



MODELOS MATEMÁTICOS Y BIOREFINERÍAS: SINERGIA HACIA LA SUSTENTABILIDAD

MATHEMATICAL MODELS AND BIOREFINERIES: SYNERGY TOWARDS SUSTAINABILITY

Martínez-Guido Sergio Iván *, Gutiérrez-Antonio Claudia¹, Toledano-Ayala Manuel¹, García-Trejo Juan Fernando¹

¹ Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Cp. 76010, Querétaro, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia, correo: maarangel@hotmail.com

Resumen

A nivel mundial, el crecimiento poblacional ha impactado directamente en el incremento en las demandas de alimentos, combustibles, materias primas, y algunos otros productos químicos. Bajo este contexto, la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer los recursos disponibles para futuras generaciones, se ha convertido en un tema de suma relevancia; en la última década las comunidades científicas, gubernamentales y tecnológicas han enfocado sus esfuerzos en ello. En ese sentido, la conversión de biomásas mediante esquemas de biorefinerías permite aprovecharlas en su totalidad para generar productos de valor agregado, biocombustibles, así como bioenergía. Sin embargo, dada la gran variedad de productos que pueden generarse en una biorefinería, su síntesis no es una tarea trivial. Así, la optimización matemática resulta ser una herramienta poderosa que puede emplearse para realizar dicha tarea. Por ello, en este artículo se presenta información sobre los modelos matemáticos, así como las biorefinerías, en aras de mostrar como ambas estrategias pueden hacer sinergia en la implementación de procesos sustentables, rumbo a una economía circular.

Palabras claves: *optimización matemática, sustentabilidad, biorefinerías*

Abstract

Worldwide, population growth has had a direct impact on increasing demand for food, fuel, raw materials, and some other chemicals. In this context, meeting current needs without compromising the resources available to future generations has become a highly relevant issue; in the past decade, the scientific communities, government, and technology have focused their efforts on it. In this sense, the conversion of biomasses through biorefinery schemes allows to take full advantage to generate value-added products, biofuels, as well as bioenergy. However, given the wide variety of products that can be generated in a biorefinery, its synthesis is not a trivial task. Therefore, mathematical optimization turns out to be a powerful tool that can be used to accomplish that task. Therefore, this article presents information on mathematical models as well as biorefineries; in order to show how both strategies can make synergy in the implementation of sustainable processes, towards a circular economy.

Keywords: mathematical optimization, sustainability, biorefineries

1. Introducción

El desarrollo sustentable ha sido uno de los focos de atención para la humanidad entera en las últimas décadas; esto como medida de mitigación ante el creciente cambio climático y sus graves derivaciones (Zhang & Zhang, 2021). En este sentido, se han desarrollado diferentes estrategias para maximizar el aprovechamiento de las materias primas, minimizando los residuos o subproductos, e incorporando fuentes de energías alternas a los combustibles fósiles. Estas estrategias se encuentran alineadas al modelo de Economía circular, en el cual se busca reducir el uso de nuevos recursos. En este contexto, el procesamiento en esquemas de biorefinerías es una alternativa que permite aprovechar en su totalidad las materias primas para generar productos de valor agregado, biocombustibles, así como bioenergía. La definición de biorefinería surge en analogía al concepto de refinería de crudo convencional; en las petro-refinerías se procesa el petróleo para la obtención de combustibles (85% del total de la masa refinada), compuestos y materias primas petroquímicas (15% del total de la masa refinada) (Aristizábal-Marulanda & Cardona-Alzate, 2018); es decir se procesa una sola materia prima para generar una amplia gama de productos. Por lo que, en una biorefinería, una materia prima (biomasa) se convierte en una alta gama de diversos productos de valor agregado, biocombustibles, y bioenergía (eléctrica y/o térmica). En una biorefinería se incluyen diversos procesos de conversión, los cuales pueden ser físicos, mecánicos, termoquímicos, químicos, y biotecnológicos (Alexandri *et al.*, 2020).

Ahora bien, existe una variedad de biomásas con potencial a ser usadas en esquemas de biorefinerías, así como una disparidad en su disponibilidad; derivado de ello, surgen una serie de cuestiones o variables de decisión que deben ser atendidas en la síntesis y diseño de biorefinerías nuevas o existentes. Algunas de estas incógnitas incluyen la compensación de objetivos ambientales, sociales y económicos de dichos sistemas; también se consideran la cantidad de biomasa (tipo y disponibilidad) así como su distribución, la posible

necesidad de sitios de almacén, la capacidad de cada planta procesadora (biorefinería), los balances de materia y energía involucrados, la localización de los mercados, los tipos de transporte, además de cuestiones de seguridad a considerar durante todo el proceso.

