed, T. S., Anto, S., Mathimani, T., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Upgrading of bio-oil from thermochemical conversion of various biomass – Mechanism, challenges and opportunities. *Fuel*, 287, 119329. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119329>
- Aierzhati, A., Stablein, M. J., Wu, N. E., Kuo, C.-T., Si, B., Kang, X., & Zhang, Y. (2019). Experimental and model enhancement of food waste hydrothermal liquefaction with combined effects of biochemical composition and reaction conditions. *Bioresource Technology*, 284, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.076>
- Baloch, H. A., Nizamuddin, S., Siddiqui, M. T. H., Riaz, S., Jatoi, A. S., Dumbre, D. K., Mubarak, N. M., Srinivasan, M. P., & Griffin, G. J. (2018). Recent advances in production and upgrading of bio-oil from biomass: A critical overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5101–5118. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.050>
- Biller, P., & Ross, A. B. (2011). Potential yields and properties of oil from the hydrothermal liquefaction of microalgae with different biochemical content. *Bioresource Technology*, 102(1), 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.028>
- Bouillot, B. (2021). Choice of a thermodynamic model and simulation. In *Introduction to thermodynamic methods for process engineering*. https://www.emse.fr/~bouillot/poly/thermo_eng.pdf

- Cao, L., Zhang, C., Chen, H., Tsang, D. C. W., Luo, G., Zhang, S., & Chen, J. (2017). Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects. *Bioresource Technology*, *245*, 1184–1193. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.196>
- Castro Vega, A. A. (2011). *Estudio de la naturaleza química de biocrudos obtenidos mediante licuefacción hidrotérmica de biomasa lignocelulósica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chacón, L., Coto, O., & Flores, M. (2018). Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica. *EMA Energía Medio Ambiente y Desarrollo SA* [https://Sepse. Go. Cr/Documentos/Informe_Final_Actualizacion_Encuesta_Biomasa_SEPSE_CRUSA_EMA_2018. Pdf](https://Sepse.Go.Cr/Documentos/Informe_Final_Actualizacion_Encuesta_Biomasa_SEPSE_CRUSA_EMA_2018.Pdf).
- Cooney, G., Jamieson, M., Marriott, J., Bergerson, J., Brandt, A., & Skone, T. J. (2017). Updating the US life cycle GHG petroleum baseline to 2014 with projections to 2040 using open-source engineering-based models. *Environmental Science & Technology*, *51*(2), 977–987. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02819>
- Crespo-Delgado, A. (2022). *Obtención de biocrudo a partir de un alga invasora mediante licuefacción hidrotérmica*. [(Tesis de Maestría)]. Universidad de Cádiz.
- Déniel, M., Haarlemmer, G., Roubaud, A., Weiss-Hortala, E., & Fages, J. (2017). Modelling and predictive study of hydrothermal liquefaction: application to food processing residues. *Waste and Biomass Valorization*, *8*(6), 2087–2107. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9726-7>
- Dimitriadis, A., & Bezergianni, S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>
- Elgowainy, A., Han, J., Cai, H., Wang, M., Forman, G. S., & DiVita, V. B. (2014). Energy efficiency and greenhouse gas emission intensity of petroleum products at US refineries. *Environmental Science & Technology*, *48*(13), 7612–7624. <https://doi.org/10.1021/es5010347>
- Escalante-Castro, M. (2021). *Evaluación de la producción del biocrudo obtenido de la licuefacción hidrotérmica de residuos de pinzote de banano, utilizando níquel soportado sobre sílica-alúmina e hidróxido de sodio como catalizadores* [(Tesis de licenciatura)]. Universidad de Costa Rica.
- Hansen, S., Mirkouei, A., & Diaz, L. A. (2020). A comprehensive state-of-technology review for upgrading bio-oil to renewable or blended hydrocarbon fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *118*, 109548. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109548>

- Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, *262*, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>
- Hietala, D. C., Koss, C. K., Narwani, A., Lashaway, A. R., Godwin, C. M., Cardinale, B. J., & Savage, P. E. (2017). Influence of biodiversity, biochemical composition, and species identity on the quality of biomass and biocrude oil produced via hydrothermal liquefaction. *Algal Research*, *26*, 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.07.020>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *What is the Greenhouse Effect?* IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html.
- Junta de Castilla y León. (n.d.). *El recorrido de la energía en Castilla y León*. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/productos-destilacion-petroleo-crudo.html>.
- Kumar, R., & Strezov, V. (2021). Thermochemical production of bio-oil: A review of downstream processing technologies for bio-oil upgrading, production of hydrogen and high value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110152>
- Leow, S., Witter, J. R., Vardon, D. R., Sharma, B. K., Guest, J. S., & Strathmann, T. J. (2015). Prediction of microalgae hydrothermal liquefaction products from feedstock biochemical composition. *Green Chemistry*, *17*(6), 3584–3599. <https://doi.org/10.1039/C5GC00574D>
- Li, Y., Leow, S., Fedders, A. C., Sharma, B. K., Guest, J. S., & Strathmann, T. J. (2017). Quantitative multiphase model for hydrothermal liquefaction of algal biomass. *Green Chemistry*, *19*(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1039/C6GC03294J>
- Lu, J., Liu, Z., Zhang, Y., & Savage, P. E. (2018). Synergistic and antagonistic interactions during hydrothermal liquefaction of soybean oil, soy protein, cellulose, xylose, and lignin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(11), 14501–14509. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03156>
- Martín Gil, J. (2009). *El futuro de los biocombustibles: biorrefinerías integradas: Lección inaugural del curso académico 2009-2010*.
- Matayeva, A., Basile, F., Cavani, F., Bianchi, D., & Chiaberge, S. (2019). Development of Upgraded Bio-Oil Via Liquefaction and Pyrolysis. *Studies in Surface Science and Catalysis*, *178*, 231–256. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64127-4.00012-4>
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. (2015). *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030*. <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2021). *Huella de carbono*.
- Naciones Unidas. (2019). *II Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/IBA-2019.pdf>

