

PRODUCTIVIDAD Y COMPETITIVIDAD FRUTICOLA

ANDINA

Producto 12. Informe técnico sobre propuestas de desarrollo de biorefinerías a partir del uso de residuos de cosecha, postcosecha e industrialización de la fruta fresca, para su aprovechamiento en la producción de energía u otros subproductos

Carlos Eduardo Orrego Alzate

Carlos Ariel Cardona Alzate

2020





Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un programa de cooperación administrado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), pero con su propia membresía, estructura de gobernabilidad y activos. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Carlos Eduardo Orrego Alzate, Carlos Ariel Cardona Alzate.

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org



Tabla de Contenidos

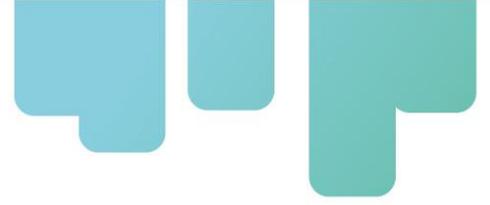
Abstract / Resumen	6
Introducción	8
Objetivos	15
Metodología	16
Protocolos de caracterización	20
Ensayos a escala laboratorio para la producción de aceite esencial de naranja y biogás.	20
Metodología de diseño y simulación	20
Biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja (CN):	21
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	21
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	22
<i>Biorefinería de mayor complejidad optimizada en términos económicos</i>	23
Biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá (CM)	30
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	30
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	30
Biorefinería para el aprovechamiento de aguacate de rechazo (AR)	31
Análisis de las biorefinerías	32
<i>Evaluación ambiental</i>	34
Resultados	37
Composición química de los residuos de cáscara de naranja	37
Rendimiento de obtención de productos de interés	37
<i>Aceite esencial</i>	37
<i>Potencial bioquímico de metano</i>	38
Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja CN	39
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	39
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	39



<i>Biorefinería de mayor complejidad optimizada</i>	40
Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuya CM	41
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	41
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	42
Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacate de rechazo AR	43
Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja CN	44
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	45
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	45
Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá CM	46
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	47
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	48
Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacate de rechazo AR	49
Evaluación ambiental	50
<i>Resultados de la evaluación ambiental de la biorefineria de baja complejidad de residuos de cáscara de naranja (CN)</i>	50
<i>Resultados de la evaluación ambiental de la biorefineria de mayor complejidad de residuos de cáscara de naranja (CN)</i>	56
Discusión	57
Discusión y comparación de la composición química de los residuos de cáscara de naranja	57
<i>Aceite esencial</i>	57
<i>Potencial bioquímico de metano</i>	58
Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja (CN)	58
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	58
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	58
<i>Biorefineria de mayor complejidad optimizada en términos económicos</i>	62
Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá (CM)	63
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	63
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	64
Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el	



aprovechamiento de aguacate de rechazo (AR)	66
<i>Biorefinería de menor complejidad</i>	68
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	68
Discusión del análisis ambiental	71
Discusión del análisis ambiental para la biorefinería de CN de menor complejidad.....	71
<i>Biorefinería de mayor complejidad</i>	74
Conclusiones	75
Referencias Bibliográficas	76
Instituciones participantes	Error! Bookmark not defined.



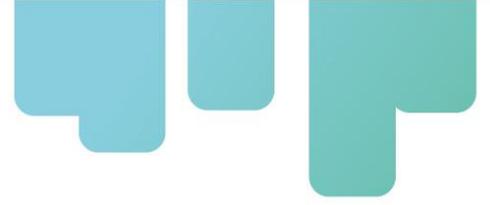
Abstract

Second generation biomass is considered a potential raw material to produce marketable products through the application of different processing lines and conversion routes. Fruit processing chains have as main drawback the generation of lignocellulosic-biomass such as harvest and postharvest residues as well as agro-industrial waste. These residues are not valorized and represent an environmental issue for food industries. Moreover, agricultural, and agro-industries residues reduce the efficiency and sustainability of the entire productive chain. Fruit peel waste obtained from juice production is one of the most studied agro-industrial waste in recent years given the large quantities generated throughout the world. Therefore, the integral valorization of this waste must be approached to obtain added-value products and energy vectors. The added-value products can be derived from the main components of the fruit. In this sense, the biorefinery concept is an alternative to produce different products of fruit waste. In this report, orange peel waste (CN), rejected avocado (AR), and passion fruit peel waste (MC) are taken as a representative and demonstrative waste of the fruits studied to carry out the complete evaluation of a biorefinery that includes not only a detailed technical study based on a specific region in Colombia but also the study of the economic and environmental pillars that are part of sustainability to guarantee a good performance of the process. The rejected avocado (AR) that does not meet the physical and organoleptic characteristics is studied. AR was analyzed for producing avocado oil, animal feed and electricity. The mass and energy balances of the three biorefineries were obtained from Aspen Plus V.9 software. The economic evaluation was carried out based on the methodology proposed by Pitter and Timmerhaus. The economic pre-feasibility was determined from the Net Present Value. Finally, for the biorefineries of CN, the environmental analysis was carried out. The results obtained showed the potential for raw materials to be used in commercial products. The results of this report provide a basis for the flows necessary for the proposed biorefineries to be economically prefeasible. Besides, the environmental results demonstrated the potential of biorefineries to reduce greenhouse gases compared to the current use of these wastes.

Resumen

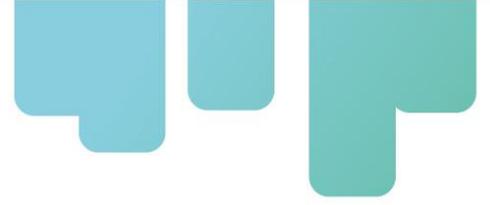
La biomasa de segunda generación se considera una materia prima potencial para obtener productos comercializables mediante la aplicación de diferentes líneas de procesamiento y rutas de conversión. Una de las fallas más importantes de las cadenas de procesamiento de frutas es que esa biomasa de 2ª generación representada en desechos de la cosecha, la postcosecha y la agroindustria de la fruta, no se valoriza y generalmente representa un problema ambiental que en conjunto reduce la eficiencia y sostenibilidad de la cadena.

Los residuos de cáscara de frutas obtenidos de la producción de jugo de son uno de los residuos agroindustriales más estudiados en los últimos años debido a las grandes cantidades generadas



en todo el mundo. Por lo tanto, la valorización integral de esto debe abordarse para obtener productos de valor agregado y vectores de energía derivados de los principales componentes del fruto a través del concepto de biorefinería. En el presente informe se toman los residuos de cáscara de naranja (CN), aguacate rechazado (AR) y residuos de cáscara de maracuyá (CM) como residuos representativos y demostrativos de las frutas estudiadas para realizar la evaluación completa de una biorefinería que incluye no solamente un estudio técnico detallado a la medida para una región en Colombia, sino también el estudio de los pilares económicos y ambientales que forman parte de la sostenibilidad para garantizar un buen desempeño del proceso. También, se analizó el aguacate de rechazo que no cumple con las características físicas y organolépticas para ser comercializado para la producción de aceite de aguacate, alimento animal y electricidad. Los balances de materia y energía fueron obtenidos a partir del software Aspen Plus V.9. La evaluación económica se realizó a partir de la metodología propuesta por Pitter y Timmerhaus. La prefactibilidad económica se determinó a partir del valor presente neto. Finalmente, para las biorefinerías de CN se llevó a cabo el análisis ambiental. Los resultados obtenidos mostraron el potencial de las materias primas para ser aprovechadas en productos comerciales. Los resultados del presente informe permiten tener una base de los flujos necesarios para que las biorefinerías propuestas presenten viabilidad económica. Además, los resultados ambientales demostraron el potencial de las biorefinerías para la disminución de gases de efecto invernadero comparada con el uso actual de estos residuos.

Palabras Clave: Biorefinerías, análisis económico, análisis ambiental.

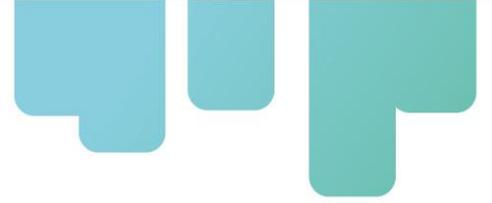


Introducción

Colombia es un país tropical que posee condiciones climáticas favorables para la producción de una gran cantidad de cultivos que sirven para sostener en gran medida la economía del país, así como las demandas de alimentos en las diversas regiones que componen el territorio nacional (Rincón et al., 2014). Entre los cultivos más destacados se tiene el café, el plátano, la caña de azúcar, la palma de aceite. No obstante, otros cultivos como el de naranja, maracuyá, aguacate y mora han sido relevantes en la economía nacional y han jugado un papel protagónico en la obtención de bebidas frutales en la industria de alimentos (Escalante et al., 2010). En efecto, el cultivo de naranja por ejemplo ha visto un incremento del 168% en el país. La producción anual en Colombia fue de 1060 toneladas aproximadamente para el año 2015. Otro aspecto de gran relevancia es el incremento en la superficie sembrada de naranja, rendimiento por hectárea y el costo por tonelada de este fruto. En este sentido, incrementos del 60%, 1200% y 45% han sido observados respectivamente en estos indicadores con base en el año 2015 gracias a la tecnificación de este cultivo. Por otro lado, el cultivo de maracuyá no es un cultivo altamente tecnificado en el país, lo que puede verse reflejado en el número de hectáreas que se han cultivado (i.e., 53 Ha). Además, la producción total de maracuyá fue de 176 toneladas. Por otro lado, Colombia ha sido catalogada como uno de los productores de aguacate (*Persea americana* Mill) más importantes de América Latina. Este país produjo 544,933 toneladas métricas de aguacate (6% de la producción mundial) en 2018. De esta producción, la raza antillana (*Persea americana* var. *Americana*) cubre más del 75% a través del cultivo de las variedades Lorena (*Lauraceae*) y criolla. Además, la raza guatemalteca (*Persea americana* var. *Guatemalensis*) comprende el 25% de la producción nacional con la variedad Hass. Este producto agrícola se consume fresco o procesado para obtener diferentes productos (por ejemplo, guacamole) utilizando pulpa de aguacate como materia prima. Por lo tanto, las semillas y las cáscaras se consideran residuos después del procesamiento del aguacate. Además, grandes cantidades de aguacate son descartados debido a imperfecciones en el fruto, mal apariencia o estar golpeado. A este aguacate se le conoce como aguacate de rechazo (AR).

No obstante, la producción de jugos naturales y otras aplicaciones que relacionan el uso de naranjas y maracuyá generan una gran cantidad de residuos, especialmente aquellos relacionados con las cáscaras. Estas representan un problema para algunas empresas de alimentos debido a la gran generación de residuos y a los problemas asociados para su disposición (Diekmann et al., 2006). A este tipo de residuos se le conoce como biomasa de segunda generación. La biomasa de segunda generación son los residuos que se obtienen a partir de cultivos y su procesamiento (Moncada et al., 2015a).

Actualmente, los residuos de cáscaras de naranja y maracuyá son dispuestos en rellenos sanitarios. No obstante, esta opción resulta ser un gasto que las empresas siempre deben asumir, lo cual, convierte la opción de disposición en un problema más que en una solución (Wang, 2013).

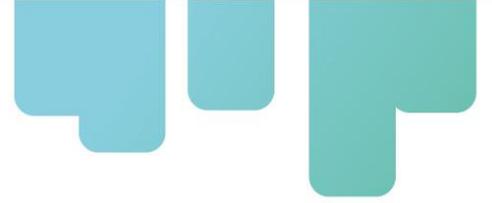


Por otro lado, una de las opciones que se han estudiado recientemente comprende la incineración de los residuos de cáscara de naranja y maracuyá con el fin de generar energía y mitigar los gastos en la disposición del residuo (Phuong et al., 2014). Esta opción es más prometedora, sin embargo, no aprovecha todo el potencial que este tipo de residuos tiene para la generación de otros productos de valor agregado.

La biomasa de segunda generación se considera una materia prima potencial para obtener productos químicos en masa y puros (Ej., Furfural, ácido cítrico, pectina), vectores de energía (Ej., Biogás, bioetanol y biobutanol) y productos comercializables mediante la aplicación de diferentes líneas de procesamiento y rutas de conversión (Cardona Alzate et al., 2018; Murat et al., 2016). Por otro lado, los conceptos ecológicos como la economía circular han aumentado la aplicación de biomasa de segunda generación para disminuir el número de flujos de residuos derivados de un proceso particular a través de mejores estrategias de diseño (Lieder and Rashid, 2016; Mandegari et al., 2017). Por estas razones, los investigadores han explorado la forma de aumentar el valor de las diferentes cadenas productivas a través de la valorización de los residuos agroindustriales obteniendo productos comercializables (Nayak and Bhushan, 2019). Por ejemplo, la cadena productiva de la palma aceitera tiene como productos principales el aceite de palma y el aceite de almendra de palma. Sin embargo, se producen residuos lignocelulósicos, como fibra prensada de palma, frondas, racimos de frutas vacíos y troncos. (Atnaw et al., 2014).