Ante ello, ramas científicas como la optimización matemática han tomado mayor relevancia en la última década en sectores gubernamentales, empresariales y por otros competidores interesados. Lo anterior, como consecuencia de la inmensa cantidad de variables que deben ser consideradas al proponer una nueva biorefinería, o la transición de un proceso actual a una biorefinería. Dichas variables, en muchos de los casos, incluyen a regulaciones y restricciones públicas enfocadas a la reducción de las emisiones (Pakseresht *et al.*, 2020). Bajo este contexto la investigación de operaciones se ha integrado como una herramienta de apoyo al desarrollo sustentable, con la meta de determinar el mejor curso de acción (óptimo) de un problema (con toma de decisiones). Así, es posible obtener soluciones mediante el desarrollo de modelos matemáticos representativos de cada sistema en particular, y en algunos casos el conjunto de sistemas a resolver. Como resultado de la integración de la optimización matemática en el diseño y desarrollo de las biorefinerías se han generado herramientas atractivas con miras al desarrollo sustentable. Las herramientas versan sobre la formulación de ecuaciones matemáticas, las cuales permiten la representación operacional y funcional de la biorefinería en sí; lo anterior, con el objeto de obtener soluciones en forma de diagramas de proceso con valores óptimos para la biorefinería en cuestión, bajo estándares y políticas de mejora social, ambiental y económica, generando un panorama general para los tomadores de decisiones.

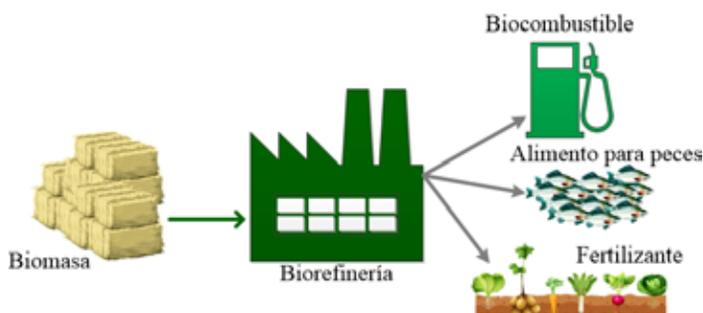
En este sentido, en el presente artículo se realiza una descripción detallada acerca de la clasificación de las biorefinerías, así como la aplicación de éstas sobre algunos casos de estudio particulares. Posteriormente, se definen algunos factores de gran relevancia dentro de la formulación de modelos de optimización matemática; seguida del planteamiento en el que se enmarca la sinergia entre ambas herramientas con aras de la sustentabilidad.

2. Biorefinerías

El concepto de biorefinería considera diferentes plataformas de procesamiento para la conversión de cualquier tipo de biomasa; con el objeto de obtener un alto espectro de bioproductos, y bioenergía considerando siempre rutas de producción sustentables (véase Figura 1).

Figura 1

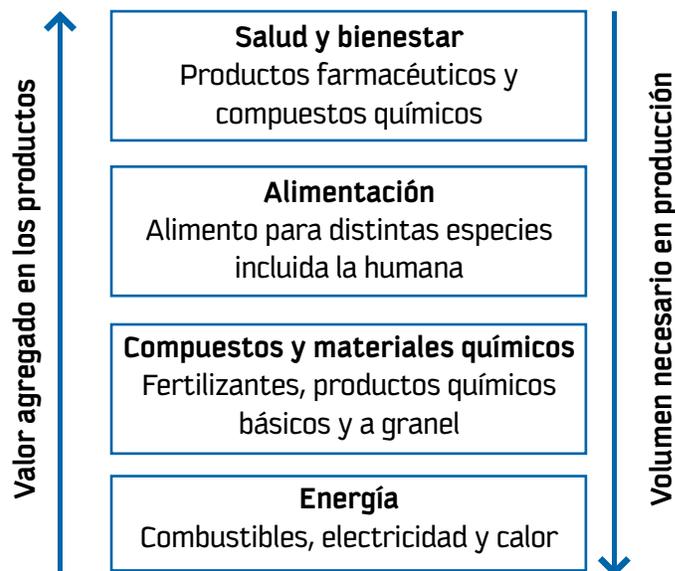
Esquema de una biorefinería



De acuerdo con Mussatto (2016), las biorefinerías se pueden clasificar con base al producto principal obtenido en 2 principales grupos: a) biorefinerías energéticas y b) biorefinerías no energéticas. El primer grupo tiene como meta la transformación de biomasa para la generación de biocombustibles para el sector transporte, mientras que los sub-productos obtenidos se venden como compuestos de valor agregado buscando incrementar el beneficio económico de cada planta. Por otro lado, en el segundo grupo de biorefinerías se usa la biomasa alimentada para la síntesis de compuestos químicos o materiales de alto valor agregado como principal interés, mientras que los subproductos energéticos generados en el proceso son reintegrados en las líneas principales de manufactura. En este sentido, el primer grupo tienen como enmienda el producir altos volúmenes; sin embargo, éstos tienen menor precio en comparación con las biorefinerías del segundo grupo, atendiendo al comportamiento observado en la Figura 2.

