

Simulación de un proceso de obtención de bioetanol a partir de los residuos forestales de los aserraderos de la zona norte de Costa Rica Simulation of a process to obtain bioethanol from forestry residues from sawmills in the northern part of Costa Rica

Oswaldo Antonio Chavarría Acuña

Medio Ambiente, Costa Rica

(osvachavarria@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-0303-7314>)

Información del manuscrito:

Recibido/Received: 21/10/22

Revisado/Reviewed: 21/12/23

Aceptado/Accepted: 17/01/24

RESUMEN

Palabras clave:

aserraderos, biorrefinería, biomasa, gasolinas, etanol.

El estudio consiste en la evaluación técnica para instalar una biorrefinería en Costa Rica. Se cuantifican los residuos de los aserraderos ubicados en la zona norte del país, 30 kilómetros a la redonda de Boca Arenal, San Carlos, y así realizar un balance de masa a partir de fuentes secundarias y mediante el simulador de procesos químicos DWSIM versión 7.5.5, para producir etanol con el propósito de mezclar con las gasolinas consumidas en Costa Rica. La metodología consiste en un diseño no experimental, transeccional o transversal, y para una población de 24 de aserraderos, se aplicaron 20 entrevistas de donde se obtuvo que anualmente se producen 40,447 toneladas, y bajo la modalidad termoquímica, utilizando como materia prima todos los residuos de los aserraderos de la zona de estudio, se obtienen 16,414.30 kilogramos de etanol por día (20.84 metros cúbicos por día), con una pureza del 99.8 % v/v, logrando de esta manera abastecer mezclar con etanol el 5.16 % de las gasolinas que se consumen en Costa Rica, teniéndose como productos secundarios syngas residual y metanol. Al haber disponibilidad de materia prima y tecnologías para la conversión de biomasa en etanol, técnicamente es factible la instalación de una biorrefinería en Costa Rica, siendo favorable tomar en cuenta otras fuentes lignocelulósicas como fracciones de residuos urbanos, residuos agrícolas y residuos industriales; además de otras regiones geográficas, siendo imprescindible llevar a cabo un estudio de factibilidad financiera para la biorrefinería, para determinar la viabilidad de proyecto.

ABSTRACT

Keywords:

Sawmills, biorefinery, biomass, gasolines, ethanol.

The focus of this project is the technical evaluation of the installation of a biorefinery in Costa Rica. This includes sawmill residues from the country's north, 30 kilometers around Boca Arenal, San Carlos, and performing a mass balance from secondary sources and the DWSIM 7.5.5 chemical process simulator for ethanol production to blend with Costa Rican gasoline. The methodology makes use of a non-experimental, transactional, or transversal design. Twenty interviews were conducted for a population of 24 sawmills producing 40,447 tons of lumber per year, producing 16,414.30 kilograms of 99.8% v/v purity ethanol daily (20.84

cubic meters per day). As a result, the ethanol produced can supply 5.16% of the gasoline consumed in Costa Rica, as well as syngas residual and methanol as secondary products. The installation of a biorefinery in Costa Rica is technically feasible due to the availability of raw materials and technologies for the conversion of biomass into ethanol, and it is advantageous to consider other lignocellulosic sources such as fractions of urban waste, agricultural waste, and industrial waste, as well as other geographic regions around the country. To determine the viability of the project, a financial feasibility study for the biorefinery installation is required in other stages of project planning.

Introducción

Costa Rica históricamente ha sido un país muy dependiente de combustibles fósiles en el sector del transporte. Desde el punto vista ambiental, los hidrocarburos representan un gran problema, ya que, en la combustión se producen gases como dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (E-education, 2022). Estos gases son causantes del efecto invernadero, provocando el calentamiento global, haciendo que aumente el nivel del mar y el deshielo de los polos (National Geographic, 2022), y también causan la lluvia ácida, acidificando los suelos y cuerpos de agua, alterando las condiciones de los seres vivos (Castro, 2019).

Con el fin de mitigar el impacto por las emisiones de las gasolinas, RECOPE (2020) (Refinadora Costarricense de Petróleo) propuso mezclarlas con bioetanol, teniendo el inconveniente necesitar grandes extensiones de terreno para el cultivo de caña de azúcar, y de ser un biocombustible de primera generación al ser su materia prima una fuente de consumo humano.

Al cambiar la materia prima por biomasa forestal residual, es posible plantear un modelo de aprovechamiento de su lignocelulosa, mediante la instalación de una biorrefinería, la cual se conceptualiza en el marco de la transformación de la biomasa de manera óptima, para producir diversos productos, y a la vez ser autosuficiente y sin ser peligroso para el medio ambiente (Hingsamer y Jungmeier, 2019), por lo que, una biorrefinería se puede definir como, toda planta que contemple los equipos necesarios para llevar a cabo procesos y operaciones unitarias de conversión de biomasa para producir alimentos, químicos, materiales, combustibles, calor y/o electricidad (Ray et al., 2021).

Al utilizar propiamente residuos como materia prima, constituye una biorrefinería de segunda generación, cuyas materias primas provienen de cultivos, pero no alimenticios, siendo la materia prima principalmente residuos agrícolas y forestales, por lo que tiene una gran ventaja sobre los de primera generación, al no competir con el consumo humano Chávez-Sifontes (2019).

La transformación de la biomasa lignocelulósica en etanol, se puede llevar a cabo por conversión bioquímica, en donde se da primeramente la separación de la biomasa en celulosa, hemicelulosa y lignina, y posteriormente, se convierten los azúcares mediante reacciones enzimáticas. Las enzimas, que pueden ser, levaduras, hongos o bacterias, digieren el azúcar para producir además del etanol, dióxido de carbono, hidrógeno y otros productos (Dahiya, 2020).

La otra forma es a través de un proceso termoquímico, se lleva a cabo la reacción controlada de la biomasa en estado sólido, el cual se volatiliza para que, de esta manera, se puedan producir otros materiales ya sean sólidos, líquidos y gaseosos, y se caracteriza por someterse a poco o en ausencia de oxígeno, y regulados mediante la presión y la temperatura (IRENA, 2018).

En comparación a la conversión bioquímica, la conversión termoquímica ofrece mayores ventajas, ya que contempla una amplia variedad de materias primas, incluyendo la madera, además de mayor eficiencia en la conversión y energía, y menores tiempos de reacción (Chandraratne y Daful, 2021).

Estudios han demostrados diferentes resultados de etanol a partir de biomasa. Evaluaciones técnicas, económicas y ambientales para producir bioetanol en un biorefinería a partir de biomasa residual, lograron arrojar resultados entre 0.14 – 0.22 kg de bioetanol / kg de biomasa mediante conversión biológica (Demichelis et al., 2020).