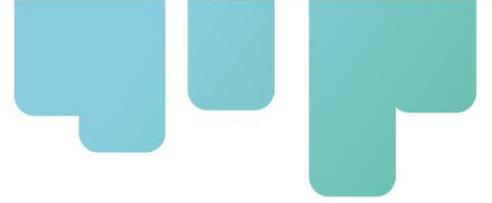
Estos residuos se han utilizado para obtener productos como fluidos de servicio (calor y electricidad), bioetanol, biobutanol, biogás y gas de síntesis, que podrían usarse para reducir los requisitos de energía de los molinos de palma aceitera, disminuir los problemas de generación de residuos sólidos y aumentar los ingresos derivados del aceite en el cultivo de palma (Guangul et al., 2014; Gutiérrez et al., 2009). Además, la cadena productiva de la caña de azúcar genera grandes cantidades de bagazo de caña por tonelada de azúcar producida (es decir, 2,3 kg de bagazo/kg de azúcar). Por lo tanto, se han obtenido diferentes productos como ácido láctico, polihidroxibutirato (PHB), bioetanol, biogás y vapor utilizando este residuo como materia prima (Carvajal et al., 2016; Moncada et al., 2013). Estos productos se han propuesto como alternativas para valorizar la cadena productiva de la caña de azúcar, minimizando el consumo de energía del proceso y aumentando el margen de beneficio del cultivo de la caña de azúcar (Quintero et al., 2013). Del mismo modo, la valorización de diferentes residuos producidos a partir de las cadenas productivas de café, lácteos, madera y cítricos se ha informado en la literatura.

Los residuos de cáscara de naranja (CN) obtenidos de la producción de jugo de naranja son uno de los residuos agroindustriales más estudiados en los últimos años debido a las grandes cantidades generadas en todo el mundo (Paone and Komilis, 2018). Este residuo comprende aproximadamente 30% p/p - 50% p/p de la fruta y genera un problema de eliminación en la industria alimentaria. (Alvarez et al., 2018). Los vertederos y el compost son las principales alternativas utilizadas hoy por diferentes compañías para eliminar estos residuos. Además, CN se ha utilizado para obtener compuestos volátiles y no volátiles aplicados en aromatizantes y



productos cosméticos. (Siles et al., 2016). Sin embargo, son necesarias diferentes formas de valorización para evitar problemas asociados con la disposición en vertederos (por ejemplo, producción de lixiviados y emisiones de compuestos orgánicos). La pectina y el biogás son dos productos potenciales capaces de aumentar los ingresos y la rentabilidad económica de la cadena productiva de la naranja debido a su alto potencial para comercializarse a diferentes escalas. De hecho, las condiciones experimentales para la extracción de pectina y la producción de biogás se han informado en la literatura y se ha investigado la optimización de las condiciones operativas para ambos procesos utilizando un enfoque de diseño experimental y una metodología de respuesta de superficie (Prakash Maran et al., 2013; Solarte-toro et al., 2019). Por ejemplo, Tovar et al. (Tovar et al., 2019) informan un rendimiento de extracción de pectina del 29,37% utilizando ácido fosfórico para extraer la pectina a 95 °C durante 2 horas. Además, Hosseini et al. (Hosseini et al., 2019) investigaron el rendimiento de extracción de pectina utilizando un método asistido por ultrasonido. La mejor condición de operación (es decir, 150 W, 10 min, pH de 1.5 y ácido cítrico como agente de extracción) produce una extracción de pectina de 28.07%. Guo et al. (Guo et al., 2012) informaron un rendimiento de extracción de pectina del 15,47% utilizando ácido clorhídrico a 80 °C durante 1 hora. Por otro lado, se han reportado rendimientos de biogás de 61 litros de metano por kilogramo de sólidos volátiles (es decir, L-CH⁴ / kg-SV), 365 L-CH⁴ / kg-SV y 370 L-CH⁴/kg-SV utilizando condiciones mesofílicas (es decir, 37 °C) y tiempos de residencia superiores a 30 días (Calabrò and Panzera, 2017; Wikandari et al., 2015). Sin embargo, estas investigaciones se han desarrollado de forma independiente, lo que minimiza y restringe la valorización de CN debido al uso limitado de los componentes principales de CN. Por lo tanto, la valorización integral de CN debe abordarse para obtener productos de valor agregado y vectores de energía derivados de los principales componentes de CN a través del concepto de biorefinería.

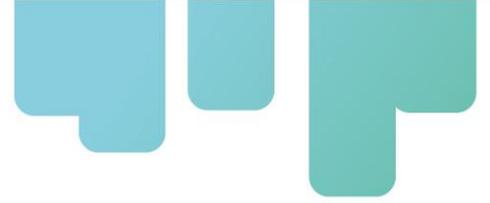
Varios estudios han demostrado el alto potencial del AR para obtener productos comercializables (por ejemplo, ácidos grasos, polifenoles, esteroides, antioxidantes y potasio) y vectores energéticos (por ejemplo, biogás). De hecho, el uso integral de pulpa, cáscara y semilla de aguacate ha sido estudiado bajo el concepto de biorefinería para producir productos de alto valor agregado como compuestos fenólicos, xilitol, bioetanol y aceite. Sin embargo, esos diseños deben ser mejorados considerando aspectos relacionados con la capacidad de producción de aguacate por región, así como la necesidad de que las zonas rurales mejoren aspectos socioeconómicos. Las biorefinerías a pequeña escala son instalaciones de procesamiento en las que la biomasa se mejora mediante tecnologías de proceso simples y menos costosas para impactar en diferentes mercados con múltiples productos. Las ventajas del procesamiento a pequeña escala están relacionadas con el alto potencial para aliviar los costos asociados con el transporte, procesamiento y eliminación de corrientes secundarias. Entonces, se puede observar una reducción significativa de los costos de las materias primas debido a la reducción de intermediarios en la cadena productiva. Otras ventajas relacionadas con las biorefinerías a pequeña escala son la posibilidad de crear nuevas oportunidades de trabajo en zonas rurales, impulsar el uso de biomasa residual y alentar a los agricultores a aumentar el rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, estos sistemas pueden perfilarse como una opción sostenible para ser



introducida en países desarrollados y en desarrollo para superar problemas socioeconómicos y ambientales. Se han informado varios estudios en la literatura abierta relacionados con el diseño y análisis de biorefinerías a pequeña escala. Por ejemplo, Kolfshoten et al. estudiaron la producción de pulpa de remolacha, biogás, etanol y azúcar. Además, Lopes et al., Informaron sobre un análisis tecno-económico de dos procesos de biorefinería a pequeña escala para convertir el rastrojo de maíz y la paja de trigo en isobuteno y xilooligosacáridos. Estos autores informaron la viabilidad económica considerando escalas de procesamiento de 100.000 toneladas y 30.000 toneladas por año para ambas materias primas, respectivamente. Sobre la base de experiencias anteriores, se han propuesto reglas de diseño específicas para biorefinerías a pequeña escala. De hecho, los aspectos a considerar para diseñar estas instalaciones están relacionados con la minimización de gastos de capital (CAPEX), uso de residuos locales como fuentes de bioenergía, obtener productos del mercado local (por ejemplo, productos alimenticios), utilizar unidades de procesamiento modulares y versátiles. y reducir el número de horas-hombre. Estas reglas fueron propuestas para incrementar el desempeño económico de las biorefinerías de pequeña escala, ya que estas instalaciones no son favorecidas por el concepto de economía de escala. En consecuencia, las biorefinerías a pequeña escala deben destinarse a producir alimentos y piensos y bioenergía.

El concepto de biorefinería implica un aprovechamiento integral de cualquier material haciendo uso de sus principales componentes para la obtención de productos de valor agregado a través de la implementación de procesos biotecnológicos, termoquímicos y catalíticos que generen un impacto positivo desde la perspectiva técnica, energética, económica, ambiental y social. En este sentido, las biorefinerías pueden verse contempladas como entidades que generan productos de valor agregado a partir de un recurso como lo es la biomasa (e.g., forestal, agroindustrial, agrícola). Además, las biorefinerías pueden verse contempladas como entidades de procesamiento análogas a las refinerías de petróleo debido a la gran cantidad de productos que es posible obtener a partir de ella al incluir procesos catalíticos para la generación de productos de alto valor agregado que hasta el momento únicamente eran obtenidos a partir del refinamiento del crudo. Finalmente, la implementación de biorefinerías para el aprovechamiento de biomasa ha sido contemplada como una posible alternativa para la mitigación de los problemas ambientales causados por el excesivo uso de fuentes no renovables de energía como lo son la gasolina, el gas natural y carbón, los cuales, al ser extraídos generan un déficit ambiental de grandes magnitudes.

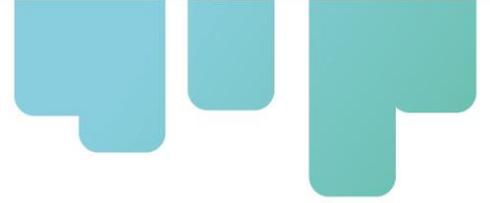
Actualmente, el gobierno colombiano ha incentivado el uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) a través del marco jurídico expuesto en la **Tabla 1**, en los cuales se fundamenta el uso de fuentes no convencionales de energía en proyectos ligados al sector energético y su aprovechamiento integral a través de rutas tecnológicas que sean innovadoras en el país. Por tanto, el objetivo del presente informe es plantear desde un punto de vista conceptual dos biorefinerías empleando procesos biotecnológicos, termoquímicos y catalíticos para la obtención de productos de valor agregado en el contexto colombiano empleando herramientas de



simulación como alternativa en el manejo y disposición de los residuos de cáscara de naranja y maracuyá generados en el eje cafetero.

Tabla 1. Marco jurídico de las energías renovables en Colombia.

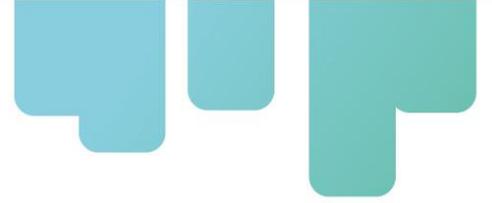
Norma	Objeto
Decreto 2492 de 2014	Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda
Decreto 2469 de 2014	Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración
Decreto 2143 de 2015	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014
Resolución UPME 0281 de 2015	Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala
Resolución CREG 024 de 2015	Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)
Decreto 1623 de 2015	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas
Resolución Ministerio de Ambiente 1312 de 11 agosto de 2016	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras determinaciones
Resolución Ministerio de Ambiente 1283 de 8 agosto de 2016	Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los



	artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones
Decreto 348 de 2017	Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala
Decreto 1543 de 2017	Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, Fenoge.
Resolución CREG 167 de 2017	Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas.
Resolución CREG. 201 de 2017	Por la cual se modifica la Resolución CREG 243 de 2016, que define la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad, ENFICC, de plantas solares fotovoltaicas.
Decreto 570 de 2018	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones.
Resolución CREG 015 de 2018	Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional".
Resolución CREG 030 de 2018	Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.
Resolución CREG 038 de 2018	Por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas.

A pesar de esto y aunque en el contexto colombiano aún no se hable de biorefinerías, resulta ventajoso exponer cada uno de las posibles opciones de aprovechamiento integral que pueden llegar a tener los residuos provenientes de la industria de alimentos (Moncada et al., 2014a, 2013).

En la literatura, se encuentra gran variedad de propuestas bajo enfoques de biorefinerías y formas



de valorización como alternativas al uso de CN, CM y AR como materia prima. Por ejemplo, Patsalou et al. (Patsalou et al., 2017) han descrito la producción de aceite esencial, pectina y ácido succínico utilizando CN como materia prima. Estos autores concluyen que la valorización de CN es una materia prima prometedora para producir ácido succínico como un producto de valor agregado. Sin embargo, un análisis económico preliminar estableció la inviabilidad de la valorización de CN debido a los altos costos de la enzima en la etapa de sacarificación. Además, Siles et al. (Siles et al., 2016) proponen la valorización de CN mediante combustión, biometanización y co-compostaje. Sin embargo, la viabilidad económica de estas alternativas no está garantizada debido a los requisitos de alta energía involucrados en estos procesos. A partir de estas experiencias, se destaca la importancia del análisis tecnoeconómico y ambiental en el diseño general de la biorefinería. Por lo tanto, la evaluación completa de una biorefinería CN debe involucrar los tres pilares de la sostenibilidad para garantizar un buen desempeño del proceso (Palmeros Parada et al., 2017). Además, es deseable la aplicación de datos experimentales como entrada para mejorar el diseño conceptual de cada una de las líneas de procesamiento en un sistema de biorefinería. Todos estos aspectos se reflejan en la definición de biorefinería dada por Moncada et al. (Moncada B. et al., 2016).



Objetivos

✓ **Objetivo general.**

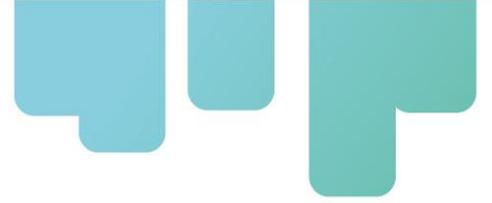
Proponer esquemas de biorefinación para los residuos de cosecha, postcosecha e industrialización de la fruta fresca, para su aprovechamiento en la producción de energía u otros subproductos relacionados.