Figura 2

Valor agregado de productos generados en una biorefinería



Cabe mencionar que en ambos tipos de biorefinerías es posible considerar la generación de alguno o varios sub-productos mostrados en la Figura 2, con el objeto de incrementar el beneficio económico y cumplir estándares de sustentabilidad.

Alibardi *et al.* (2020) sugieren que la integración de biorefinerías promueve el desarrollo social, principalmente en comunidades con bajo índice de desarrollo humano; además, las biorefinerías son sistemas sostenibles (Dragone *et al.*, 2020), indistintamente del tipo de producto principal que se plante obtener. Adicionalmente, con la integración de biorefinerías es posible promover la implementación y desarrollo de la economía circular, al mismo tiempo que se reduce la presión sobre los recursos renovables y no renovables.

2.1 Aplicación de biorefinerías

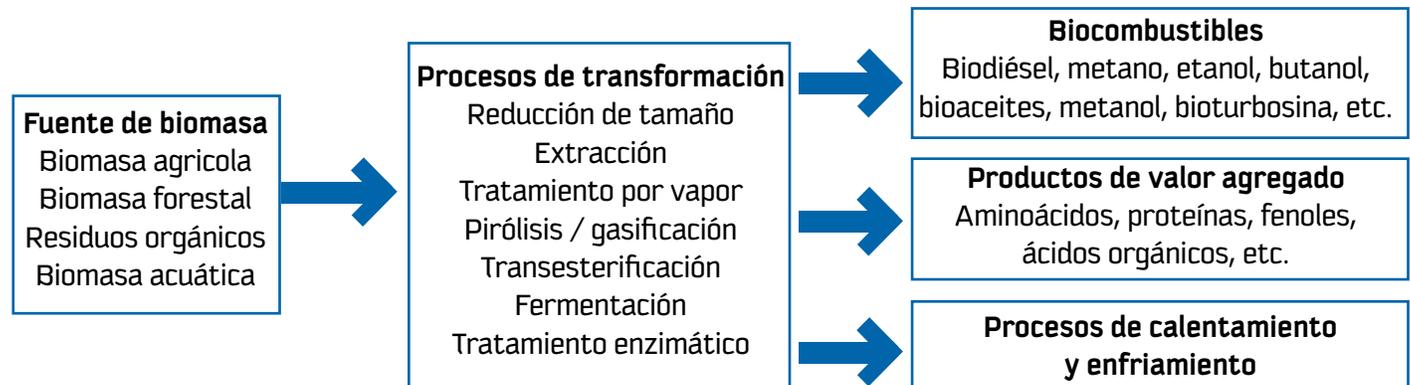
En las últimas dos décadas, diferentes tipos de biomasa (como las mostradas por la Figura 3) se han convertido en materias primas de interés como fuentes renovables de productos de valor agregado y combustibles; en este

contexto, las biorefinerías son el medio para generar, y posteriormente comercializar dichos productos. Adicionalmente, la biorefinerías son un esquema de procesamiento atractivo para la transición a una economía circular, basada en cero residuos; es decir, en

la que sea posible revalorizar los grandes volúmenes de biomasa residual forestal, agro-industrial, y alimenticia. Lo anterior será factible a través de tecnologías limpias basadas en la química verde, desarrollando con ello la bioeconomía (Orejuela-Escobar *et al.*, 2021).

Figura 3

Aplicación de biorefinerías a diferentes tipos de biomazas



Patel & Shah (2021) resaltan que un punto clave en la implementación de cualquier biorefinería es el pretratamiento usado sobre cada tipo de biomasa, ya que de este depende que se le dé un aprovechamiento integral a todos los componentes de los diferentes tipos de biomasa; lo que como consecuencia impactará directamente sobre el rendimiento de los productos, y el aspecto económico del proceso.