En otra variante, con un pretratamiento del ácido sulfúrico diluido, a partir de 1000 kg del bagazo de la caña de azúcar de obtuvieron 191.96 kg de etanol (Dionísio et al., 2021).

El presente estudio pretende simular el proceso de una biorefinería en Costa Rica para producir bioetanol, de tal manera que, se pueda mezclar con las gasolinas, para reducir el impacto ocasionado por las emisiones atmosféricas.

Chacón (2012), estudió la misma zona del presente proyecto: 30 km a la redonda de Boca Arenal de San Carlos, con el fin de conocer la situación de los residuos de los aserraderos de la región, con respecto a los residuos que se generan, sugiriendo a la vez medidas para mejorar el aprovechamiento de los desechos con fines energéticos, determinando que en la zona de estudio se generan alrededor de 80,000 toneladas por año de residuos.

De tal forma que, al ser la zona norte una región que existe una cantidad significativa de residuos forestales, se justifica la actualización de estudiar la oferta de la biomasa, para así plantear un proceso y un balance de masa mediante fuentes secundarias para producir bioetanol de segunda generación.

Para tener una idea del beneficio de obtener etanol bajo el esquema propuesto, se determinó la capacidad de la planta obtenida, para utilizarse como mezcla en las gasolinas que se consumen en Costa Rica, en sustitución del MTBE, que es el oxigenante que se ha utilizado en los últimos años, para lo cual, fue necesario considerar el consumo de gasolinas, y la cantidad de etanol que técnicamente es posible mezclar con los hidrocarburos.

Para ello se consideró lo determinado por López (2019), quien realizó diversas pruebas en el Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ) de la Universidad de Costa Rica, y determinó que, utilizando mezclas de 10% de etanol, sin MTBE ni ETBE, las propiedades fisicoquímicas de las gasolinas son adecuadas para su utilización, considerando entre varios aspectos que, no se encontró problemas de separación de fases (etanol – agua) en el rango de temperaturas de estudio (0 °C - 40 °C).

Con relación al consumo, RECOPE, quien es la que actúa a manera de monopolio de comercialización de hidrocarburos en Costa Rica, determinó que en un escenario medio para el 2022, se estimaron 1,414,320 m³ (RECOPE, s.f.) de consumo de gasolinas súper y regular, cifra que se tomó de referencia para determinar la cantidad que se podría mezclar con el etanol del proceso de la simulación.

La investigación es concordante con el Plan Nacional de Descarbonización, establecido por el Gobierno de Costa Rica (2019), que entre varios puntos, promueve mezclar el etanol nacional con las gasolinas; además, de que forma parte de los instrumentos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2020), que recomienda que los países promuevan combustibles más limpios y fuentes de energía renovables, promoviendo a su vez un desarrollo en armonía con el ambiente y una economía circular.

El objetivo consiste en evaluar la viabilidad técnica de la instalación de una biorrefinería en Costa Rica para la producción de etanol a partir de residuos forestales de los aserraderos, situados, 30 km a la redonda de Boca Arenal, San Carlos, Costa Rica, con el fin de mezclarlos con gasolina.

Método

El diseño de investigación fue no experimental, de tipo transeccional o transversal, recopilando información durante el transcurso del año 2022. A la vez fue de tipo descriptivo, y de tipo investigación-acción ya que, se desarrolló con la intención de promover un cambio en la realidad en cuanto al aprovechamiento de los residuos, en beneficio del medio ambiente.

La población fue la cantidad de aserraderos ubicados en un radio de 30 km a la redonda de Boca Arenal de San Carlos, Costa Rica, mostrado en la Figura 1, donde se propuso aplicar un censo, dada la relativa pequeña cantidad de aserraderos existentes en la zona, previendo un faltante de 20 % de la población por rechazo u omisión de los propietarios, siendo la variable

medir, la cantidad de residuos (biomasa) en toneladas proveniente de los aserraderos, en sus diferentes presentaciones físicas: aserrín, burucha, leña y astillas, donde se obtuvo la información por medio de encuestas presenciales o vía telefónica, al personal de los aserraderos de la región norte de Costa Rica.

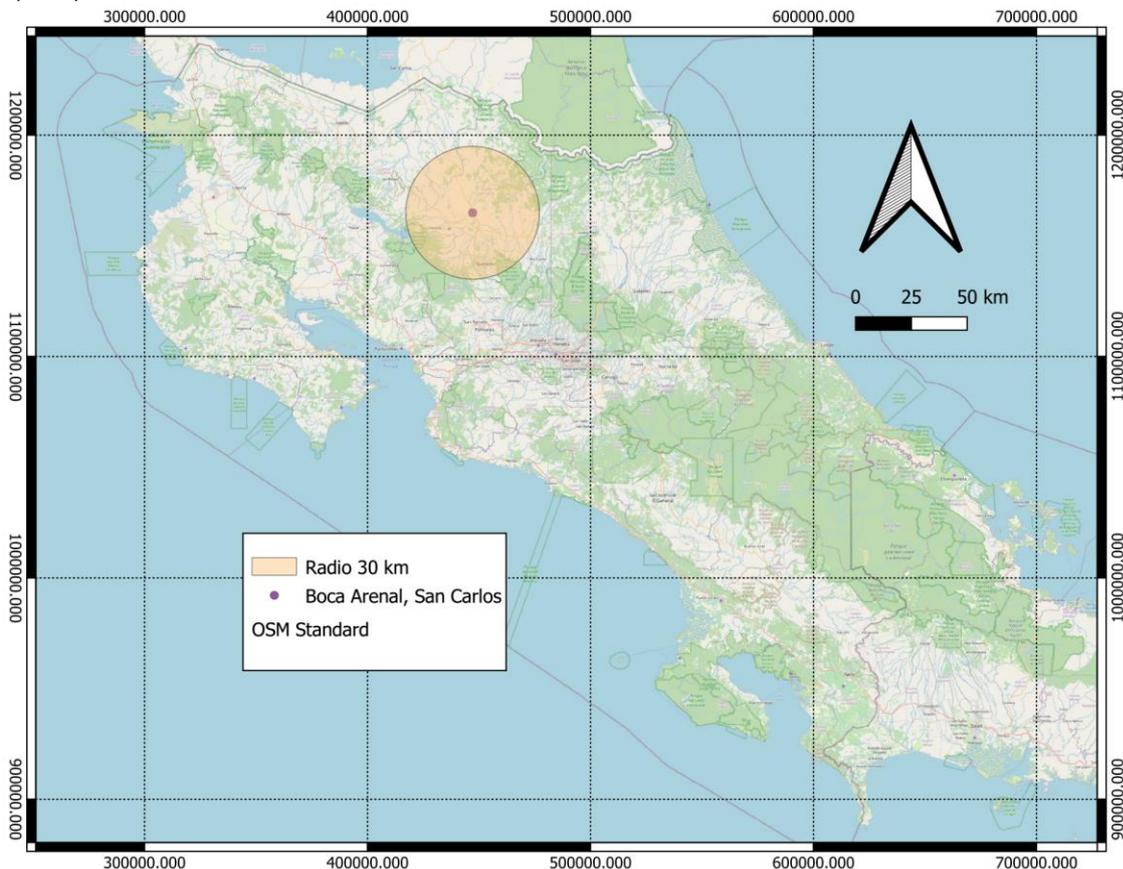
La encuesta aplicada al personal de los aserraderos fue sobre la producción semanal promedio, semanas laborales por año, especies más comunes que se procesan, rendimiento promedio de aserrío, cantidad promedio de desechos, si existe acumulación de desechos. Además, y más específicamente sobre los residuos, se consultó sobre la proporción de desechos entre aserrín, burucha, leña, y "otros", también se preguntó sobre la distribución del uso que se les da a estos: autoconsumo, venta, regalo y acumulación. Finalmente, se consultó sobre si existe algún plan o estrategia para el aprovechamiento de los residuos, a qué tipo de empresa se están suministrando, así como su opinión sobre si se estaba satisfaciendo la demanda.