✓ **Objetivos específicos.**

Obtener productos de valor agregado y vectores de energía derivados de los principales componentes de la cáscara de naranja – CN- a través del concepto de biorefinerías.

Proponer y evaluar rutas de aprovechamiento de cáscara de maracuyá a través del concepto de biorefinería.

Proponer y evaluar rutas de aprovechamiento de aguacate de rechazo haciendo uso de la pulpa, cáscara y semilla a través del concepto de biorefinería.



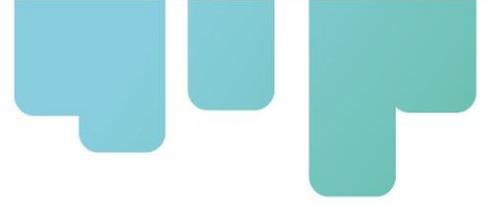
Metodología

Las etapas de diseño y simulación de biorefinerías a partir de estas materias primas requiere de un conocimiento completo de la caracterización de la materia prima para obtener un panorama global de los posibles productos que es posible obtener. En este sentido, diferentes metodologías de caracterización deben ser recopiladas con el fin de tener la información más relevante de las materias primas desde cualquier punto de vista. Los análisis más relevantes que deben ser consultados en la literatura son:

- **Análisis de caracterización fisicoquímica:** en este análisis determina el contenido de carbohidratos que definen los productos a obtener. Se halla la composición basada en celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina, proteína y azúcares solubles que son característicos de los residuos de cáscara de naranja, maracuyá y las fracciones de aguacate de rechazo (pulpa, semilla y cáscara).
- **Análisis próximo:** este análisis provee información relevante relacionada con el contenido energético del material bajo estudio. En efecto, el contenido de material volátil, carbono fijo y cenizas es determinado a través de procesos de combustión. Por otro lado, el cálculo de dichas fracciones permite obtener de manera muy acertada bajo el uso de correlaciones empíricas el poder calorífico superior de la materia prima bajo análisis.
- **Análisis último:** en este análisis el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre es determinado con el fin de completar los balances de materia en aquellas unidades de proceso que requieren de un balance elemental debido a la naturaleza de su simulación (e.g., conversión de las cáscaras a biogás).

Otro tipo de información que es de vital importancia en el desarrollo de biorefinerías a partir de residuos de cáscara de naranja, aguacate y maracuyá está basado en la cuantificación de las fracciones de aceites que pueden ser extraídas, así como la cantidad y composición de compuestos antioxidantes (polifenólicos) que se encuentran presentes en la matriz lignocelulósica del material. Tal tipo de información puede no ser reflejada en ninguno de los métodos mencionados anteriormente debido a que los métodos de caracterización estándar no los considera. No obstante, una gran relevancia se ha fijado en este tipo de componentes debido al alto valor agregado que la extracción de estos productos tiene en el mercado global.

Una revisión bibliográfica exhaustiva debe ser realizada con el fin de encontrar de la manera más detallada y completa posible la composición de los residuos de cáscara de naranja y maracuyá. Lo anterior puede ser encontrado a través de los trabajos reportados por Chamorro et al., (Pantoja-Chamorro et al., 2017), Cordoba et al., (Córdoba et al., 2005) y Diekmann et al., (Diekmann et al., 2006). Por otro lado, la obtención experimental de la caracterización química de la materia prima



y de los productos de interés se puede llevar a cabo.

Lo anterior permite dilucidar que es necesario realizar o asumir una composición global de las materias primas objeto de estudio empleando los datos reportados por diferentes autores. En este punto vale la pena destacar que la caracterización tanto de la cáscara de naranja y maracuyá debe ser realizada de manera experimental con el fin de corroborar la composición global calculada. Por tanto, el diseño y simulación de las biorefinerías se hace de tal manera que sean flexibles en términos de la composición inicial de la materia prima.

En este trabajo, se propusieron diferentes esquemas de biorefinerías considerando como materia prima los residuos de cascara de naranja (CN), los residuos de cascara de maracuyá (CM) y el aguacate de rechazo (AR). La Figura 1 presenta un esquema global de las biorefinerías propuestas para cada una de las materias primas y los análisis involucrados.

Para la CN se llevó a cabo la caracterización química y la obtención experimental de los productos seleccionados para la biorefinería de menor complejidad. Para esta materia prima se realizó también la optimización en términos económicos de una biorefinería de mayor complejidad que involucra el uso de todas las fracciones de la materia prima. En este sentido, se planteó una biorefinería que aprovechara la fracción de aceite esencial, los compuestos polifenólicos presentes en la cáscara, la pectina, la celulosa para la producción de acetona, butanol y etanol y la hemicelulosa, lignina y proteína para la producción de biogás y fertilizante. La producción de pectina cítrica no es rentable en términos económicos, por lo cual se ha propuesto para la producción de diferentes ácidos orgánicos de mayor valor agregado. Entre ellos se encuentra el ácido múxico. El ácido múxico es un compuesto que puede ser utilizado en aplicaciones alimentarias. De hecho, este compuesto tiene las mismas aplicaciones que el ácido L-tartárico. Por lo tanto, puede ser usado con carbonato para producir una liberación lenta de dióxido de carbono (CO_2), que se usa como agente leudante en la harina leudante. Esta aplicación se utilizó en la década de 1920. Una empresa llamada Eureka en Montana producía alrededor de 600 toneladas al año, que se utilizaban por completo como ácido de horneado en la harina con levadura automática (Anonymus, 1922). Otra aplicación existente es el uso de este compuesto como ingrediente de productos para el cuidado de la piel (Mehtiö et al., 2016). Las aplicaciones para el cuidado de la piel son protección de la piel, anti-contaminación y anti-envejecimiento (Lewkowski, 2005). El ácido múxico también puede ser un precursor de una posterior conversión química. Por ejemplo, el ácido múxico se puede convertir cuantitativamente en ácido adípico (Taguchi et al., 2008), que se utiliza en la producción de nailon. Otro producto es el ácido furano dicarboxílico (FDCA). No obstante, los rendimientos de producción siguen siendo bajos (Taguchi et al., 2008). Aun así, el FDCA tiene un gran potencial debido a que este compuesto se puede polimerizar en furanoato de polietileno (PEF), un polímero con propiedades de barrera a los gases similares a las del tereftalato de polietileno (PET) por lo que tiene el potencial de reemplazar al PET. Dado que el PEF es un producto a base de biomasa mientras que el PET es un producto a base de aceite, las ventajas medioambientales de este producto pueden resultar atractivas para



los distintos responsables de la toma de decisiones de la industria. Debido a esto, en este trabajo se estudió su obtención a partir de la pectina extraída de CN.

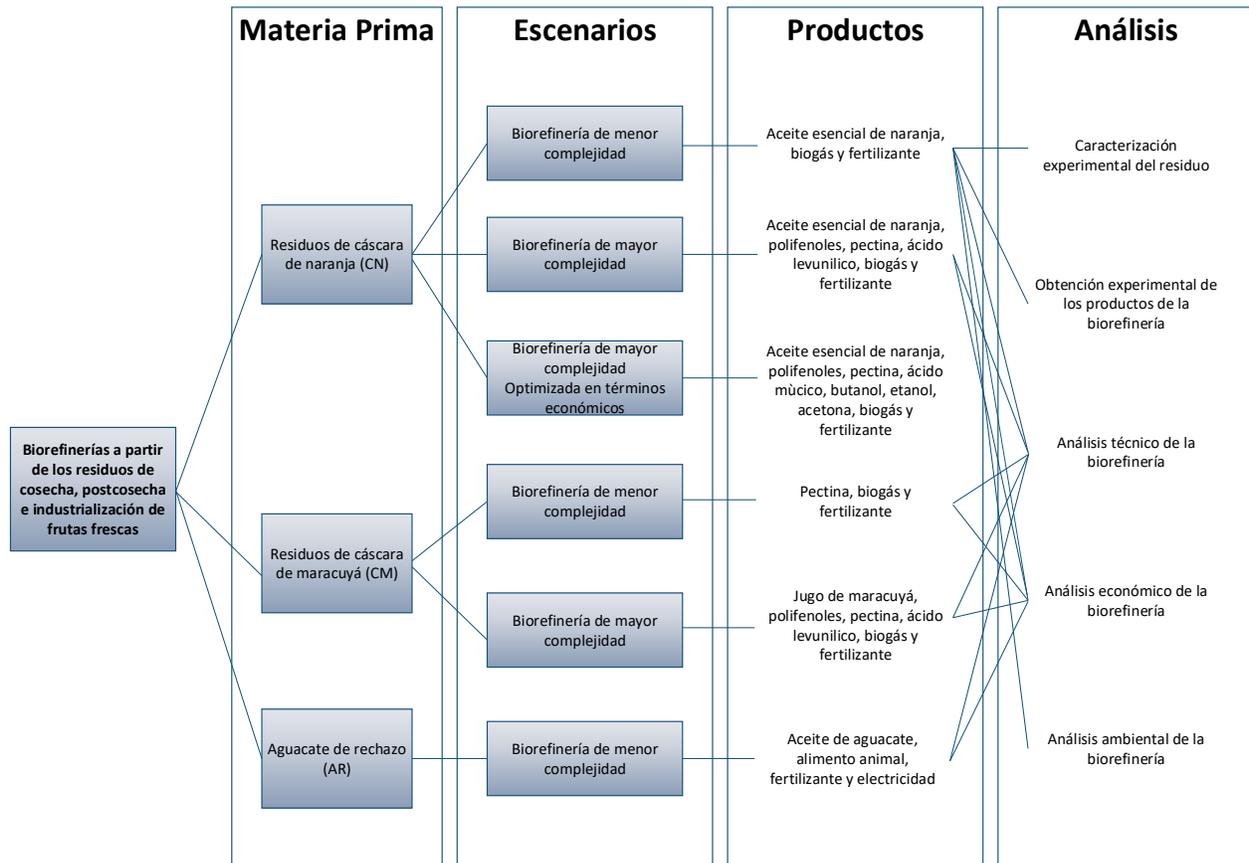
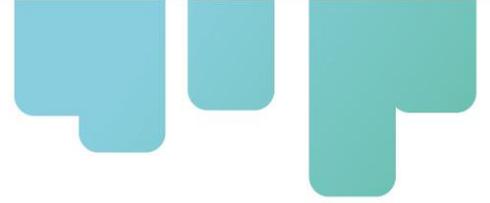


Figura 1. Esquema de biorefinerías, productos y análisis para los esquemas propuestos.

Para el caso de las biorefinerías de CM y AR la caracterización química fue obtenida de la literatura abierta.

Tabla 2. Composición química del fruto de maracuyá.

Composición másica del fruto de maracuyá.		Composición del jugo de maracuyá.	
Componente	%p/p	Componente	% p/p
Jugo	37	Humedad	79,63
Cáscara	50	Azúcares reductores (glucosa)	8,01
		Azúcares no reductores (sacarosa)	7,63
Semillas	13	Almidón	3,57
		Proteína	1,16
Composición de las semillas de maracuyá			

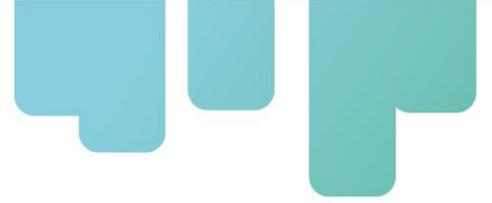


Componente	% p/p	Componente	% p/p
Humedad	7,24	Fibra cruda	51,48
Aceite	25,60	Celulosa	20,59
Linoleico	17,64	Hemicelulosa	25,74
Oleico	4,27	Lignina	5,148
Palmítico	3,69	Proteína	14,1
		Ceniza	1,58
Composición de la cáscara de maracuyá			
Componente	% p/p	Componente	% p/p
Humedad	6,65	Lignina	2,641
Pectina	16,35	Cenizas	1,61
Celulosa	10,564	Extractos solubles (glucosa)	48,98
Hemicelulosa	13,205		

Tabla 3. Composición química del fruto de aguacate.

Distribución másica del aguacate.		Composición de la cáscara de aguacate	
Componente	% p/p	Componente	% p/p
Pulpa	12,1	Humedad	7,33
		Extractivos	34,38
Cáscara	15,3	Celulosa	27,58
		Hemicelulosa	25,30
Semilla	72,6	Lignina	4,37
		Cenizas	1,04
Composición de la semilla de aguacate			
Componente	% p/p		
Humedad	7,02		
Extractivos	35,95		
Celulosa	6,48		
Hemicelulosa	47,88		
Lignina	1,79		
Cenizas	0,88		

Las caracterizaciones mostradas en las Tablas 2 y 3 muestran los residuos provenientes de la industria de alimentos relacionadas con los residuos de CM y AR. Estos residuos tienen una gran cantidad de extractivos y materiales solubles en agua, los cuales, son aquellos que conforman parte del jugo extraído de ambas frutas. La composición para la cáscara de naranja es especificada según la caracterización fisicoquímica realizada por Martínez et al., (Martínez Sabajanes et al., 2012) and Álvarez et al., (Alvarez et al., 2018). Por otro lado, la composición fisicoquímica de la cáscara de maracuyá fue tomada de los valores reportados por Córdoba et al., (Córdoba et al., 2005). También en la Tablas 2 y 3 muestran que el contenido de humedad inicial de las muestras



varía según el tipo de ensayo que se esté realizando. Por tanto, durante la simulación de procesos se realiza una etapa de secado.