Los residuos lignocelulósicos han sido revalorizados mediante la integración de una biorefinería, ya que son los de mayor abundancia a nivel global (con aproximadamente 181.5 billones de toneladas al año). Por ejemplo, la revalorización del aserrín, un residuo forestal, a través de una biorefinería muestra que es posible la producción de ácidos carboxílicos de cadena corta y mediana, la generación de hidrógeno verde, y biometano (Sarkar *et al.*, 2022). Algunas otras materias primas lignocelulósicas como el bagazo de la caña de azúcar, bagazo de sorgo, rastrojo y mazorcas de maíz, y la paja de trigo han sido transformadas en productos de valor agregado (bio-aceites, ácido láctico, ácido succínico, furfural, xilitol, xilosa, vainillina), biocombustibles (biohidrógeno, metano, y etanol), así como cogeneración de electricidad mediante la aplicación de biorefinerías.

Sin embargo, no sólo biomazas sólidas se han estudiado como materias primas en diversas biorefinerías; hoy en día se ha propuesto la integración de la biorefinería como una herramienta para el tratamiento de aguas residuales (Yang *et al.*, 2022). Para esta materia prima se han propuesto tratamientos biológicos como el cultivo de micro-algas; este tratamiento es una herramienta atractiva, debido a que a partir de este tipo de microorganismos pueden extraerse compuestos de valor agregado como aceites, e incluso pigmentos. Adicionalmente, en este tipo de biorefinería es posible la generación de biogás, fertilizantes y agua tratada. Se puede observar que existen diferentes tipos de biorefinerías que se han propuesto en la búsqueda de la mayor cantidad de productos de valor agregado, energéticos y fuentes de servicios posibles; sin embargo, incluso cuando se tienen casos altamente promisorios, existe una gran cantidad de variables a analizar dentro de cada biorefinería propuesta; ello se debe a que los procesos propuestos deben generar una mejora sustentable, al menor costo posible, y con el mejor desarrollo social. En este sentido, como se mencionó en la sección 1, la optimización matemática se ha convertido en una herramienta indispensable para alcanzar todos estos

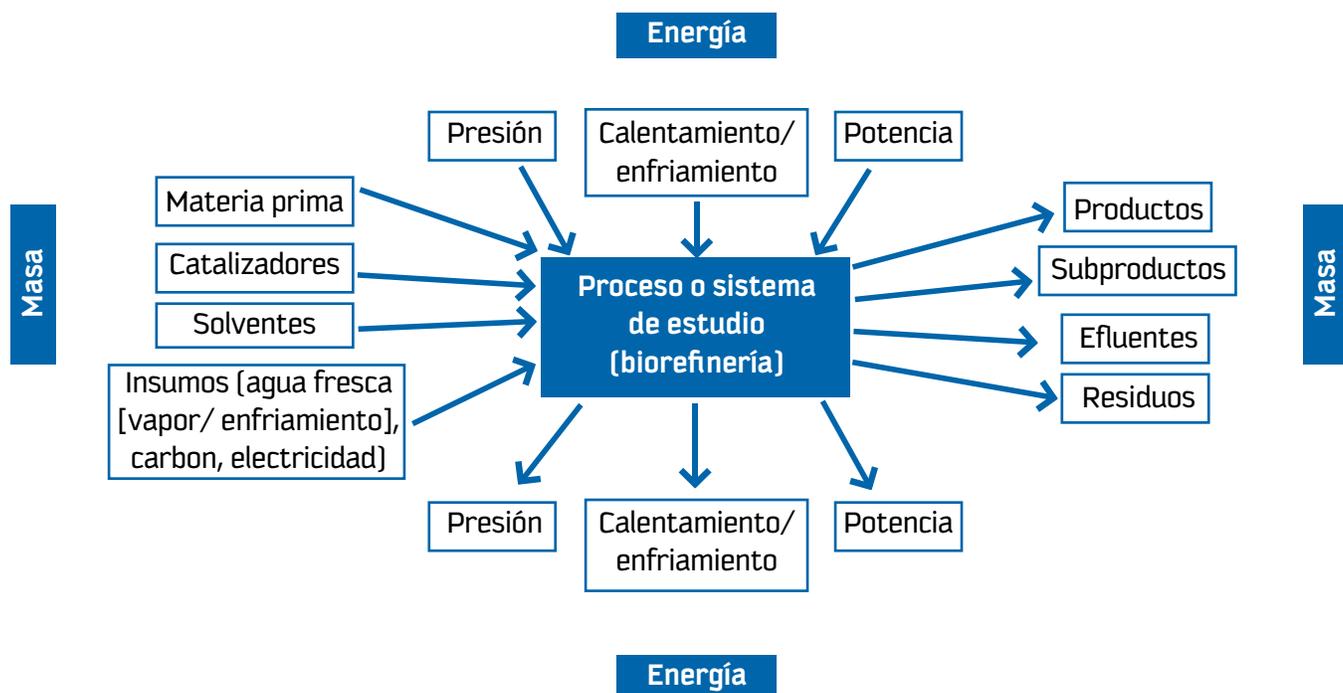
objetivos. Ante ello, en la siguiente sección se describirán algunos conceptos que deben considerarse, para así evidenciar cómo es que las biorefinerías y el modelado matemático proveen de soluciones sostenibles.