Para conocer la población de aserraderos, se realizaron consultas a las Municipalidades y al Ministerio de Salud de la región, y se georreferenciaron mediante el programa QGIS versión 3.24.1, para determinar cuáles se encontraban dentro del área de estudio que se muestra en la Figura 1, cuya área corresponde a un círculo 30 km de radio, centrado en Boca Arenal, San Carlos.

A partir la oferta de residuos actual de la zona, se utilizó el modelo termodinámico estequiométrico establecido por Basu (2010) para el cálculo de la composición del syngas luego de la gasificación de la biomasa, y posteriormente, mediante el programa de DWSIM versión 7.5.5 y fuentes secundarias se determinaron los procesos y operaciones unitarias para calcular la capacidad de etanol a producir.

Figura 1

Sector norte de Costa Rica donde se delimita la investigación mediante el círculo sombreado, y centrado en Boca Arenal de San Carlos, coordenadas CRTM05 447,131.622 longitud - 1,164,932.971 latitud



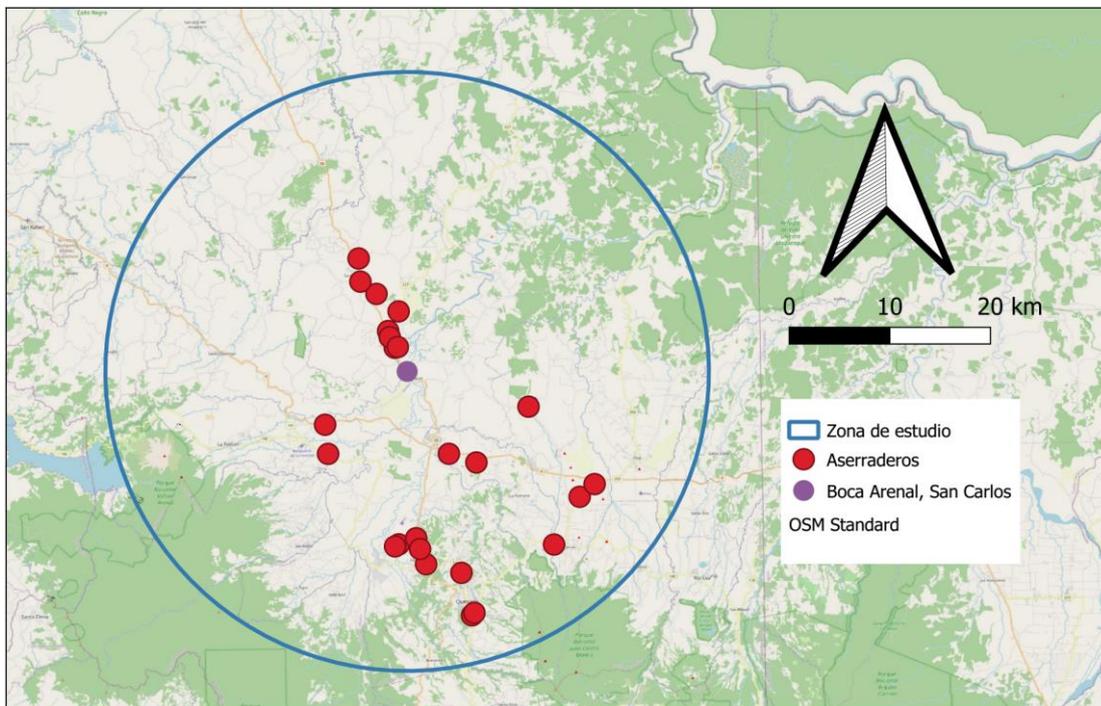
Resultados

Se ubicaron un total de 24 aserraderos, cuya ubicación se visualiza en la Figura 2 y las coordenadas se muestran en la Tabla 1, en donde el 100 % se ubicaron en el cantón de San Carlos. Se obtuvo información de 20 de estos, obteniendo que se procesan 35,338,632 PMT (pulgadas madereras ticas) anuales, donde 1 m³ equivale a 362 PMT en madera en rollo, y también, 1 m³ es lo mismo que 462 PMT en madera aserrada (Barrantes y Ugalde, 2018).

El rendimiento promedio de aserrío fue de un 55 %, siendo el *Vochysia guatemalensis*, *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* las especies más comunes que se comercializan, y laborando prácticamente durante todo el año. El detalle sobre el tipo de residuos, así como su disposición, se muestran en la Tabla 2, del cual se muestran proporciones similares entre los residuos, con excepción de la burucha, y siendo la leña la que predomina; y en cuanto a la disposición de los residuos, se tiene que, la gran mayoría (94 %) se vendía, mientras que el 3 % se utilizaba para autoconsumo, 2 % se acumulaba en los establecimientos, y apenas 1% se regalaba.

Figura 2

Ubicación de los aserraderos entrevistados, en coordenadas CRTM05



En cuanto al plan o estrategia para el aprovechamiento de los residuos dentro de los aserraderos, estaba ligado al autoconsumo de estos (para el secado de la madera, por ejemplo), siendo un 35% los que respondieron que sí tienen un plan, mientras que, el 65% indicó negativamente.