Protocolos de caracterización

Los ensayos de caracterización de las materias primas se relacionan en el Anexo 1. La caracterización de la materia prima comprende la cuantificación de:

- ✓ Extractivos en agua: Compuestos solubles en agua
- ✓ Extractivos en etanol: Compuestos solubles en etanol
- ✓ Fibra: Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.
- ✓ Pectina: Contenido de pectina de la materia prima
- ✓ Grasas: Ácidos grasos saturados e insaturados presentes en la materia prima
- ✓ Proteína: Contenido de proteína de la materia prima
- ✓ Ceniza: Contenido de cenizas de la materia prima

Ensayos a escala laboratorio para la producción de aceite esencial de naranja y biogás.

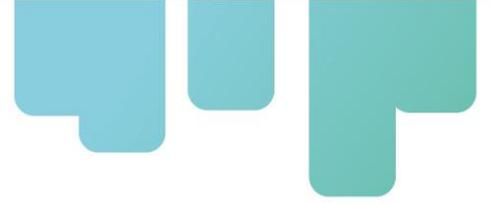
Las metodologías de obtención de los productos de interés para la simulación de la biorefinería de baja complejidad se relacionan en el Anexo 2.

Metodología de diseño y simulación

Actualmente se emplean tres métodos diferentes para el diseño y análisis de biorefinerías. El método de la etapa inicial emplea un marco de decisiones objetivas múltiples para la evaluación preliminar de los procesos químicos en la etapa de laboratorio (Posada et al., 2013). El diseño conceptual abarca conceptos de jerarquía, secuenciación e integración para obtener modelos de procesos teóricos y prácticos (Moncada B et al., 2016). La metodología de optimización considera una biblioteca de modelos para la generación de superestructuras (diferentes rutas de transformación para diferentes tipos de productos) (Zondervan et al., 2011). En este trabajo se emplea el diseño conceptual para la biorefinería propuesta. El primer paso es establecer el objetivo general, la materia prima y los productos. El segundo paso de la metodología de diseño de biorefinerías incluye el uso de conceptos como jerarquía y secuenciación.

El esquema de biorefinería de la cáccara de naranja (CN) se explica considerando diferentes operaciones unitarias, así como las condiciones del proceso. Las diferentes configuraciones se diseñaron siguiendo la estrategia para el diseño conceptual de biorefinerías propuesta por Moncada et al., (Moncada et al., 2014b). El tercer paso es recopilar la información necesaria para el diseño de los procesos de transformación de CN (es decir, rendimiento, condiciones de funcionamiento). Este último paso corresponde al modelado de las unidades de proceso propuestas para cada producto seleccionado en el software Aspen Plus V.9. Los balances de masa y energía se obtienen en este paso.

A partir de la composición de cada uno de los residuos es posible dilucidar un camino lógico en el



cual se pueda explotar de la mejor manera las principales cualidades de cada residuo. En este sentido, se discuten las rutas tecnológicas que se van a seguir para el aprovechamiento de estos residuos. Los principales productos que pueden ser obtenidos a partir de los residuos de naranja y maracuyá son: aceite esencial, pectina, polifenoles (en el caso de la cáscara de naranja), biogás y ácido levulinico. La cantidad de productos a obtener a partir de estos residuos implica que se debe realizar un diseño conceptual aplicado a biorefinerías, tal y como es expuesto por Moncada et al., (Moncada B et al., 2016).

Se propusieron tres biorefinerías para aprovechar CN. La primera biorefinería comprende un procesamiento sencillo para la extracción de aceite esencial y producción de biogás. La segunda biorefinería comprende un proceso de mayor complejidad que involucra la producción de aceite esencial, polifenoles, pectina, ácido levulinico y biogás. Esta alternativa se propone con el fin de demostrar que la materia prima analizada puede ser utilizada para la obtención de una mayor gama de productos. Por último, la tercera biorefinería comprende un procesamiento de mayor complejidad que abarca una mayor gama de productos como lo son la acetona, butanol, etanol y ácido místico. Esta última biorefinería se optimizó en términos económicos con el fin de obtener la mejor ruta de conversión.

Para los residuos de CM se propusieron dos biorefinerías. La primera biorefinería comprende la producción de pectina y biogás. Esta biorefinería es denominada biorefinería de menor complejidad. La biorefinería de mayor complejidad involucra la producción de jugo de maracuyá, polifenoles, pectina, ácido levulinico y biogás.

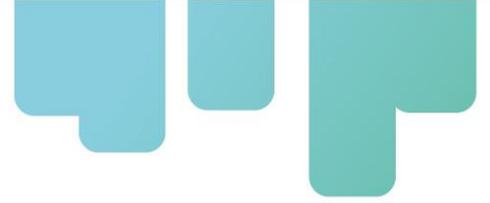
Los AR fueron analizados para la producción de aceite de aguacate a partir de la pulpa, la producción de alimento animal a partir del sólido resultante de la extracción de aceite. Por otro lado, la semilla y cáscara fueron aprovechadas para la producción de biogás. El biogás producido fue utilizado para la obtención de electricidad.

Cada una de las biorefinerías propuestas se explicaran en la siguiente sección:

Biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja (CN):

Biorefinería de menor complejidad

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques entrada-salida de la biorefinería de menor complejidad propuesta para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja. El residuo de cáscara de naranja posee un gran contenido de humedad y un tamaño de partícula que no es el apropiado en ninguna de las operaciones que se muestran en el diagrama. Por tanto, una etapa de secado y molienda son propuestas. La humedad de la materia prima a ser considerada en la simulación será del 10% mientras que el tamaño de partícula será de 2 mm, tal y como reporta Marin et al., (Mira et al., 1999) con el fin de maximizar desde un principio los efectos de transferencia de masa en cada uno de los procesos a los cuales las cáscaras de naranja vayan a ser sometidas. El primer paso es extraer el aceite esencial. El proceso se propone de acuerdo con



la etapa experimental realizada. Los resultados obtenidos son utilizados como datos de entrada en el proceso de simulación. La extracción de aceite esencial se lleva a cabo por destilación con arrastre de vapor. A partir de este proceso, la membrana celular de la CN se dilata con lo cual el vapor puede arrastrar las moléculas más volátiles. Las moléculas más volátiles corresponden a terpenos que conforman el aceite esencial. Este paso sirve como pretratamiento para la producción de biogás. En este paso se lleva a cabo una fermentación en ausencia de oxígeno. Los microorganismos utilizados son un cultivo de bacterias que degradan el material orgánico para producir biogás. El biogás producido comprende metano y dióxido de carbono principalmente. El residuo líquido de la fermentación presenta grandes cantidades de sales y minerales por lo cual puede ser utilizado como fertilizante orgánico:

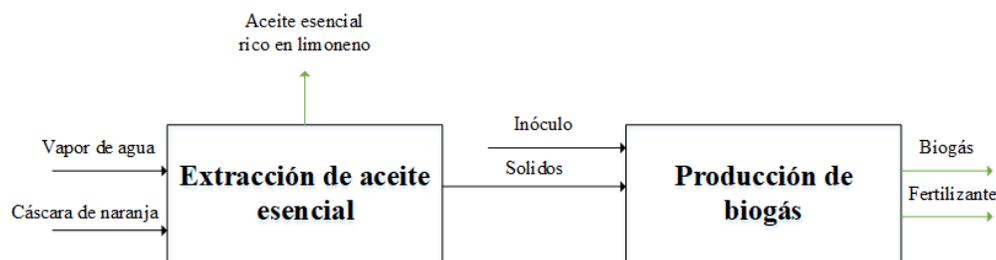


Figura 1 Biorefinería de menor complejidad para el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja.

Biorefinería de mayor complejidad

En primer lugar, los compuestos de más alto valor agregado serán generados en los primeros bloques de trabajo de la biorefinería con el fin de obtener la mayor cantidad de estos como sea posible. Entre los productos de mayor valor agregado es posible encontrar el aceite esencial y los compuestos polifenólicos. Luego de su extracción empleando técnicas altamente investigadas en la literatura, tales como la extracción con fluidos supercríticos, se procede a la obtención de aquellos productos que no sean vectores energéticos (i.e., aceite esencial, compuestos polifenólicos, ácido levulínico). Por último, aquellos productos relacionados con la generación de energía serán los últimos en ser generados debido a que son los que menores costos de producción poseen. A continuación, se explica de manera detallada cada una de las biorefinerías planteadas para el aprovechamiento integral de CN:

La Figura 3 muestra el diagrama de bloques entrada – salida de la biorefinería de mayor complejidad propuesta para el aprovechamiento de los residuos de cáscara de naranja proveniente de la industria de alimentos.

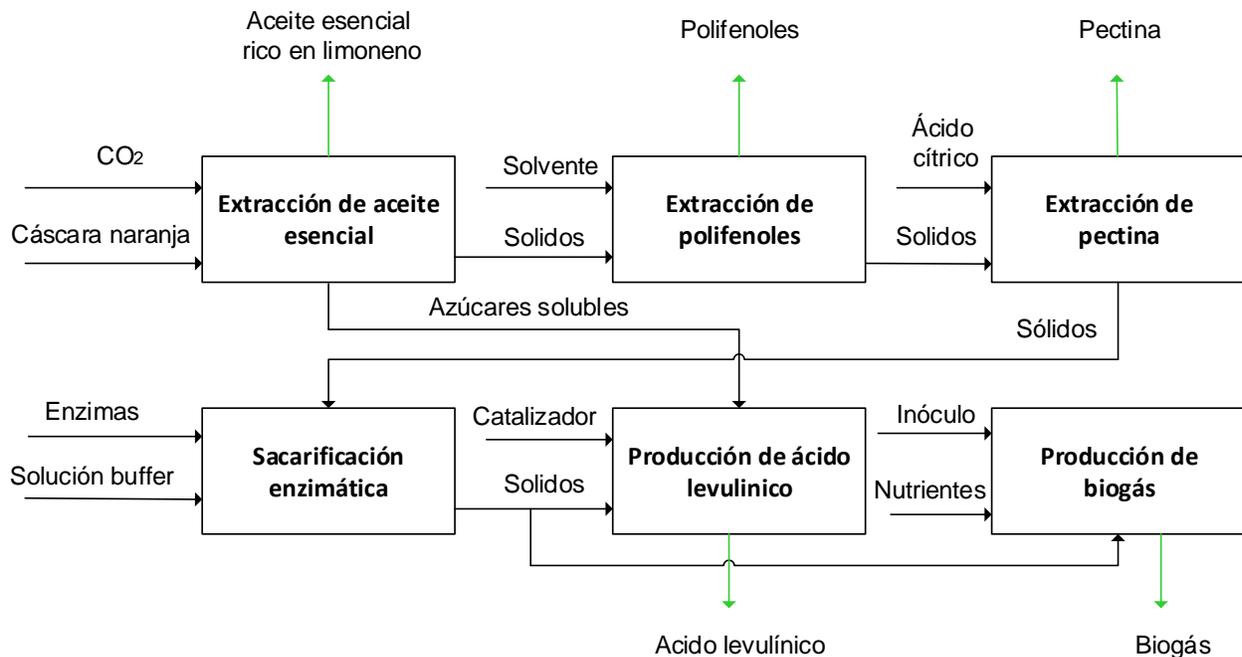


Figura 2 Biorefinería de mayor complejidad para el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja.

Biorefinería de mayor complejidad optimizada en términos económicos

Los escenarios de la biorefinería se basaron en los productos de potencial valor agregado que se pueden obtener de CN, como aceite esencial, pectina, compuestos polifenólicos, butanol, etanol, acetona (por fermentación acetona-butanol-etanol (ABE)) y ácido mucico. Los balances de materia y energía se obtuvieron utilizando el software Aspen Plus V.9.0 (Aspen Technology, Inc., Houston, EE. UU.). Los resultados experimentales obtenidos por Ortiz-Sanchez (Ortiz-Sánchez, 2019) se utilizaron como datos de entrada para la simulación del proceso. La Figura 4 presenta la superestructura planteada para tal fin. La extracción de aceite esencial es la primera etapa de la biorefinería, 7 unidades principales componen la biorefinería con diferentes configuraciones. Los balances de materiales y energía dependen de la configuración seleccionada, por lo tanto, diferentes rendimientos para cada caso se debieron considerar. En las diferentes configuraciones propuestas, todos los procesos terminan con una ruta denominada biogás, que consiste en el sistema de producción y/o cogeneración de biogás.