3. Los modelos de optimización matemática

De acuerdo con Edgar *et al.* (2001), la optimización matemática puede ser definida como el uso de métodos matemáticos para determinar soluciones con la más alta relación costo-eficiencia-sustentabilidad de cualquier problema de procesos; por ello, la optimización matemática es una herramienta indispensable para la toma de decisiones. Este tipo de instrumentos matemáticos pueden ser aplicados a un sinfín de problemas en términos de diseño, construcción, operación, y análisis de cualquier planta industrial (micro y macro), o incluso aplicable a redes de plantas. En este tipo de problemas, la cantidad de variables involucradas

hace imposible identificar una solución de manera trivial. Adicionalmente, en estos problemas, se presentan como objetivos simples o un conjunto de ellos (funciones objetivo) la maximización o minimización (según sea el caso) de aspectos económicos, rendimientos, emisiones, residuos, desarrollo social, entre otros; dichas funciones objetivo están sujetas a un sistema de ecuaciones (restricciones) dictado por la misma esencia del sistema (o proceso) en sí (El-Halwagi 1997), así como a balances como los mostrados en la Figura 4. Específicamente, las restricciones se deben representar (de forma matemática) mediante expresiones de igualdad o desigualdad. En este sentido, las restricciones en forma de igualdad físicamente representan balances de materia o energía, requerimientos termodinámicos, o ecuaciones de modelado del sistema. Por otra parte, las restricciones en forma de desigualdad pueden representar rangos permitidos de contaminantes, temperaturas, flujos, y presiones, o incluso algunas leyes de la termodinámica.

Figura 4
Balances generales de materia y energía en una biorefinería.



Por otro lado, si todas las ecuaciones del sistema a estudiar (restricciones y funciones objetivo) resultan tener una linealidad matemática (es decir que no presenta división de variables, exponenciales, logaritmos, derivadas, integrales o funciones trigonométricas), entonces el problema de optimización se identifica como un Problema Lineal (LP); de lo contrario se estará hablando de un Problema No Lineal (NLP). Así mismo, la naturaleza de las variables puede clasificar a los problemas de optimización matemática en Problemas Mixtos Enteros (MIP), cuando sólo se emplean variables enteras; o bien, si las variables son continuas reales, se generan Problemas Mixtos Enteros Lineales (MILPs) y Problemas Mixtos Enteros No Lineales (MINLPs).

A partir de todo lo descrito previamente, se puede deducir que la optimización matemática es una herramienta completa capaz de generar soluciones a problemas no triviales, como el diseño de biorefinerías. En este tipo de problemas se identifican todas las restricciones, variables y parámetros que tienen influencia en la función (funciones) objetivo propuesta(s); así, es posible generar soluciones de gran ayuda para los tomadores de decisiones. En la siguiente sección, se revisará como mediante la integración del concepto de biorefinería y modelos matemáticos ha sido posible encontrar soluciones sustentables a diferentes necesidades.

3.1 Optimización matemática en el diseño de biorefinerías

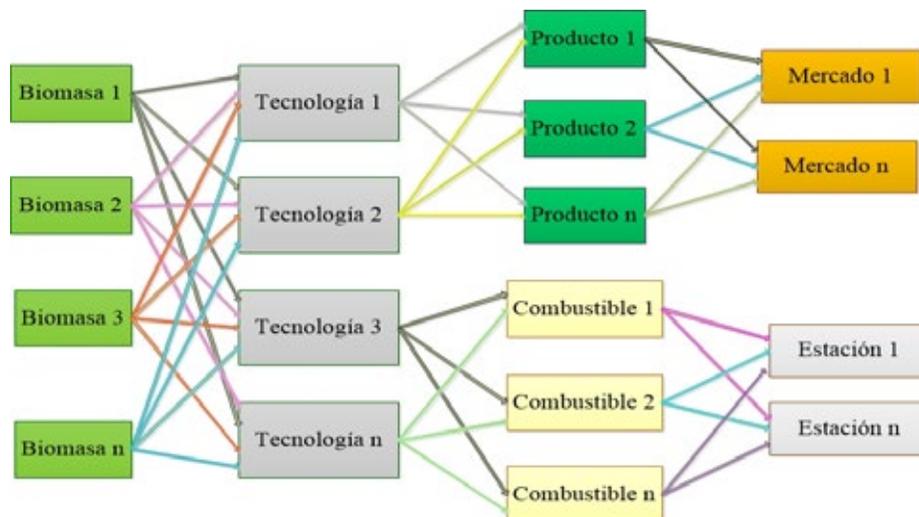
Previamente se ha descrito el funcionamiento general