La mayoría de los establecimientos tiene como cliente a la empresa Ticofrut para la venta de leña, mientras el aserrín se vendía comúnmente a fincas que tenían actividades como lecherías y polleras. Otras empresas mencionadas que compraban residuos en diferentes presentaciones eran Cemex, Del Oro, Agrep Forestal y Agrofertilizantes Nerking.

Finalmente, se consultó a los entrevistados, sobre si a su criterio personal, los residuos están satisfaciendo la demanda de los clientes que compran sus residuos. La mayoría, el 80% contestaron que sí, el 10 % indicó que no, mientras que, el restante 10 % señaló que no sabía.

Tabla 1
Ubicación de los aserraderos en coordenadas CRTM05

Nombre del establecimiento	Longitud	Latitud
Aserradero Laraco	453852.966	1155698.201
Aserradero San Gerardo	446388.007	1170961.132
Aserradero Flor y Fauna	459132.155	1161193.906
Aserradero Atenas	445317.583	1169012.186
Aserradero Arcoiris	452176.858	1144670.679
Maderas de Sucre	453150.124	1140399.309
Aserradero Arjima	445995.262	1147634.517
Aserradero Aguas Zarcas	461427.997	1147345.077
Aserradero Muelle	451136.463	1156615.271
Aserradero Las Nieves	444217.158	1172753.887
Aserradero Bolaños	445943.236	1167326.261
Aserradero La Loma	453391.416	1140648.280
Aldequezul	447737.452	1148215.423
Aserradero Santa Rosa	442642.379	1174006.644
Aserradero Buenos Aires	445462.252	1168404.192
Tarimas Acuña y Ávila	445629.505	1147433.677
Maderas Cultivadas	442505.156	1176332.426
Tarimas del Norte	448680.262	1145593.404
Holystone Group	439129.584	1156815.792
Aserradero El Milagro	464061.439	1152082.678
HC Maderas	465565.487	1153326.342
Maderas y Molduras San Jorge	438879.674	1159737.696
Norte Madera	446240.771	1167397.932
Maderas y Molduras Acual	448102.884	1147133.559

Tabla 2
Desglose de residuos que se producen según su clasificación y disposición

Tipo de residuos	Toneladas anuales
Aserrín	13,095
Burucha	2,587
Leña	13,271
Astillas	11,494
Uso - disposición	
Autoconsumo	1,183
Venta	38,066
Regalo	270
Acumulación	928
Total	40,447

Balace de masa

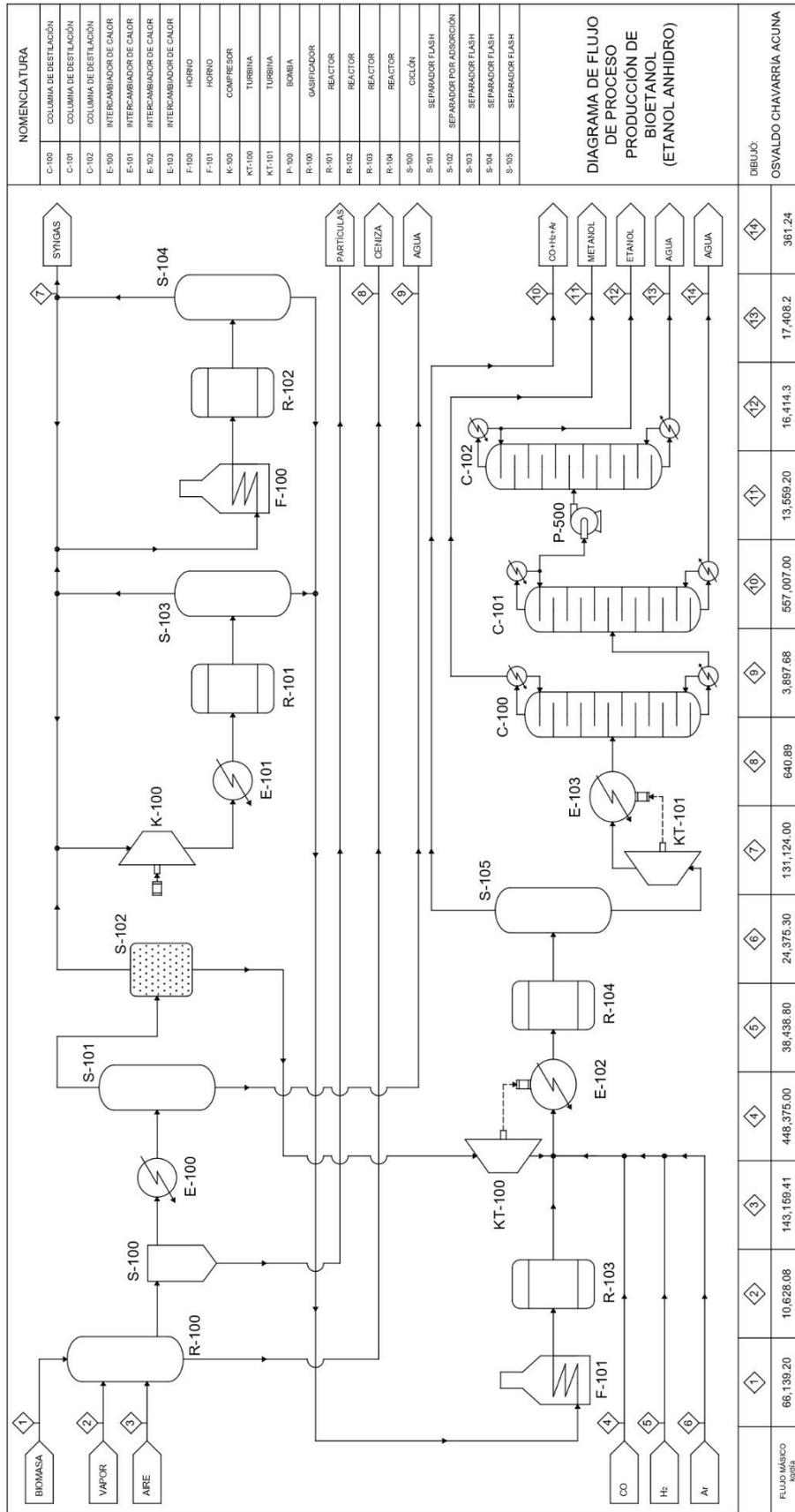
Para elaborar el balance de masa, se consideró la totalidad de los residuos sumados: 40,447.09 ton/año, así como los valores de humedad: 32.0 %, 50.0 % y 32.5 %, para el aserrín, leña y burucha respectivamente, según lo obtenido por Chacón (2012), citado por Chacón, Coto y Flores (2018); mientras que el 49.0 % de las astillas, se obtuvo a través de los servicios del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, trabajando con una humedad promedio de 42.8 %.