La etapa de optimización de las biorefinerías se basó en la viabilidad económica de los proyectos de plantas químicas, la vida útil del proyecto y factores económicos como el valor presente neto (VPN), el período de recuperación y la tasa interna de retorno, lo que lleva a varias herramientas para evaluar la viabilidad del proyecto. Para este caso, se propone formular el problema de optimización para maximizar el VPN, esta medida económica es más útil que la simple recuperación y retorno de la inversión (Sinnott and Towler, 2013), otro enfoque para este tipo de



problemas es maximizar el valor bruto del beneficio. El VPN se consideró un indicador más factible para determinar la viabilidad en la vida útil de la biorefinería. El modelo matemático para los balances de inversión, materiales y energía para una unidad de procesamiento (ver Figura 5) se presenta mediante ecuaciones.

$$Y_k^{p/w} = \frac{\dot{m}_{product/waste}}{\dot{m}_{OPW}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\alpha_k = \frac{Ut. \text{consumption } (kg \text{ h}^{-1}, m^3 \text{ h}^{-1} \text{ or } kWh)}{\dot{m}_{OPW}} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$C^{inv} = C_{Land} + \left[C^{Cap} + C^{Man} * \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \right) \right] * \left(\frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\beta_k = \frac{\dot{m}_{Reagents}}{\dot{m}_{OPW}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde $Y_k^{p/w}$ es el rendimiento de producto/desperdicio para la unidad k, m es el flujo másico ($kg \text{ h}^{-1}$), α_k es la relación entre el consumo de servicios públicos y la alimentación CN, C_k^{inv} es la inversión de capital para la biorefinería, C_{Land} es el costo de la tierra y WW es el costo de la planta de tratamiento de aguas residuales.

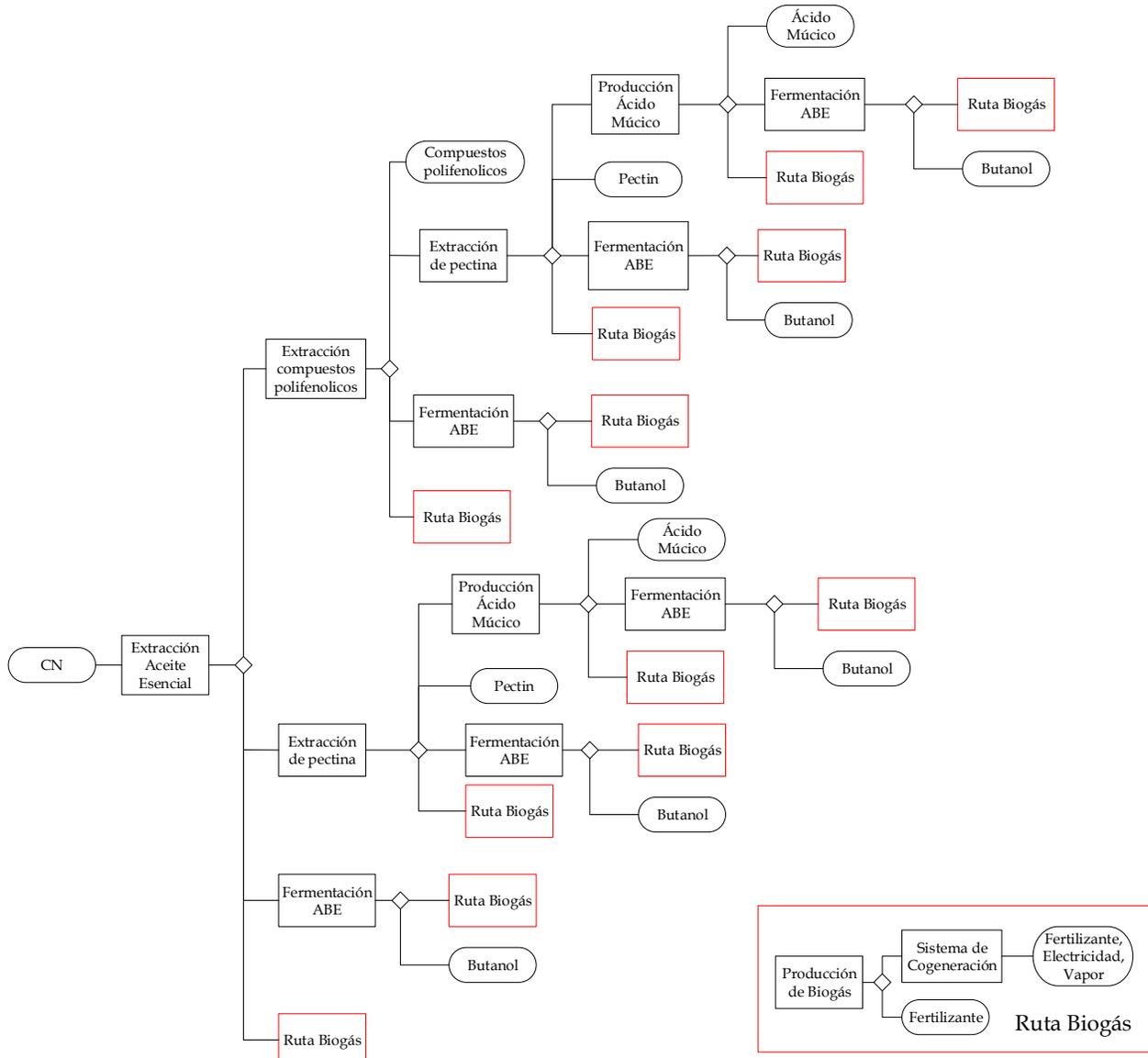


Figura 4. Superestructura de la biorefinería de mayor complejidad para CN.

Para la formulación del problema de optimización, la función objetivo se presenta en la ecuación:

$$NPV = -C^{inv} + rec_n + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1 + ir)^i} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde CF_i es el flujo de efectivo para el año i , ir es el flujo de efectivo para el año es la tasa de interés del proyecto, n es la vida útil de la planta, el denominador a menudo se refiere al factor de valor presente.



$$CF_i = \left(\sum S_i - \sum C_i - D_i \right) (1 - \varphi) \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde S_i , es el ingreso total por ventas del año i , C_i es el costo de fabricación sin depreciación, D_i es el cargo por depreciación para el año i , estimado con el método de línea recta (Sinnott and Towler, 2013), φ es la tasa de impuesto a la renta fija, rec_n es el valor de rescate al final del proyecto, generalmente es el valor de la tierra y el costo del equipo depreciado.

$$S_i = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{product\ j} \cdot P_{product,\ j} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$C_i = (C_{UT} + C_{reag} + C_{raw\ mat.} + C_{Labor} + C_{Fix.\ and\ gen.} + C_{Maint.} + C_{Plant\ Overh.}) \quad \text{Ec. (9)}$$

C_i es el costo anual sin incluir la depreciación, FX es la inversión de capital fijo, el trabajo es el costo laboral anual, C_{UT} , C_{reag} , $C_{raw\ mat.}$ son el costo de los servicios públicos, los reactivos y la materia prima, respectivamente? P es el precio del producto (USD/kg).

$$D_i = \frac{I}{n} \quad \text{Ec. (10)}$$

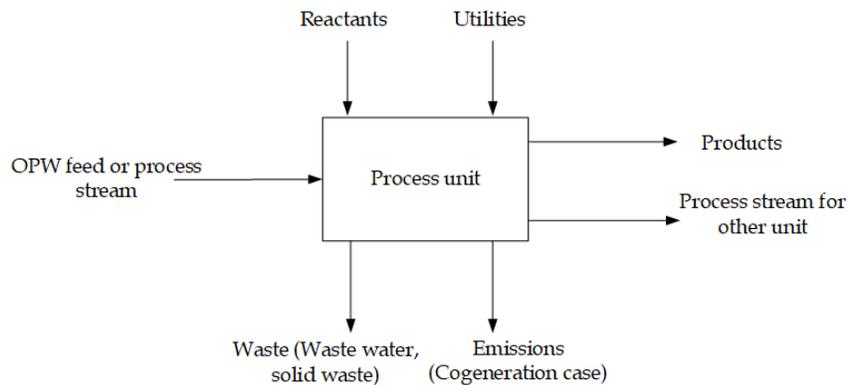
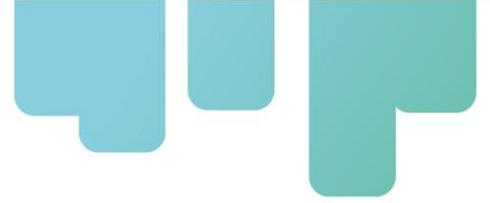


Figura 5. Esquema general de una unidad de procesamiento de la superestructura.

En el caso de unidades múltiples, se comercializan varios productos, por lo que la suma de las ventas de los productos es el ingreso total del flujo de caja confirmando la valoración económica. Esto involucra gastos operativos (OPEX) como servicios de vapor, agua de refrigeración, capital de trabajo, mantenimiento, cargas de laboratorio, etc. la forma de la función objetivo depende del flujo de efectivo en cada año de operación de la planta, este flujo de efectivo es igual a cada año de operación, el primer supuesto es que la capacidad de producción de la planta está completa ya que el primer año de operación, la depreciación es una línea recta (Towler and

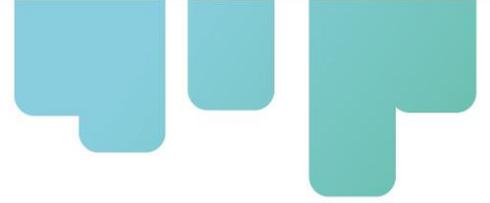


Sinnott, 2012) que se muestra en la ecuación 8, servicios públicos, materia prima y costo del producto, la mano de obra permanece constante durante la vida útil del proyecto.

Los factores económicos considerados en el modelo como el costo de la materia prima, el costo de los reactivos o insumos, el costo de la mano de obra, el costo de mantenimiento, los gastos generales de la planta y los servicios públicos (Ecuación 9), se estimaron con base en las relaciones de Sinnott y Towler (Sinnott and Towler, 2013) reportadas para las plantas químicas. , el costo de instalación del equipo fue el 47% del costo del equipo (Albrecht et al., 2017), el costo de inicio es el 10% de la inversión de capital. El enfoque económico se estableció en millones de dólares estadounidenses para un mejor manejo numérico. La vida total del proyecto fue de 20 años de vida operativa, una tasa de interés anual del 12,1% y un impuesto sobre la renta del 35%. Los costos de los reactivos se estimaron a partir de proveedores a granel. Se calcularon los costos laborales para el caso colombiano (salario mínimo) para garantizar 3 turnos por día. Los costos de los servicios públicos se calcularon con base en la literatura; los valores calculados se resumieron en la Tabla 3.

Tabla 3. Costos y precios considerados en la optimización de la biorefinería de mayor complejidad

Reactivos	Costo/Precio	Referencia
CN	0,022 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Ácido cítrico	1,14 USD/kg	("Citric Acid Anhydrous," 2020)
Agua	0,326 USD/cum	(Moncada et al., 2014c)
Nutrientes*	3,36 USD/gr	
Hidróxido de sodio	0,39 USD/kg	(Cardona-Alzate et al., 2017)
Ácido clorhídrico(99%)	0,17 USD/kg	("Inorganic Chemicals Precios Intratec.us," n.d.)
CO₂	0,026 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Etanol	0,45 USD/kg	(Carmona-Garcia et al., 2019)
Ácido sulfúrico	0,26 USD/kg	("Sulphuric Acid - Chembid," 2020)
Amonio	0,29 USD/kg	("Ammonia - Chembid ," 2020)
Metanol	0,6 USD/kg	("Methanol - chembid ," 2020)
Ácido acético	0,54 USD/kg	("Acetic Acid Glacial- Chembid ," 2020)
Servicios		
Electricidad	0,022 USD/MJ	(Boundy et al., 2010)
Agua de enfriamiento	0,042 USD/cum	(Moncada et al., 2014c)
Vapor de baja presión	7,89 USD/ton	(Peters and Timmerhaus, 1991a)
Costos laborales		
Operario	1,2 USD/hora	(García-Velásquez and Cardona, 2019)
Productos		



Aceite esencial	10 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Compuestos polifenolicos	45 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Pectina	11 USD/kg	(Ciriminna et al., 2016)
Ácido místico	52,47 USD/kg	(Indiamart, 2019)
Fertilizante	0,03 USD/kg	(International Renewable Energy Agency, 2017)
Biogás	0,26 USD/kg	(International Renewable Energy Agency, 2017)
Electricidad	9,22 USD/MJ	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Butanol	1,43 USD/kg	(Carmona-Garcia et al., 2019)
Acetona	1,45 USD/kg	(Carmona-Garcia et al., 2019)
Etanol	0,45 USD/kg	(Carmona-Garcia et al., 2019)

Finalmente, se fundamentó la configuración óptima de la biorefinería formulando un problema de programación de enteros mixtos (MIP) resuelto utilizando GAMS (General Algebraic Modeling System) como herramienta computacional, utilizando CPLEX como solucionador, esta metodología es propuesta por Aristizábal Marulanda et al. (Aristizábal-Marulanda et al., 2019).