de una biorefinería, las cuales son plantas industriales que pueden usar una infinidad de biomásas con el fin de obtener productos de alto valor agregado, energéticos y algunos otros servicios como calentamiento y enfriamiento. En este sentido, es posible identificar que, dado la diversidad de materias primas existentes, se requiere considerar primero la composición de cada fuente, la disponibilidad e incluso la frecuencia con la que se cuenta. Estos aspectos tendrán un impacto en la selección del pretratamiento, actividad que como tal tiene vinculados aspectos económicos, ambientales y de consumo energético para cada alternativa disponible. Subsecuentemente, se tiene el proceso de transformación (véase Figura 3), el cual se define a partir de todos los aspectos previamente mencionados, y se añaden variables de análisis que influyen la selección de una alternativa sobre otra.

Por otra parte, el objetivo final de una biorefinería es la comercialización de los productos; siendo ésta otra etapa de la cual se desprenden otros conjuntos de variables a tener en consideración para contribuir a la sustentabilidad y transición a una bio-economía. En este sentido, aspectos que van desde la fuente de materias primas, adquisición, transporte, procesos de transformación (revalorización), así como puntos logísticos contribuyen a la complejidad del diseño de una biorefinería (véase Figura 5); razón por la que se ha buscado una sinergia entre la optimización matemática y el concepto de biorefinería.

Figura 5

Superestructura de una biorefinería



En este contexto, de acuerdo a lo descrito por Holm-Nielsen & Ehimen (2014), es necesario implementar enfoques de optimización matemática para generar configuraciones óptimas de cada biorefinería o conjunto de ellos; esto a través de una metodología conformada en tres etapas principales.

La primera etapa considera el planteamiento de una superestructura, el cual es un diagrama de flujo que emula todas las posibles soluciones en términos de configuraciones posibles para cada biorefinería en cuestión. Posteriormente, se formula el modelo o programa matemático a codificar (o resolver), el cual está conformado por un conjunto de variables discretas y continuas, y que atiende a cada esencia del problema particular (restricciones y balances de materia y energía). Como tercera etapa se tiene la solución del modelo de optimización, caracterizada por soluciones enfocadas a programación disyuntiva (herramientas matemáticas aplicadas a la toma de decisiones), resolvedores enfocados a modelos mixtos enteros lineales y no-lineales, entre otros; los cuales tienen como meta determinar dentro de las posibles soluciones la óptima.

Esta metodología ha sido aplicada por diversos autores; algunos casos muy particulares pueden ser revisados en enfoques propuestos por Santibañez-Aguilar et al. (2011), Belletante et al. (2016), o Rosengart (2017), por dar algunos ejemplos.

4. Estudio de caso

En las últimas décadas diversas materias primas (o biomásas) han sido consideradas como fuentes alternas ante la creciente crisis energética y mitigación del constante cambio climático. Particularmente, la *Jatropha curcas L (JCL)* especie arbórea debido a su resistencia a sequías y mínimos requerimientos nutricionales (Liu & Mai, 2022) ha resultado una fuente promisoría para su aprovechamiento como materia prima de diversos biocombustibles. Bajo este contexto Deeba et al., (2012) a partir de aceite de JCL llevaron a cabo la producción de biodiesel a nivel laboratorio obteniendo rendimientos del 94%. Adicionalmente, los autores propusieron que es posible la producción de biogás a partir de los residuos

que la producción de aceite generaba. Posteriormente Wang, (2016) propuso una biorrefinería considerando los frutos de JCL como materia prima. Está fue simulada en ASPEN PLUS® considerando un flujo de alimentación de 100,000 kg/h, de donde fue posible obtener 19,375 kg/h de aceite y estimar 2,019 kg/h de biodiesel, 1,988 kg/h de propano, 10,797 kg/h de bioturbosina y 169 kg/h de hidrogeno. Similarmente, Romero-Izquiero et al., (2022) propusieron la síntesis de una biorefinería considerando el mismo fruto como materia prima, pero, en dicha simulación (llevada a cabo ASPEN PLUS®) se adiciono la intensificación de procesos. Por lo que a partir de alimentación de material fresco de 1,016,418 kg/h, fue posible estimar un rendimiento de aceite de 140,572kg/h, y unas producciones de 34,640 kg/h de biodiesel, 1,988 kg/h de propano, 39,773 kg/h de bioturbosina y 169 kg/h de hidrogeno.