Se asumió el análisis elemental de 50.295 % C, 6.085 % H, 42.498 % O, 0.136% N, 0.018 S y 0.969 % ceniza, cuyos valores son promediados a partir de varias especies por Gaur y Reed (1998), citado por BEF (2022); y se supuso que la planta operaría 350 días por año, considerando algunos cierres por mantenimiento y días feriados.

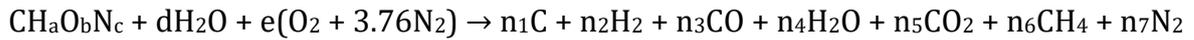
En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso completo, con valores del balance de masa.

Figura 4

Diagrama de flujo de proceso de producción de etanol anhidro



Primeramente y mediante el modelo termodinámico en equilibrio – estequiométrico, por medio la minimización de la energía libre de Gibbs establecida por Basu (2010), se tiene la siguiente reacción química:



Asumiendo 1500 K de temperatura y 1229.45 kg/hora de agente gasificante vapor-aire 50:50, en el reactor R-100, se obtuvieron 9,141.46 kg de syn gas/hora, con los valores n_i que mostrados en la Tabla 3. La fórmula molecular de la biomasa resultó: $\text{CH}_{1.441512}\text{O}_{0.634299}\text{N}_{0.002319}$.

Tabla 3

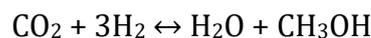
Valores n_i del syngas mediante el modelo estequiométrico de Basu (2010)

Variable	Valor n_i
n1: C	0.00000
n2: H ₂	0.83000
n3: CO	0.83000
n4: H ₂ O	0.10400
n5: CO ₂	0.17000
n6: CH ₄	0.00000
n7: N ₂	1.60400

Posteriormente, mediante el separador flash S-101, se separa el agua de los gases ligeros. Uno de los inconvenientes de estos gases, es la gran proporción de CO con relación al resto de los gases, razón por la cual, se optó por colocar un separador S-102 que funcione con un sistema adsorción de carbón activado y CuCl, preparado con CuCl₂, considerando que Gao et al. (2018) lograron recuperar hasta el 92.9% de CO de syngas, obteniendo una pureza cercana al 100% de CO luego de la desorción del gas separado.

Por ello, en el presente proceso se propuso un sistema separador S-101, como el mencionado, que opere de forma ideal, suponiendo que se recupera el 90 % del CO que trae el syngas que sale del reactor R-100, de tal forma que, el CO separado, pueda ser utilizado posteriormente, logrando así de esta configurar los reactores R-101 y R-102 con relaciones de CO/CO₂ cercanas a 0.3 para ambos, utilizando el modelo cinético de Van den Busshe y Froment (1996).

Mediante dicho modelo, pero adaptado a unidades de presión en Pa, y velocidad de reacción en $\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, a 50 bares y 180 °C, se obtuvo una corriente de 35,607.20 kg/día, con una pureza del 69.2 % m/m de metanol, y una purga que constituye un residual de 131,124.00 kg/día, permitiendo la transformación del syngas en metanol mediante la hidrogenación del dióxido de carbono, donde también interviene la inversa de la reacción de intercambio gas-agua (RWGS) (Lücking, 2017):

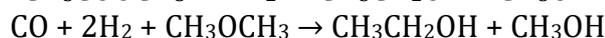
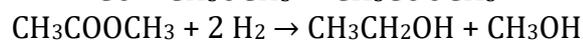
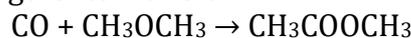


Luego, continúa la formación de dimetil éter, la cual se puede obtener mediante catálisis ácida (Brunetti et al., 2020) a partir del metanol:



La cinética se plantea según el modelo de la ecuación de Arrhenius con los coeficientes $A_i=200034.17$ y $B_i=80840$ (Singh, s.f.). Operando a 50 bar y 365.65 °C, permite una conversión de casi el 100 % del metanol, y llevándose a cabo en el reactor R-103

Posteriormente, el dimetil éter, en conjunto con el monóxido de carbono y el hidrógeno obtenidos del syngas, en el reactor R-104 se obtuvo el etanol y metanol como productos principales (Li et al., 2010) de la siguiente manera:



Se obtuvo una selectividad de 46.16 % para el metanol, 42.08 % para el etanol, mientras que el restante corresponde a una mezcla de dióxido de carbono, acetato de metilo y acetato de etilo.

Finalmente, se purificó el etanol mediante tres columnas de destilación, operando las dos primeras a 1 atm (C-100 y C-101), y la tercera (C-1-2) a 10 bares para romper la mezcla azeotrópica, obteniendo de esta manera el etanol anhidro, con una pureza del 99.8 % v/v, a un flujo de 16,414.30 kg/día (20.84 m³/día).

Cantidad de mezcla en las gasolinas en relación con el etanol producido

Al comparar el escenario medio para el 2022, de 1,414,320 m³ determinados por RECOPE (s.f.) de consumo de gasolinas súper y regular, con la planta propuesta cuya capacidad es de 20.84 m³/día (7,294.0 m³/año, operando 350 días anuales), quiere decir que, se abastecería el 5.16 % de las gasolinas con el etanol producido en la planta durante el año 2022.

Discusión y conclusiones

El desarrollo de la conversión de la biomasa en etanol en el presente estudio fue por termoquímica, dadas las ventajas que ofrece, ya que contempla una amplia variedad de materias primas, incluyendo la madera, además de mayor eficiencia en la conversión y energía, y menores tiempos de reacción (Chandraratne y Daful, 2021), misma modalidad que utilizan empresas como Enerkem, la cual ha incursionado sustancialmente en la elaboración de productos y combustibles a partir de residuos (Elías, s.f.).

Existen varios aspectos a considerar al momento de utilizar la biomasa en una planta de transformación. Uno de ellos es el contenido de humedad, ya que, durante la gasificación, son principalmente el carbono, hidrógeno y oxígeno, y en menor proporción el nitrógeno y el azufre, que reaccionan con el agente gasificante para producir el syngas, que es el inicio del proceso para llegar al etanol.

En el presente proyecto se determinó que, de las 40,447 ton, una proporción considerable: 42.8 % corresponde a humedad, mientras que el restante es propiamente la biomasa que entra en la planta para su conversión.