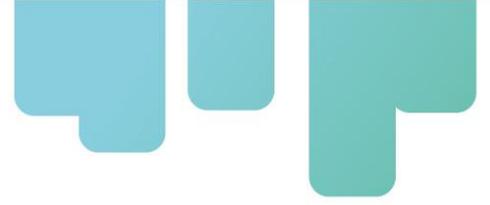
Los gastos de capital (CAPEX) de cada unidad se obtuvieron de la etapa de diseño conceptual utilizando el Aspen Process Economic Analyzer v.9.0. En las etapas de diseño conceptual, cada etapa tiene CAPEX definido como el equipo de proceso de la planta, el costo del terreno y la planta de tratamiento de aguas residuales. La formulación del problema contempla estos gastos para cada unidad, y el caso de una biorefinería compleja es la suma de todos los gastos y ventas unitarios involucrados. Para el análisis de escala, se puede determinar mediante la ecuación 1 (Sinnott y Towler 2013) para calcular el nuevo CAPEX para otra capacidad propuesta, el caso base de la biorefinería se propone un flujo de 140 kg/h de CN como una escala baja biorefinería, este análisis de escala se lleva a cabo para comparar si las escalas más grandes pueden obtener diferentes configuraciones óptimas.

$$Cost_1 = Cost_2 * \left(\frac{Capacity_1}{Capacity_2} \right)^{0.6} \quad \text{Ec. (11)}$$

Cada una de las unidades presentes en la superestructura se explican a continuación:

✓ **Extracción de aceite esencial**

Para la obtención del aceite esencial se requiere secado y molienda de CN antes de ingresar a la columna de destilación de vapor, esta unidad opera con vapor a baja presión, el aceite esencial se obtiene por centrifugación y posterior decantación. El residuo de CN se procesa en las



siguientes etapas de la biorefinería, el diagrama de flujo detallado se describe en (M. Ortiz-Sanchez et al., 2020).

✓ **Extracción de compuestos polifenólicos**

Este proceso se realiza mediante extracción supercrítica, en esta unidad el CO₂ pasa por un compresor y un intercambiador de calor para alcanzar las condiciones supercríticas. CN de la extracción del aceite esencial, ingresa etanol y CO₂ al extractor, luego se obtienen los compuestos polifenólicos por destilación, se recupera el etanol y se recicla parte del CO₂, el proceso detallado se describe en (Cerón Salazar, 2013).

✓ **Extracción de pectina**

CN ingresa en dos CSTR en serie mezclado con ácido cítrico cuando el CN sale del segundo reactor, se filtra y se mezcla con etanol para obtener un gel, ingresa a una centrífuga y se seca la pectina en un horno convectivo y se muele, finalmente se recupera el etanol por destilación del agua para ser reciclada en el proceso, el proceso se describe en (M. Ortiz-Sanchez et al., 2020).

✓ **Producción de ácido mucico**

La producción de ácido mucico en forma de pectina se inicia a partir del líquido obtenido en la extracción de pectina, rico en ácido galacturónico, hidróxido de sodio y sal de amonio se debe alimentar al reactor de hidrólisis para mantener condiciones óptimas de pH, el producto que sale del fermentador se acidifica para cristalizar ácido mucico, filtrado, secado y molido. Las condiciones detalladas del proceso se describen en (Mariana Ortiz-Sanchez et al., 2020).

✓ **Producción de butanol, etanol y acetona**

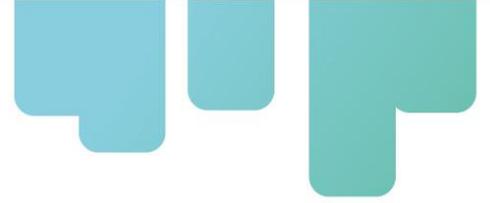
Este proceso consiste en una sacarificación enzimática y una posterior fermentación ABE, la purificación de los productos y reactivos que salen del fermentador se filtra, luego se pasa por cuatro columnas de destilación, un decantador y tamices moleculares para obtener butanol, los demás productos se recuperan en la destilación. columnas. El diagrama de flujo del proceso detallado y las condiciones se describen en (Carmona-García et al., 2019).

✓ **Producción de biogás**

El biogás se produce en un digestor y luego se seca para aumentar el poder calorífico del biogás, otro producto obtenido de este proceso es el digestato utilizado como fertilizante de cultivos, la simulación detallada se describe en (M. Ortiz-Sanchez et al., 2020).

✓ **Sistema de cogeneración**

El biogás producido se utiliza como combustible para el sistema de cogeneración, el proceso detallado se describe en (Solarte-Toro et al., 2018a). La unidad de procesamiento consta de una cámara de combustión donde se quema el biogás, los gases de escape producen energía que pasa a través de la turbina y suministra energía al compresor.



Biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá (CM)

Biorefinería de menor complejidad

La Figura 6 muestra el diagrama de bloques de la biorefinería para los residuos de CM de menor complejidad. El proceso consiste en la extracción de pectina y producción de biogás y fertilizante a partir del sólido remanente de la extracción. La extracción de pectina se planteó de la misma forma que para las biorefinerías de CN. La hidrólisis se llevó a cabo con ácido cítrico. La precipitación de la pectina extraída se realizó con etanol al 98%.

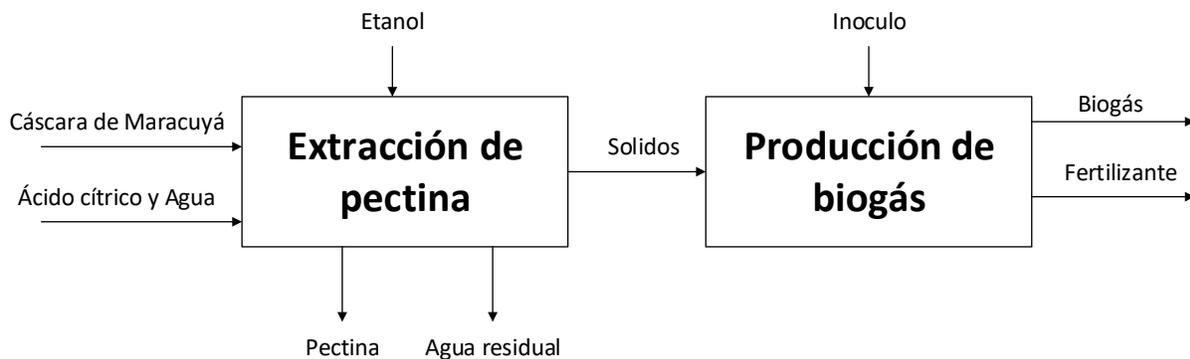


Figura 6. Biorefinería de menor complejidad para el aprovechamiento de residuos de CM

Biorefinería de mayor complejidad

La Figura 7 muestra el diagrama de bloques entrada – salida de la biorefinería propuesta para el fruto de maracuyá. La primera diferencia que resalta a simple vista es que la biorefinería para el caso maracuyá parte desde el fruto y no de la cáscara. No obstante, esta diferencia se debe a que durante el procesamiento del fruto de maracuyá se producen dos residuos lignocelulósicos con gran potencial tales como la cáscara y la semilla. Esta situación no se observa durante el procesamiento de la naranja, por tanto, no fue considerado en la biorefinería de la **Error! Reference source not found.** En el caso del aprovechamiento de la cáscara y las semillas provenientes del maracuyá se tiene los mismos bloques presentados para el caso de la naranja, es decir, extracción de aceite esencial, pectina, producción de ácido levulínico y biogás.

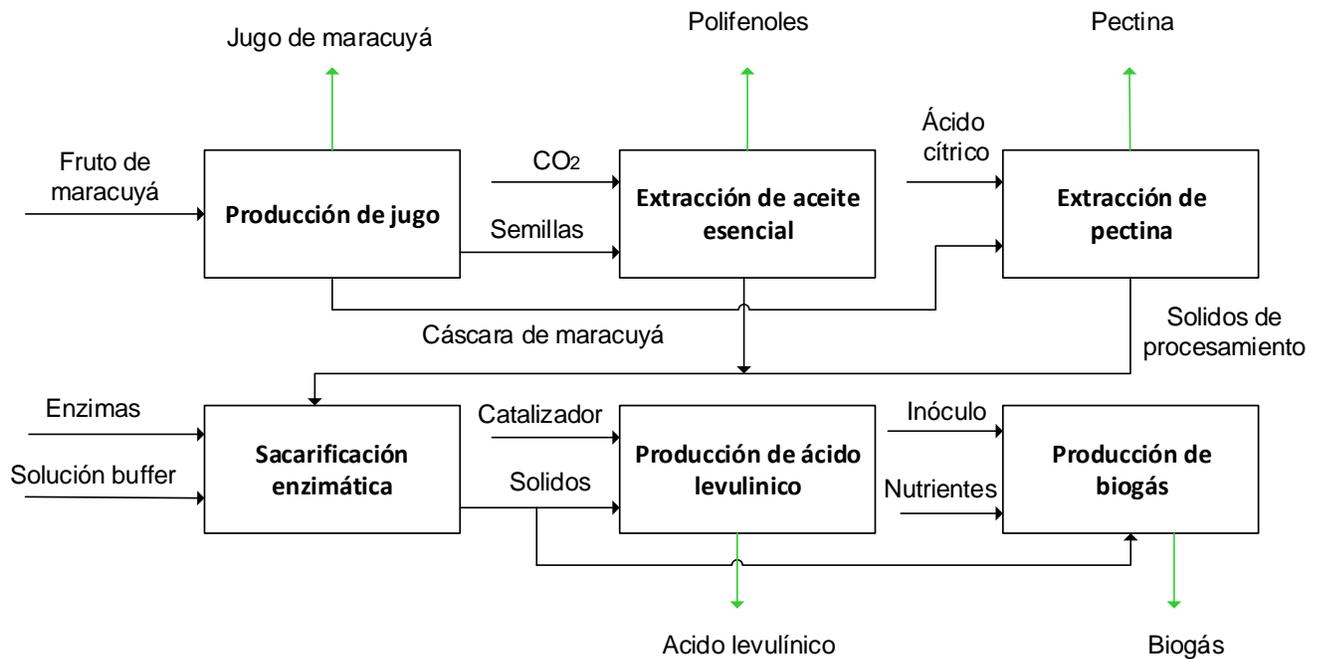


Figura 7. Biorefinería planteada para el aprovechamiento integral del fruto de maracuyá.

Biorefinería para el aprovechamiento de aguacate de rechazo (AR)

La biorefinería para el aprovechamiento de AR se planteó considerando la pulpa, la semilla y la cáscara. La pulpa de aguacate se consideró para la extracción de aceite de aguacate. La extracción de aceite se llevó a cabo a partir de un malaxer el cual separa la fracción lipídica de la pulpa. La purificación del aceite se realiza por centrifugación. La pulpa resultante se utiliza para la producción de alimento animal por medio del secado y pulverización. La semilla y cáscara de aguacate son utilizadas para la producción de biogás a partir de digestión anaerobia. El biogás producido es alimentado a un sistema de cogeneración para la producción de electricidad. La Figura 8 presenta el diagrama de bloques de la biorefinería de AR.

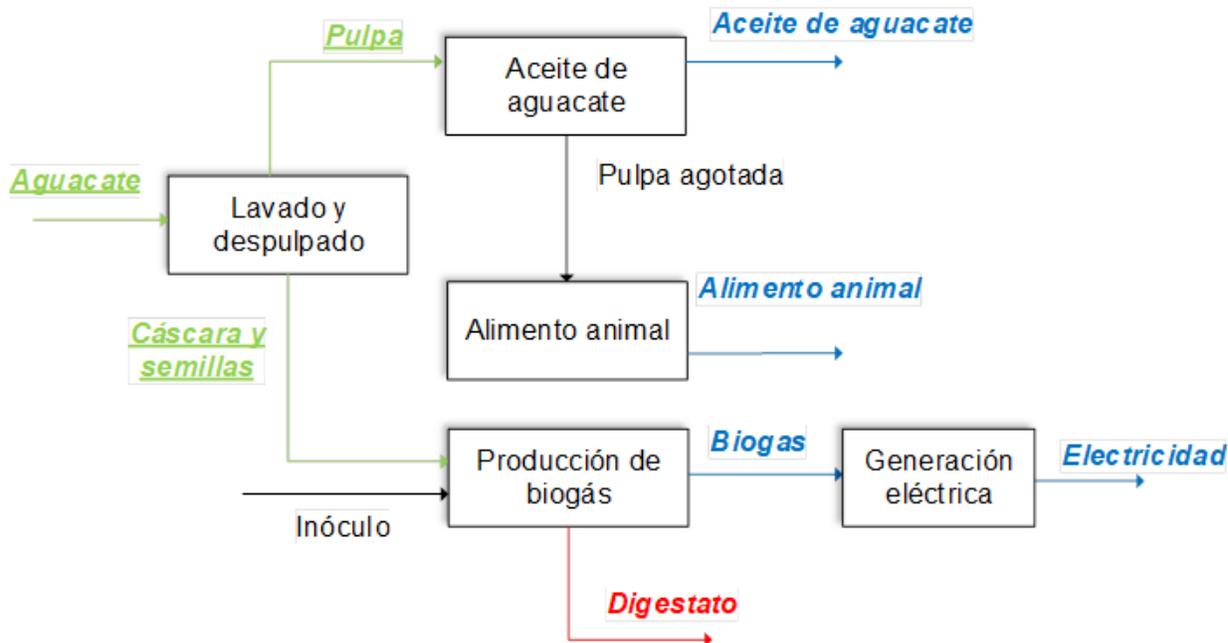


Figura 8. Biorefinería de menor complejidad para el aprovechamiento de AR.