Por su parte Domínguez-García et al., (2017) proponen el diseño optimo de la cadena de suministro con la capacidad de satisfacer la demanda de biocombustible de aviones (bioturbosina) en México, considerando biorefinerías alimentadas con materias primas como la jatropha, camelina e higuierilla. Para ello, los autores proponen la formulación de un modelo matemático mediante el cual es posible determinar adicional a los precios de venta de dicho combustible, el diseño completo de la cadena de valor, así como parámetros relacionados con los procesos logísticos. A partir del modelo fue posible identificar que se satisfacía el 100% de la demanda de 13 estados de dicho biocombustible, si las materia primas eran usadas como fuente energética.

Bajo este contexto, de acuerdo con Zamarripa-Colmenero & Días-Padilla (2008) reportaron un potencial alto para la producción de JCL de 2.6 millones de ha, y 3.4 millones de ha con potencial medio. En este sentido, con base en los rendimientos reportados con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera "SIAP" (2016) sería posible la producción de aproximadamente 3.26 millones de toneladas de fruto de JCL. A partir de este flujo, de acuerdo con los rendimientos generados en las simulaciones de Wang (2016) y Romero-Izquiero (2022) es posible estimar la extracción de 0.68 millones de toneladas de aceite, y rendimientos respectivos para cada biocombustible como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Producción de biocombustibles estimados.

	Toneladas producidas por año	
	Wang [2016]	Romero-Izquierdo [2022]
Biodiesel	70,860	167,567
Propano	69,772	9,617
Bioturbosina	299,200	374,000
Hidrógeno	5,931	818

Bajo esta premisa productiva de cada tipo de biocombustible, tomando en consideración las ganancias netas reportadas por Domínguez-García *et al.*, (2017), la planificación de la cadena de suministro a partir de JCL es posible predecir los ingresos mostrados en la Tabla 2. Dichos resultados se obtienen a partir de la configuración de la cadena propuesta por dicho trabajo a través de la formulación matemática desarrollado.

Tabla 2

Potencial económico

	Ganancias esperadas (USD/año)	
	Wang [2016]	Romero-Izquierdo [2022]
Biodiesel	73,978,244	174,939,738
Propano	61,539,245	8,481,937
Bioturbosina	260,304,000	325,380,000
Hidrógeno	NA	NA
	395,821,490	508,801,675

A partir del presente caso de estudio es posible identificar que el unir datos experimentales, parámetros generados a partir de la simulación de biorefinerías, así como la interacción con modelos de optimización matemática, conlleva a presentar soluciones sólidas en términos de nuevos procesos productivos que pueden ser de alto valor para los tomadores de decisiones.

Conclusiones

Se ha discutido la propuesta de las biorefinerías como estrategias para el uso de biomasa como materia prima en la generación de productos renovables de alto valor. Asimismo, se muestra la interacción existente entre herramientas de optimización matemática en el diseño y

análisis de este tipo de biorefinerías; también se incluyen las ventajas que este tipo de herramientas proveen en las etapas de diseño y/u operación de sistemas resilientes, transformándolos en sistemas sustentables y sostenibles.

Por otro lado, el uso de estas herramientas permite el análisis de diversos escenarios (operados bajo diferentes condiciones) para una misma biorefinería, mediante el uso de modelos matemáticos (sin la necesidad de instalación de la cadena de suministro en sí y los costos que ello conlleva). Lo anterior con el objeto de experimentar e identificar cuáles son las condiciones óptimas de manejo, resultados que hoy por hoy son imprescindibles para los tomadores de decisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Secretaría de Educación Pública SEP, mediante el apoyo postdoctoral PRODEP-UAQ/332/21 otorgado a S.I. Martínez-Guido.