Bajo el esquema propuesto, se produjeron 3.32 kg de syngas / kg de biomasa; pero si se utilizan 22 kg/h biomasa enriquecida con hidrocarburos, se pueden generar 41.76 kg/h, es decir, 1.9 kg de syngas / kg biomasa, empleando un modelo de gasificación no estequiométrico entre 900 °C – 1000 °C, y aire como agente gasificante. (Caballero et al., 2019).

Rodríguez et al. (2010) obtuvieron 583 kg/h de syngas a partir de 833 kg/hora de biomasa (0.7 kg de syngas / kg de biomass), basados en una aproximación de equilibrio químico, similar al desarrollado en el presente proyecto, donde algunas de las suposiciones que se utilizaron en común son: las reacciones están en equilibrio termodinámico, se lleva a cabo a presión atmosférica, el nitrógeno es inerte, así como la ceniza, por lo que no se involucra en las reacciones químicas, y los gases que se producen son solo CO₂, CO, H₂, CH₄, N₂ y H₂O, y que además, el agente gasificante es una combinación de vapor y aire. Dos diferencias de dicha investigación con el presente proyecto, fue que Rodríguez et al. (2010) utilizaron 850 °C, y lodos industriales como fuente biomásica.

Por lo anterior, se tiene que, la cantidad de syngas a obtener difiere según el sistema y las condiciones empleadas. Aun así, y para efectos de diseño de un gasificador, es conveniente considerar algunos aspectos preliminares. Por ejemplo, si se emplea un gasificador de corriente descendiente, se facilita un flujo continuo de syngas, y permite procesar biomasa con altos contenidos de humedad, además de ser de diseño simple y bajo costo (Caballero et al., 2019).

Otro aspecto a tomar en cuenta, es la forma física de la materia prima que se introduce al reactor, ya que si bien es cierto, el aserrín, la leña, la burucha y los chips, son todos madera, pero en presentaciones físicas distintas, debiéndose prever que, el reactor tenga la versatilidad de procesar todas formas de biomasa, o bien, instalar un mecanismo ya sea interno o externo, que permita uniformar la materia prima, pudiendo inclusive adaptarse para el secado de la

misma, cuando sea necesario, facilitando de esta manera el manejo del rango de las condiciones de operación del reactor.

Las cantidades de vapor y aire empleadas se seleccionaron para conseguir una máxima conversión de biomasa, de tal forma que no hubiera carbono sin convertir en los productos ($n_1=0$), y por otra parte, la ventaja de utilizar una alta temperatura: 1500 K, permitió que la cantidad de metano sea insignificante en la composición de syngas, pudiéndose para efectos prácticos, omitir el CH_4 en la siguiente etapa del proceso.

A pesar de que el modelo empleado no cuantifica partículas sólidas que puedan derivarse en el gasificador R-100, en el diagrama de flujo se optó por colocar el ciclón S-100 posterior al reactor, para que luego, por medio del separador S-101, se separen los gases no condensables (CO , CO_2 , N_2 , H_2) de los condensables, de los cuales constituye principalmente vapor, pudiendo contener pequeñas trazas como metanol, ácido acético, acetona y alquitranes (Chandraratne y Daful, 2021), logrando de esta manera un acondicionamiento del syngas para la siguiente fase.

La etapa siguiente, consiste en convertir el syngas en metanol, en la cual, una de las formas de obtenerse, es mediante la hidrogenación del dióxido de carbono, ambos gases contenidos en el syngas, para lo cual, se utilizó el modelo de Van den Busshe y Froment (1996), cuyos resultados son comparables con procesos industriales (Luyben, 2010, Chen et al., 2011, citados por Lüking, 2017), y además, se utilizaron las mismas características de catalizador $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ empleados por Van-Dal y Bouallou (2013), que son, densidad: $1,775 \text{ kg}_{\text{cat}}/\text{m}^3$, diámetro de partícula: 5.5 mm y porosidad: 0.4.

Van-Dal y Bouallou (2013) simularon una planta para absorber el CO_2 , en el cual, lo transformaban en metanol, logrando una conversión del 33 % de CO_2 , basado en el modelo cinético de Van den Busshe y Froment (1996) mencionado líneas arriba, utilizando el simulador Aspen Plus. De forma similar, Nwani (s.f.), utilizando las mismas expresiones cinéticas, pero con el simulador DWSIM, logró también una conversión de 33 % de CO_2 .

El proceso que se observa en la Figura 4, trabaja con un sistema de dos reactores: R-101 y R-102 con doble reciclo, para transformar el syngas en metanol, en el cual, considerando la cantidad de CO_2 entrante y saliente de dicho sistema, se obtuvo una conversión del 82%, lo cual representa un valor considerablemente mayor a las simulaciones descritas en el párrafo anterior.

La corriente del diagrama de flujo denominada "syngas", puede perfectamente aprovecharse en diversas formas, por ejemplo, para generación de energía, producción de gas natural sintético, biocombustibles y ceras mediante procesos Fischer-Tropsch (Genia Bioenergy, 2022), o inclusive adaptar un reactor adicional para aumentar la producción de metanol, para que de esta manera sea un sistema de tres en lugar de dos reactores.

Posteriormente, en el reactor R-103, se lleva a cabo la transformación de metanol en dimetil éter, que a la presión de salida de la sección de producción de metanol (50 bar) y la misma temperatura de operación de $365.65 \text{ }^\circ\text{C}$ empleada por Singh (s.f.), se obtuvieron excelentes valores de conversión de casi el 100 %.

Para la conversión de DME en el reactor R-104, es recomendable utilizar las condiciones de operación estudiadas por Li et al. (2010), para la obtención de etanol: 493 K, 1.5 MPa, y una razón de alimentación $1/47.4/1.6/50$ – DME/CO/Ar/ H_2 , para favorecer la conversión hacia el etanol, que en el presente proceso dio una selectividad de 46.16% y 42.08 % para el metanol y etanol respectivamente, valores que son muy cercanos al 46.30 % y 42.2 % reportados por Li et al. (2010).

Cabe resaltar que, el CO separado del sistema S-102, se utilizó como reactivo para el reactor R-104, pero fue insuficiente para cumplir con la relación $1/47.4$ – DME/CO que se indica en el párrafo anterior, razón por la cual fue necesario implementar una corriente adicional de CO para alimentar el reactor señalado.

De forma similar con la corriente de CO implementada para alimentar el reactor R-104, fue necesario proponer corrientes adicionales de H₂ y Ar, de los cuales el CO y el H₂ constituyen reactivos en exceso y el Ar un inerte, y que se separan en el separador S-105, con la posibilidad de recircularlos para alimentar el reactor R-104, o bien, instalar un sistema adicional para producir metanol adicional a partir del CO y el H₂ sobrantes.