- Palomino, A., Montenegro-Ruíz, L. C., & Godoy-Silva, R. D. (2019). Evaluation of yield-predictive models of biocrude from hydrothermal liquefaction of microalgae. *Algal Research*, 44, 101669. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101669>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109400>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2012). *Conversión de residuos agrícolas orgánicos en fuente de energía*.
- Ramirez, J. A., Brown, R. J., & Rainey, T. J. (2015). A review of hydrothermal liquefaction bio-crude properties and prospects for upgrading to transportation fuels. *Energies*, 8(7), 6765–6794. <https://doi.org/10.3390/en8076765>
- Ramos, P. M., & Gil, J. M. (2017). *BIORREFINERÍAS BASADAS EN EXPLOTACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES*.
- Refinadora Costarricense de Petróleo. (2020). *Comercialización y ventas*. <https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2020/Memoria-2020/cadena-valor-comercializacion-ventas.html>.
- Sanna, A., & Abd Rahman, N. A. (2015). Conversion of Microalgae Bio-oil into Bio-diesel. In *Algal Biorefineries* (pp. 493–510). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_16
- Santamaría-Chinchilla, L. (2022). *Producción de un biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica usando residuos de broza de café como biomasa, pretratada mediante ozonólisis*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Shakya, R., Adhikari, S., Mahadevan, R., Shanmugam, S. R., Nam, H., & Dempster, T. A. (2017). Influence of biochemical composition during hydrothermal liquefaction of algae on product yields and fuel properties. *Bioresource Technology*, 243, 1112–1120. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.046>
- Sheng, L., Wang, X., & Yang, X. (2018). Prediction model of biocrude yield and nitrogen heterocyclic compounds analysis by hydrothermal liquefaction of microalgae with model compounds. *Bioresource Technology*, 247, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.011>
- Snowden-Swan, L. J., Zhu, Y., Jones, S. B., Elliott, D. C., Schmidt, A. J., Hallen, R. T., Billing, J. M., Hart, T. R., Fox, S. P., & Maupin, G. D. (2016). *Hydrothermal liquefaction and upgrading of municipal wastewater treatment plant sludge: a preliminary techno-economic analysis, rev. 1*. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States). <https://doi.org/10.2172/1327165>
- Teri, G., Luo, L., & Savage, P. E. (2014). Hydrothermal treatment of protein, polysaccharide, and lipids alone and in mixtures. *Energy & Fuels*, 28(12), 7501–7509. <https://doi.org/10.1021/ef501760d>

- Tews, I. J., Zhu, Y., Drennan, C., Elliott, D. C., Snowden-Swan, L. J., Onarheim, K., Solantausta, Y., & Beckman, D. (2014). *Biomass direct liquefaction options. techno-economic and life cycle assessment*. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States). <https://doi.org/10.2172/1184983>
- Ulate-Sancho, R. (2020). *Evaluación del tratamiento por licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña para la obtención de un biocrudo*. [(Tesis de licenciatura)]. Universidad de Costa Rica.
- Wagner, J., Bransgrove, R., Beacham, T. A., Allen, M. J., Meixner, K., Drog, B., Ting, V. P., & Chuck, C. J. (2016). Co-production of bio-oil and propylene through the hydrothermal liquefaction of polyhydroxybutyrate producing cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 207, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.114>
- Yang, J., Niu, H., Corcadden, K., & Astatkie, T. (2018). Hydrothermal liquefaction of biomass model components for product yield prediction and reaction pathways exploration. *Applied Energy*, 228, 1618–1628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.142>
- Yu, J., Biller, P., Mamahkel, A., Klemmer, M., Becker, J., Glasius, M., & Iversen, B. B. (2017). Catalytic hydrotreatment of bio-crude produced from the hydrothermal liquefaction of aspen wood: a catalyst screening and parameter optimization study. *Sustainable Energy & Fuels*, 1(4), 832–841. <https://doi.org/10.1039/C7SE00090A>
- Zhu, Z., Rosendahl, L., Toor, S. S., Yu, D., & Chen, G. (2015). Hydrothermal liquefaction of barley straw to bio-crude oil: Effects of reaction temperature and aqueous phase recirculation. *Applied Energy*, 137, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.005>