Referencias bibliográficas

- Alexandri M., Demichelis F., Fiore S., Lübeck M., Pleissner D. Waste Biorefinery: Integrating biorefineries for waste valorization. ELSEVIER. Chapter 22, ISBN 978-0-12-818228-4, 2020.
- Alibardi L., Astrup T.F., Asunis F., Clarke W.P., De Gioannis G., Dessì P., Lens P.N.L., Lavagnolo M.C., Lombardi L., Muntoni A., Pivato A., Poletini A., Pomi R., Rossi A., Spagni A., Sipiga D. Organic waste biorefineries: looking towards implementation. Waste Management. 114, 274-286, 2020.
- Aristizábal-Marulanda V., Cardona-Alzate, C.A. Methods for designing and assessing biorefineries: Review. Biofuels Bioproducts & Biorefining. 13, 789-808, 2018.
- Belletante S., Montastruc L., Negny S., Domenech S. Optimal design of an efficient, profitable and sustainable biorefinery producing acetone, butanol and ethanol: Influence of the in-situ separation on the purification structure. Biochemical Engineering Journal. 116, 195-209, 2016.
- Bertran M.O., Frauzem R., Sanchez-Arcilla A.S., Zhang L., Woodley J.M., Gani R. A generic methodology

- for processing route synthesis and design based on superstructure optimization. *Computer & Chemical Engineering*. 106, 892-910, 2017.
- Deeba, F., Kumar, V., Gautam, K., Saxena, R.K., Sharma, D.K. Bioprocessing of *Jatropha curcas* seed oil and deoiled seed hulls for the production of biodiesel and biogas. *Biomass and Bioenergy*. 40, 13-18, 2012.
- Domínguez-García, S., Gutiérrez-Antonio, C., De-Lira-Flores, J.A., Ponce-Ortega, J.M. Optimal planning for the supply chain of biofuels for aviation in Mexico. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19, 1387-1402. 2017
- Dragone G., Kerssemakers A.A.J., Driessen J.L.S.P., Yamakawa C.K., Brumano L.P., Mussatto, S.I. Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries. *Bioresource Technology*. 302, 122847, 2020.
- Edgar T.F., Himmelblau D.M., Lasdon L.S. *Optimization of Chemical Processes*. McGraw-Hill. Chapter 1, ISBN 007-039359-1, 2001.
- El-Halwagi M.M. *Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Design Tools*. ELSEVIER. Chapter 1, ISBN 978-0-12-236845-5, 1997.
- Holm-Nielsen J.B., Ehimen E.A. *Biorefinery plant design, engineering and process optimization*. Woodhead Publishing. Chapter 4, ISBN 978-0-85709-521-3, 2014.
- Liu, G., Mai, J. Habitat shifts of *Jatropha curcas* L. in the Asia-Pacific region under climate change scenarios. *Energy*. 251, 123885, 2022.
- Mussatto S.I. *Biomass fraction technologies for ligno-cellulosica feedstock based biorefinery*. Elsevier. Chapter 1, ISBN 978-0-12-802323-5, 2016.
- Orejuela-Escobar L.M., Landázuri A.C., Goodell B. Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 6, 83-107, 2021.
- Pakseresht M., Shirazi B., Mahdavi I., Mahdavi-Amiri N. Toward sustainable optimization with stackelberg game between green product family and downstream supply chain. *Sustainable Production and Consumption*. 23, 198-211, 2020.
- Patel A., Shah A.R. Integrated lignocellulosic biorefinery: Gateway for production of second generation ethanol and value added products. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 6, 108-128, 2021.
- Romero-Izquierdo, A.G., Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F.I., Hernández, S. Synthesis and intensification of a biorefinery to produce renewable aviation fuel, biofuels, bioenergy and chemical products from *Jatropha Curcas* fruit. *IET Renewable Power Generation*. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12388>. 2022
- Santibañez-Aguilar J.E., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M. Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50, 8558-8570, 2011.
- Sarkar O., Rova U., Christakopoulos P., Matsakas L. Organosolv pretreated birch sawdust for the production of green hydrogen and renewable chemicals in an integrated biorefinery approach. *Bioresource Technology*. 344, 126164, 2022.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera "SIAP". Generalidades de la Red *Jatropha*. Disponible en: <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/jatropha-jatropha-spp#:~:text=Usos%20y%20producci%C3%B3n%20nacional&text=El%20SIAP%20report%C3%B3%20que%20para,poco%20m%C3%A1s%20de%200.4%20MDP>. 2016
- Wang, W.C. Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from *Jatropha*. *Renewable Energy*. 95, 63-73, 2016.
- Yang J., Van-Lier J.B., Li J., Guo J., Fang F. Integrated anaerobic and algal bioreactors: A promising conceptual alternative approach for conventional sewage treatment. *Bioresource Technology*. 343, 126115, 2022.
- Zamarripa-Colmenero, A., Días-Padilla, G. Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha Curcas* L., como especie de interés bioenergético en México. Disponible en: http://www.oleaginosas.org/art_211.shtml. 2008
- Zhang X., Zhang X. Sustainable design of reinforced concrete structural members using embodied carbon emission and cost optimization. *Journal of Building Engineering*. 44, 102940, 2021.