La fase final, consiste en la purificación del etanol, el cual está mezclado con metanol, agua, acetato de metilo y acetato de etilo. Para ello, se emplearon tres columnas de destilación. La primera columna C-100, separa principalmente el metanol con una pureza del 96 %, y el resto son pequeñas cantidades de acetato de metilo y acetato de etilo, que se produjeron como subproductos en el reactor R-104. Esta corriente, designada con el numeral 11 de la Figura 4, resulta de gran importancia, ya que surgen posibilidades para su utilización. Una de ellas es reciclarla al reactor R-103 para producir más DME, y por ende más etanol.

Otra forma de aprovechamiento es purificando el metanol para comercializarlo, de tal forma que funcione como materia prima para otros materiales y productos, los cuales incluyen: adhesivos, pinturas, pantallas LCD, manufactura automotriz, sellantes, lubricantes, plásticos, etil-propileno, polipropileno, tableros de fibra de media densidad, plywood, además del área de combustibles – biocombustibles: biodiesel, MTBE, DME (Methanol Institute, 2022).

Los fondos de la columna C-100 constituyen la alimentación de la columna C-101, donde se purifica parcialmente el etanol. En ambas columnas C-100 y C-101 se configuraron con el modelo termodinámico NRTL y operan a 1 atm. La última columna de destilación C-102, constituye el último paso para la obtención del etanol purificado, la cual, a diferencia de las dos anteriores, se utilizó la termodinámica de la Ley de Raoult, y 10 atm de presión para superar la limitante de mezcla azeotrópica que forman el etanol y el agua, de forma similar como lo utilizó Kishnani (s.f.) para purificar el etanol mediante una columna de alta presión en el cual obtuvo etanol a 99.8 % v/v.

Utilización del etanol como oxigenante

En el proceso de la Figura 4, se obtuvo etanol también al 99.8 % v/v, el cual entra en la categoría de etanol carburante anhidro según la norma INTE E5:2017 (INTE, 2017), que establece que debe tener una pureza mínima del 99.0 % de etanol, para que de esta forma, pueda utilizarse como oxigenante en las gasolinas para motores de combustión interna, pudiendo en este caso, con la capacidad de la biorrefinería y la disponibilidad de la materia prima, abastecer el 5.16 % de las gasolinas en Costa Rica proyectadas por RECOPE (s.f.), para mezclar con etanol.

A modo de comparación, en la ciudad de Cataluña, cuando contaba con una población de 7,000,000 de habitantes, tomando en cuenta además de los residuos forestales, fracciones de residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas y residuos industriales, se alcanzaban 53,000 toneladas diarias de residuos (secos), con lo cual se podrían producir 23,000,000 litros de etanol/día, lo cual equivalía al 66 % de la demanda por 34,500,000 litros/día, con una flotilla vehicular de 5,500,000 unidades (Elías, s.f.).

Con las cifras anteriores, quiere decir que, se pueden producir 0.43 litros de etanol / kg de residuo seco, lo cual muestra cierta similitud con la biorrefinería propuesta, ya que produce 0.31 litros de etanol / kg de residuo seco. Ambos casos se asemejan en que se trata de la producción de biocombustibles de segunda generación, pero difieren en que la biorrefinería planteada contempló solo residuos forestales, mientras que, en el caso de Cataluña, se consideraban residuos forestales, urbanos, agrícolas e industriales.

En el mercado costarricense, se había planteado un proyecto para que, la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), vendiera las gasolinas ECO95 y ECO91, las cuales consistían en mezclar gasolinas con etanol entre 5 % y 10% v/v (RECOPE, 2020), y así tener una alternativa diferente a las que se comercializan con MTBE.

Para desarrollar este proyecto, la forma más viable era sembrando 14,800 hectáreas de caña de azúcar y exclusivas para producir etanol, más todo el etanol que se producía a partir de la melaza como subproducto de la industria azucarera (RECOPE, 2020), para cubrir la demanda hasta el 2039.

El proyecto no fue exitoso, y en la actualidad se continúa vendiendo gasolinas con MTBE, y difiere en gran parte al proyecto propuesto, ya que la idea planteada por RECOPE trataba de un biocombustible de primera generación.

Conclusiones

Anualmente, en la zona norte de Costa Rica, 30 km a la redonda de Boca Arenal de San Carlos, se obtuvieron 40,447 toneladas de residuos de madera.

A partir de los residuos forestales de la zona de estudio, mediante la simulación realizada en DWSIM, y bajo la modalidad termoquímica, se obtuvieron 16,414.30 kilogramos de etanol por día (20.84 metros cúbicos por día), con una pureza del 99.8 % v/v

El diagrama de flujo de proceso elaborado está sujeto a cambios para su optimización. Por ejemplo, el agua, siendo un subproducto de la biorrefinería, puede aprovecharse para recuperar la energía e integrarlo a la misma planta, o incluso, se podría aprovecharla para producir hidrógeno verde.

Para la biorrefinería propuesta y tomando como ejemplo el consumo para el año 2022 y para todo el territorio costarricense, se podrían abastecer el 5.16 % de las gasolinas con el etanol.

La disponibilidad de la materia prima constituye una limitante para el éxito de un proyecto de este tipo, dado que no hay seguridad de poder abarcar el mercado de los residuos, que constituyen la materia prima para la planta, habiendo competidores o inclusive pudiendo surgir durante la vida útil del proyecto.

Ante tal situación, surge la idea y oportunidad de estudiar no solo otras áreas geográficas para cuantificar los desechos forestales, sino también, considerar otros residuos lignocelulósicos de tipo urbano, agrícola e industrial como materia prima, y así aumentar la capacidad de la biorrefinería. Por ejemplo, en la misma región norte de Costa Rica, existen muchas hectáreas destinadas al cultivo de piña, cuyos desechos constituyen un ejemplo de materia prima.

Tomando en cuenta que hay disponibilidad de materia prima, y existe tecnología para transformar la biomasa en etanol, se concluye que técnicamente sí es viable la operación de una biorrefinería en Costa Rica, aspecto que es concordante con el Plan Nacional de Descarbonización y los instrumentos de la OECD.

Se debe llevar a cabo un estudio de factibilidad financiera, para lo cual, tiene que considerarse, entre varios aspectos, que el costo de producir etanol sea inferior a comprarlo, para que el proyecto sea viable.