Análisis de las biorefinerías

Las biorefinerías planteadas anteriormente fueron simuladas empleando el software de simulación Aspen Plus v9.0 con el fin de obtener los balances de materia y energía de todos los procesos que se ven envueltos en la transformación de los residuos en productos de valor agregado. Una vez realizadas las simulaciones, se procede a analizar desde un punto de vista técnico, energético, económico y ambiental las biorefinerías. La Figura 9 resume la metodología de evaluación.

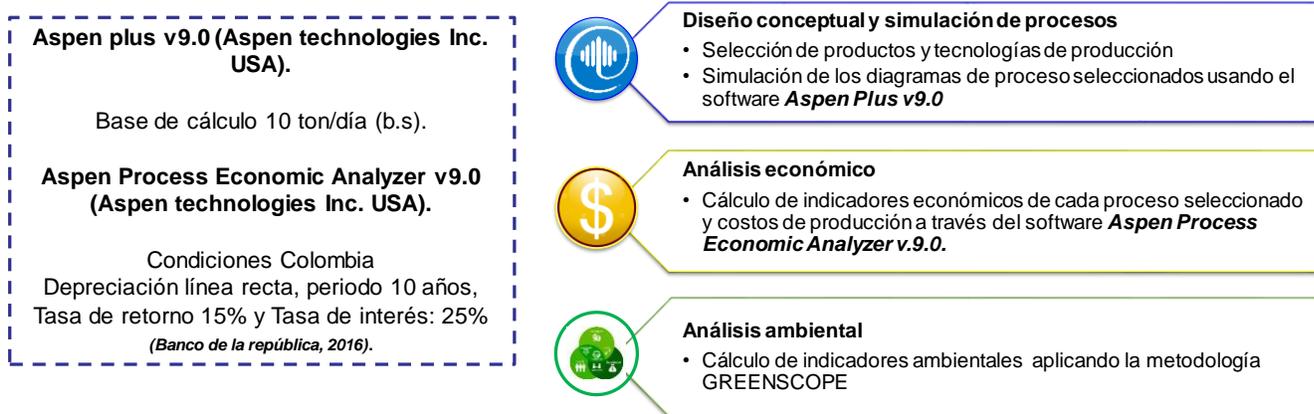
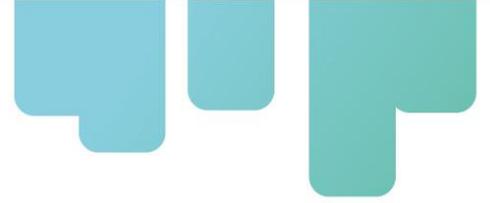


Figura 9 Metodología de evaluación de las biorefinerías a base de residuos de naranja.

*Para la biorefinería de menor complejidad el flujo de CN es el de la empresa FLP Procesados S.A. (140 kg/h)



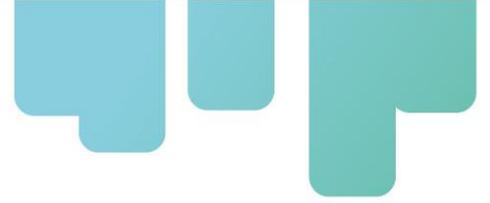
Las herramientas que se emplearon para la evaluación económica son el Aspen Process Economic Analyzer v9.0 y las correlaciones estipuladas por Peters and Timmerhaus (Peters and Timmerhaus, 1991b). En cuanto a la parte de análisis energético, se emplearán las correlaciones publicadas por García et al., (García et al., 2017b) con el fin de comparar ambas biorefinerías en términos de eficiencia energética. Finalmente, el análisis ambiental fue realizado empleando la metodología GREENSCOPE expuesta por Ruiz-Mercado et al. (G. J. Ruiz-Mercado et al., 2012) a través de la evaluación de indicadores ambientales que consideran entradas y salidas de cada unidad de proceso. Para la biorefinería de menor complejidad, se determina la huella de carbono utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida. La herramienta utilizada en SimaPro V.8.3.

Evaluación económica

La evaluación económica se realizó utilizando el software comercial Aspen Process Economic Analyzer v9.0 (Aspen Technology Inc., EE. UU.). La evaluación económica se realiza para la biorefinería de mayor complejidad económica, para calcular los costos asociados con la producción de los productos objetivo. Los balances de masa y energía de las simulaciones se usaron en el dimensionamiento de los equipos de proceso. Como datos de entrada para realizar la evaluación económica, se consideró un período de 10 años con una tasa de interés anual del 17%. Además, también se tuvo en cuenta el método de línea recta para el cálculo de la depreciación del capital y una tasa del 25%. Los costos laborales del operador y del supervisor fueron de 2.14 USD/h y 4.29 USD/h, respectivamente, considerando el contexto colombiano. El software mencionado estima la inversión de capital total y los costos operativos asociados a las materias primas, servicios públicos y mantenimiento. Finalmente, se tuvo en cuenta un periodo de 8000 h para realizar los cálculos. Los principales datos utilizados en la evaluación económica de las dos biorefinerías propuestas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Valores económicos empleados en la evaluación económica de las biorefinerías propuestas.

	Precio	Referencia
Materia prima		
Cáscara de naranja	0,01 USD/kg	Valor supuesto
Residuos maracuyá	0,001 USD/kg	Valor supuesto
Reactivos.		
Ácido cítrico	17,8 USD/kg	(PanReac. AppliChem, 2017)
Enzimas	0,64 USD/kg	
Dióxido de carbono	1,55 USD/kg	(Cerón Salazar, 2013)
Servicios		
Electricidad	0,10 USD/kWh	(Dávila et al., 2014)
Combustible	7,21 USD/MMBTU	
Agua de enfriamiento	1,25 USD/m ³	



Vapor de baja presión	1,57 USD/tonne	(Moncada et al., 2015b)
Vapor de media presión	8,18 USD/tonne	
Vapor de alta presión	9,86 USD/tonne	
Costos de mano de obra		
Supervisor	4,29 USD/h	(Dávila et al., 2014)
Operador	2,14 USD/h	
Costos de productos en el mercado		
Compuestos polifenólicos	10 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Pectina	11 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Ácido levulinico	1,24 USD/kg	(Moncada et al., 2015b)
Biogás	0,56 USD/kg	(International Renewable Energy Agency, 2017)
Aceite esencial naranja	3,45 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)
Aceite esencial maracuyá	2,25 USD/kg	(Ortiz-Sánchez, 2019)

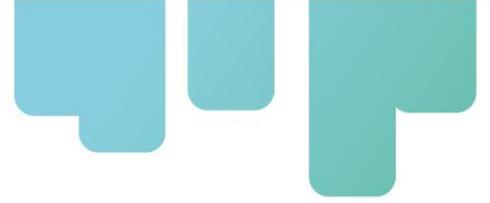
Finalmente, el valor presente neto (VPN), el índice de rentabilidad, el período de pago y la tasa interna de rendimiento (TIR) se utilizaron como métricas para evaluar la viabilidad económica de las biorefinerías simuladas. Todas estas métricas económicas están relacionadas con los flujos de caja que dan una idea del riesgo de implementar cada proceso.

Evaluación ambiental

De la misma manera que el análisis económico, algunos estudios relacionados con la evaluación ambiental del proceso de gasificación de biomasa se han informado en la literatura abierta. De hecho, Chidikofan et al., (Chidikofan et al., 2017) llevaron a cabo un análisis de impacto toxicológico y ambiental de una planta de gasificación que solo analizaba el alquitrán producido y Dong et al., Realizaron una Evaluación del ciclo de vida (LCA) para comparar la pirólisis, la incineración y la gasificación como Tecnologías de residuos en energía (WTE) (Kumar and Samadder, 2017).

Sin embargo, el análisis ambiental del proceso de gasificación de biomasa se puede complementar calculando diferentes indicadores relacionados con las emisiones sólidas, líquidas y gaseosas. Por lo tanto, se calcularon los indicadores propuestos por Ruiz-Mercado et al., (Gerardo J Ruiz-Mercado et al., 2012) en la denominada metodología GREENSCOPE:

- Número de entrada de materiales peligrosos.
- Entrada de materias primas peligrosas específicas.
- Masa total de productos químicos persistentes, bioacumulables y tóxicos utilizados.
- Potencial de calentamiento global.
- Residuos líquidos específicos.
- Residuos sólidos específicos.



- Potencial de demanda de oxígeno acuático.

Los indicadores anteriores se calcularon siguiendo las definiciones y descripciones informadas por Ruiz-Mercado et al., (2012 - I) (G. J. Ruiz-Mercado et al., 2012), los factores de potencia enumerados por el informe IChemE (IChemE, 2002), la lista de materiales peligrosos y la lista PBT publicado por la EPA (Transportation, 2017; U.S Environmental Protection Agency, 2017). Además, estos indicadores se normalizaron utilizando una puntuación porcentual definida por Ruiz-Mercado et al., (2012 - II) (Gerardo J Ruiz-Mercado et al., 2012), que transforma cualquier resultado de indicador en una forma adimensional, utilizando como caso base los peores y mejores escenarios. Estas puntuaciones porcentuales se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\text{Percent score} = \frac{(\text{Actual} - \text{Worst})}{(\text{Best} - \text{Worst})} * 100 \quad \text{Ec. (12)}$$

La ecuación anterior permite comparar los indicadores ambientales anteriores. El mejor caso se puede definir como un caso ideal donde no todas las entradas son peligrosas y las corrientes de salida se consideran productos o componentes no contaminantes. Además, el peor de los casos se define como el caso ideal donde todas las entradas y salidas del proceso pueden considerarse peligrosas desde un punto de vista de la salud y el medio ambiente. Por lo tanto, la puntuación porcentual para cada indicador varía de 0% a 100%.

Para la biorefinería de menor complejidad se calculó la huella de carbono. El cálculo de la huella de carbono se lleva a cabo haciendo uso de la metodología de evaluación de ciclo de vida. La evaluación del ciclo de vida (LCA) es una herramienta que proporciona el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Este análisis cubre la obtención de materia prima hasta el final de su vida útil. Esta metodología tiene como objetivo identificar los principales puntos críticos ambientales de los procesos evaluados (García et al., 2017a), (Cherubini and Jungmeier, 2010). El software SimaPro v8.3 (PRE Sustainability, Países Bajos) y la base de datos Ecoinvent se utilizaron para medir el impacto ambiental del enfoque de la cuna a la puerta que incluye la producción de naranja (germinación, vivero, preparación del sitio, crecimiento de la planta y etapas de producción, corte y transporte), así como la biorefinería. La evaluación de impacto de los procesos se realizó utilizando el método de caracterización de ReCiPe Midpoint (H - versión jerárquica) v1.13. Cambio climático (CC), acidificación terrestre (TA), toxicidad humana (HT), formación de oxidantes fotoquímicos (POF), formación de partículas (PMF), ecotoxicidad del agua dulce (FE), ocupación de tierras agrícolas (ALO), agotamiento del agua (WD) y el agotamiento de fósiles (FD) fueron algunas categorías involucradas. Este análisis se realizó de la cuna a la puerta que incluye las siguientes etapas:

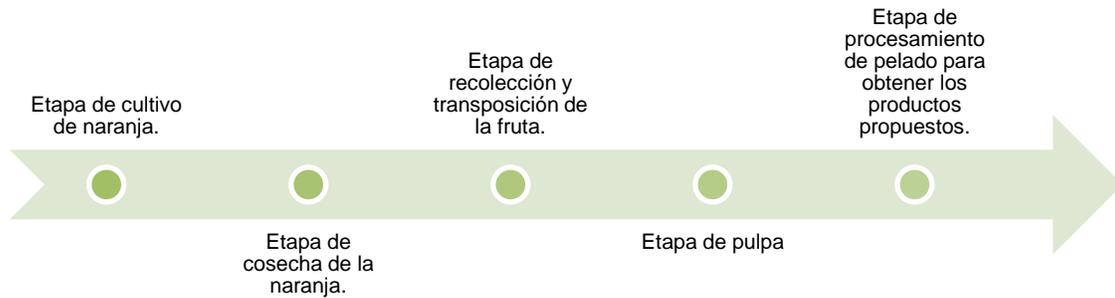
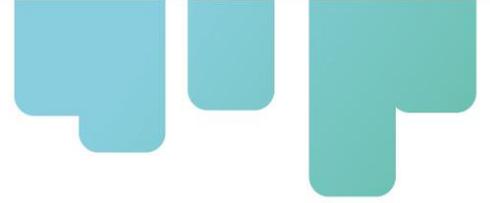


Figura 10. Metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA) paso a paso.

Como unidad funcional, se asignó 1 kg del producto. Se seleccionó el método MidPoint ReCiPe, que tiene la ventaja de evaluar el impacto ambiental en 18 categorías, que son (García et al., 2017a):

- ✓ Calentamiento global
- ✓ Ecotoxicidad de agua dulce
- ✓ Agotamiento del agua
- ✓ Transformación de la tierra

Los balances de masa y energía del procedimiento de simulación en el software Aspen Plus V.9 se usaron como datos de entrada y salida para cada etapa de la biorefinería.