Referencias

- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2018). *Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2018 y tendencias de las principales especies comercializadas*. Oficina Nacional Forestal, Costa Rica.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Practical Design and Theory. Elsevier.
- BEF (2022). *Proximate and ultimate analysis*. Biomass Energy Foundation
<http://drtlud.com/BEF/proximat.htm>.
- Brunetti, A., Migliori, M., Cozza, D., Catizzone, E., Giordano, G. y Barbieri, G. (2020). Methanol Conversion to Dimethyl Ether in Catalytic Zeolite Membrane Reactors. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, 8, 10471-10479. <https://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02557>

- Caballero, A., Rojas, M., Villalobos, M., Davis, A., Roldán, C., Moya, R. y Puente, A. (2019). Simulación de gasificación de biomasa enriquecida con hidrocarburos. *Tecnología en Marcha*, 32 (4), 60-68.
- Castro, M. (2019). *Lluvia ácida: cómo se forma, composición, reacciones y efectos*. Lifeder. <https://www.lifeder.com/causas-lluvia-acida/>.
- Chacón, L. (2012). *Diagnóstico de las existencias de los residuos forestales en la región Huetar Norte de Costa Rica*. Ministerio de Ambiente y Energía, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, Costa Rica.
- Chacón, L., Coto, O. y Flores, O. (2018). *Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica*. Energía, Medio Ambiente y Desarrollo, preparado para la Secretaría de Planificación del Sub-Sector Energía (SEPSE) Costa Rica.
- Chandraratne, M. y Daful, A. (2021). Recent Perspectives in Pyrolysis Research. En M. Bartoli y Giorcelli, M. (Eds.), *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95170>.
- Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química - RSEQ*, 115 (5), 399-407.
- Dahiya, A. (2020). *Bioenergy. Biomass to Biofuels and Waste to Energy*. Segunda Edición. Elsevier.
- Demichelis, F., Laghezza, M., Chiappero, M. y Fiore, S. (2020). Technical, economic and environmental assessment of bioethanol biorefinery from waste biomass. *Journal of Cleaner Production*, 277 (20). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124111>.
- Dionísio, S., Santoro, D., Bonan, C., Soares, L., Biazi, L., Rabelo, S. y Lenczak, J. (2021). Second-generation ethanol process for integral use of hemicellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. *Fuel*, 304 (15). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121290>.
- E-education (2022). *Products of Combustion*. <https://www.e-education.psu.edu/egee102/node/1951>.
- Elías, X. (s.f.). *Residuos sólidos urbanos* [videoclase]. Programa de Máster en Ingeniería Ambiental. Universidad Europea del Atlántico. España.
- Gao, F., Wang, S., Wang, W., Duan, J., Dong, J., y Chen, G. (2018). Adsorption separation of CO from syngas with CuCl@AC adsorbent by a VPSA process. *RSC Adv.*, 2018, 8, 39362-39370. DOI: 10.1039/c8ra08578a
- Genia Bioenergy (2022). *Syngas: el gas de síntesis o sintegás*. <https://geniabioenergy.com/ques-el-syngas/>
- Gobierno de Costa Rica (2019). *Plan Nacional de Descarbonización, 2018 – 2050*.
- Hingsamer, M. y Jungmeier, G. Biorefineries. (2019). In C. Lago, N. Caldés y Y. Lechón (Eds.), *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy* (pp. 179-222). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00005-4>.
- INTE (2017). Norma INTE E5:2017. Combustibles - Etanol carburante anhidro (especificaciones). *Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica*.
- IRENA (2018). Solid biomass supply for heat and power: Technology brief, *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*.
- Kishnani, D. (s.f.). *Pressure swing distillation column for separation of Ethanol-water mixture*. [Simulación de una columna de destilación para la separación de etanol agua en DWSIM versión 7.5.5]. University of Petroleum and Energy Studies. India.
- Li, X., San, X., Zhang, Y., Ichii, T., Meng, M., Tan, Y. y Tsubaki, N. (2010). Direct Synthesis of Ethanol from Dimethyl Ether and Syngas over Combined H-Mordenite and Cu/ZnO Catalysts. *ChemSus 2010*, 3, 1192-1199. DOI: 10.1002/cssc.201000109
- López, I. (2019). *Análisis de las propiedades fisicoquímicas y a tolerancia al agua, de mezclas con etanol de las gasolinas utilizadas en Costa Rica*. [Tesis para obtener el grado de

- Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica].
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/16079>
- Lüking, L. (2017). *Methanol Production from Syngas. Process modelling and design utilising biomass gasification and integrating hydrogen supply*. [Tesis para obtener el grado de Máster en Tecnología en Energía Sostenible, Universidad Tecnológica de Delft]
- Methanol Institute (2022). *Essential Methanol*. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/Essential-Methanol-Methanol-Institute-Infographic.pdf>
- National Geographic (2022). *El aumento del nivel del mar*.
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-aumento-del-nivel-del-mar>.
- Nwani, A. (s.f.). *Optimization of the Methanol Synthesis by CO₂ Hydrogenation*. [Simulación para la producción de metanol a partir de syngas en DWSIM versión 7.5.5]. University of Laos. Nigeria.
- OECD (2020). *Examen del proceso de adhesión de Costa Rica a la OCDE en las áreas de medio ambiente y residuos*. Informe resumido. Dirección de Medio Ambiente. Comité de Política Ambiental.
- Ray, L., Pattnaik, R., Singh, P., Mishra, S., y Adhya, T. (2021). Environmental impact assessment of wastewater based biorefinery for the recovery of energy and valuable bio-based chemicals in a circular bioeconomy. In T. Bhaskar, S. Varjani, A. Pandey y E. Rene. (Eds.), *Waste Biorefinery, Elsevier*, (pp. 67-101). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-2.00003-X>.
- RECOPE (s.f.). *Estimaciones de demanda de gasolinas*. Departamento Investigación. Refinadora Costarricense de Petróleo.
- RECOPE (2020). *Estudio de factibilidad del proyecto de mezcla de gasolina con etanol a nivel nacional*. Dirección de Planificación, Refinadora Costarricense de Petróleo.
- Rodríguez, D., Zaleta, A., Olivares, A., y Torres, F. (2010). *Análisis y Diseño de un Sistema de Gasificación de Biomasa*. Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM. México.
- Singh, C. (s.f.). *Production of Dimethyl Ether* [Simulación para la producción de dimetil éter DWSIM versión 7.5.5], Rajasthan Technical University, Kota.
- Van-Dal, E. y Bouallou, C. (2013). Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation. *Journal of Cleaner Production*, 57, 2013, 38-45.
- Vanden Bussche, K.M. y Froment, G.F. (1996). A Steady-State Kinetic Model for Methanol Synthesis and the Water Gas Shift Reaction on a Commercial Cu / ZnO / Al₂O₃ Catalyst, *Journal of Catalysis* 161, 1-10.