Resultados

Composición química de los residuos de cáscara de naranja

CN se caracterizó en términos de los extractos (en agua y etanol), celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina, proteína, grasa y contenido de cenizas para evaluar su potencial como materia prima para ser utilizado en diferentes procesos como extracción, digestión anaerobia, etc. Para esto, se realiza la comparación de los resultados obtenidos para CN con los datos reportados por otros autores para esta materia prima. Sin embargo, esta comparación se realiza teniendo en cuenta que las diferencias entre los datos informados y los resultados experimentales pueden aparecer debido al posible cambio de propiedades de esta materia prima en diferentes cultivos. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos:

Tabla 5. Composición química de la CN

Propiedad	Contenido (%w/w, base seca)		
	CN*	Marín et al., (Marín et al., 2007)	Rivas et al., (Rivas et al., 2008a)
Extractivos en agua	24,20 ± 2,41	14,07	16,9
Extractivos en etanol	2,36 ± 2,14		
Fibra	43,14	56,08	20,55
Celulosa	23,88 ± 0,50	37,52	9,21
Hemicelulosa	14,15 ± 2,01	11,04	10,5
Lignina	5,10 ± 2,44	7,52	0,84
Pectina	18,63 ± 0,16	23,02	42,5
Proteína	4,96 ± 0,20	9,06	6,50
Grasa	4,60 ± 1,91	4	1,95
Cenizas	2,10 ± 0,20	2,56	3,50
Humedad	77,38 ± 0,36**	7	7

* Datos obtenidos en este trabajo.

** Humedad de la cáscara obtenida de la empresa colombiana.

Rendimiento de obtención de productos de interés

Aceite esencial

El aceite esencial por destilación al vapor con CN seco obtuvo un rendimiento del 1,14% w/w. Por otro lado, el rendimiento obtenido con CN húmedo fue del 0,61% w/w. A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que, al disminuir la humedad de la muestra y el diámetro de las



partículas, se pueden obtener mayores rendimientos de extracción. La Tabla 6 muestra la composición (cantidad relativa) del aceite esencial extraditado con CN seco identificado en el GC-MS.

Tabla 6. Composición aceite esencial.

Componente	Cantidad relativa (%)
Monoterpenos (95,627%)	
D-limoneno	88,388
β -mirceno	2,278
γ -terpinoleno	4,955
Monoterpenos oxigenados (3,512%)	
Linalol	3,512
Otros compuestos oxigenados (0,95%)	
Decanol	0,868

Potencial bioquímico de metano

Los resultados de la prueba BMP de estas muestras se presentan en la Figura 11:

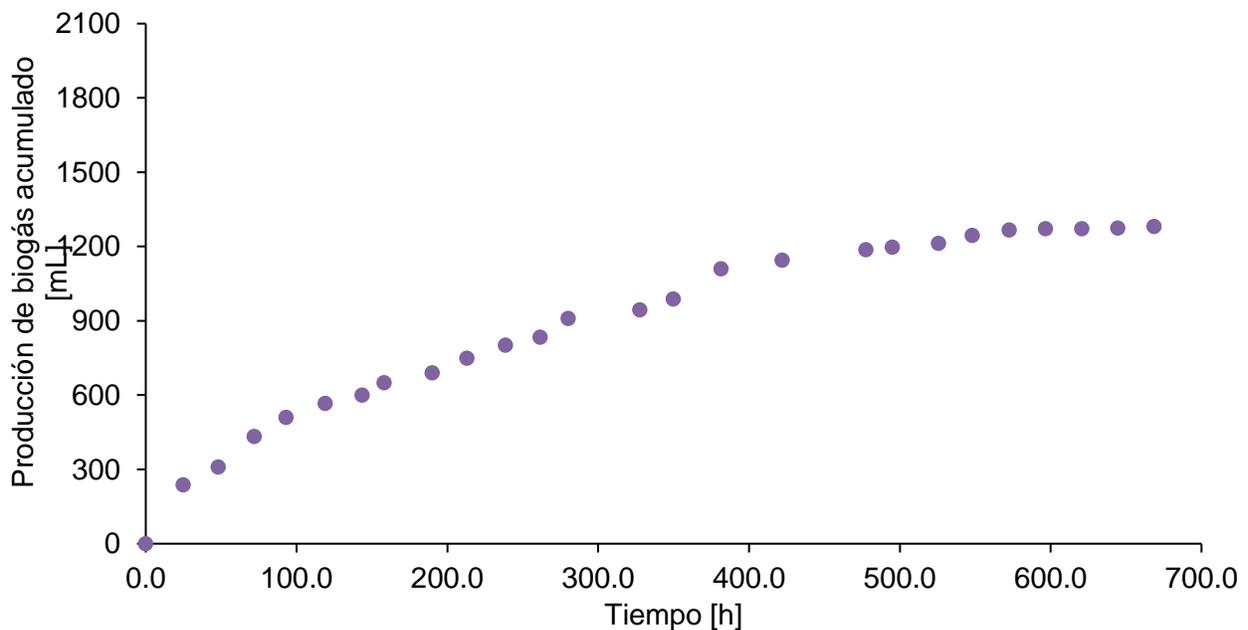
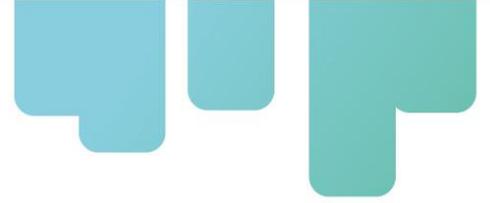


Figura 11. Producción acumulada de biogás a partir de muestras CN.

La Tabla 7 muestra algunos parámetros calculados a partir de las pruebas BMP.

Tabla 7. Datos calculados a partir de las muestras CN de digestión anaerobia.

Test	Rendimiento de	Productividad	Contenido de
------	----------------	---------------	--------------



	biogás (Nm³/kg*)	(L/kg*/day)	matano (%vol)
CN sin aceite esencial,	0,427	15,81	48,12

*kg vs RM

Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja CN

Biorefinería de menor complejidad

Los resultados para cada unidad de proceso para la biorefinería se presentan en la Tabla 8. Esta tabla también muestra la materia prima y los servicios requeridos y el flujo de los productos obtenidos.

Tabla 8. La materia prima y las servicios requeridas y el flujo de los productos obtenidos.

Unidad	Reactivos (kg/h)	Productos (kg/h)	Servicios (kg or kW/kg CN)
UNIDAD 1	Agua: 29	Aceite esencial: 1,6	LPSteam: 3,23 Agua de enfriamiento: 336,34 Electricidad: 0,47
UNIDAD 6	Inóculo: 1102,75 Aire: 38 Agua: 49,90	LPSteam: 49,90 Electricidad: 12,6 Digestato: 1045,87	

La Tabla 9 resume los indicadores masicos y energéticos para la biorefinería de menor complejidad de CN:

Tabla 9. Indicadores de masa y energía para la biorefinería de menor complejidad de CN.

Indicador	Valor	Unidad
Rendimiento de aceite esencial	11,40	kg/tonne CN
Rendimiento de biogás	115,71	kg/tonne CN
Rendimiento total	126,19	kg/tonne CN
Productividad total	5,26	kg/tonne - day
Eficiencia energética general	1,01	%
Índice de autogeneración	1,40	%
Consumo de energía específico	3,69	MJ/kg

Biorefinería de mayor complejidad

Los resultados de flujos másicos y rendimiento para la biorefinería de mayor complejidad se muestran en la Tabla 10:

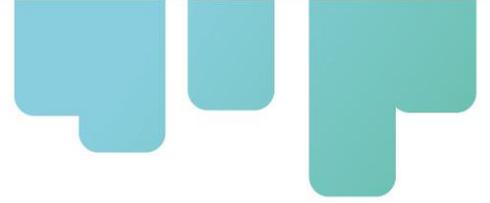


Tabla 10. Flujos másicos y rendimientos obtenidos del proceso de simulación.

Productos	Flujo másico (kg/h)	Rendimiento (kg/kg MP)
Aceite esencial	287,34	0,0287
Polifenoles	236,56	0,0236
Pectina	1045,65	0,1045
Biogás	2066,21	0,2066
Ácido levulínico	740,86	0,0740

El análisis energético de la biorefinería fue realizado en términos del consumo de los servicios necesarios para el proceso de transformación de las cáscaras de naranja en los productos planteados. La tabla 11 presenta los resultados de los consumos de vapor de alta, media y baja, así como de agua de enfriamiento y electricidad que requiere la biorefinería.

Tabla 11. Consumo de servicios de la biorefinería planteada para la cáscara de naranja.

Utilidad	Flujo	Unidades	Flujo entálpico	Unidades
Electricidad	703,53	kW	N,A,	N,A,
Vapor de baja	2,64	t/h	2803,1	MJ/t
Vapor de alta	2,36	t/h	2774,1	MJ/t
Vapor de media	6,00	t/h	2713,1	MJ/t
Agua de enfriamiento	428,25	m ³ /h	20,9	MJ/m ³

Biorefinería de mayor complejidad optimizada

Los resultados de la optimización económica demostraron que la ruta con mayor prefactibilidad económica es la mostrada en la Figura 12.

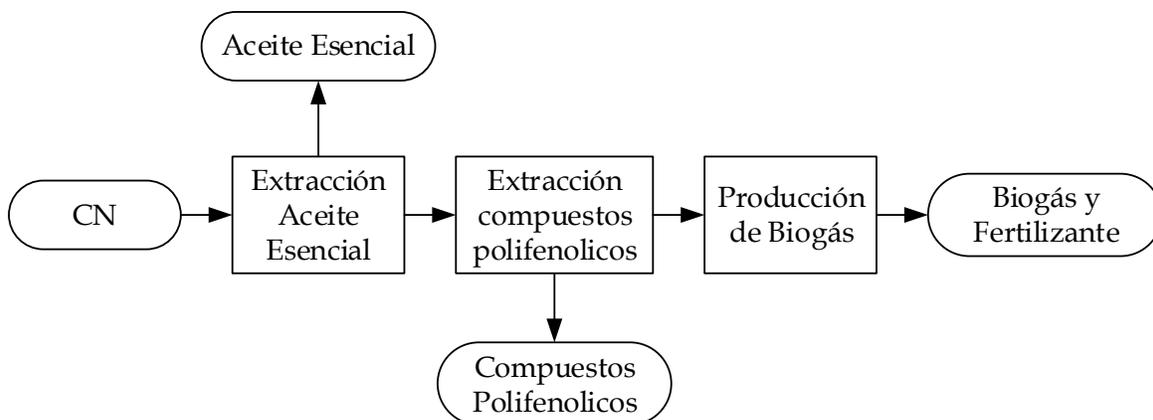
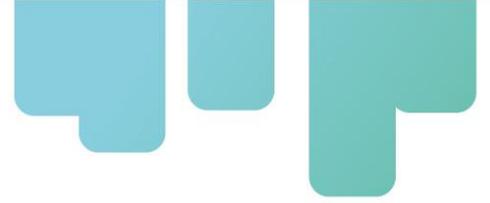


Figura 12. Configuración óptima en términos económicos de la biorefinería de CN.



Los resultados de la configuración óptima en términos económicos son mostrados en la Tabla 12:

Tabla 12. Resultados económicos para la biorefinería de CN de mayor complejidad optimizada.

Item	Valor (millones USD por año)
NPV (20 años)	-5,804
Venta de productos	2,569
Servicios	0,883
Costos de mantenimiento	0,445
Costos fijos y generales	0,193
Costos laborales	0,513
Costos de la planta	0,664
Costos de depreciación	0,322
Costos de reactivos e insumos	0,300
Costos de inversión	6,448
Flujo de caja anual	-0,752

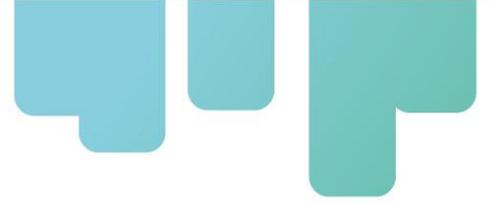
Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá CM

Biorefinería de menor complejidad

Los balances de materia en términos de entrada y salida para la biorefinería de menor complejidad para el aprovechamiento de CM son mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13. Balances de entrada y salida de la biorefinería de menor complejidad de CM.

Línea de producción de pectina					
Entra	Valor	Unidad	Sale	Valor	Unidad
Cáscara de maracuyá	1000	kg/h	Pectina	150	kg/h
Agua	25000	kg/h	Cáscara agotada	1360	kg/h
Ácido cítrico	20	kg/h	Agua residual	24560	kg/h
Etanol	50	kg/h			
TOTAL	26070	kg/h	TOTAL	26070	kg/h
Línea de producción de biogás					
Entra	Valor	Unidad	Sale	Valor	Unidad
Cáscara agotada	1360	kg/h	Biogás	507	kg/h
Inóculo	13600	kg/h	Ácido sulfhídrico	5,07	kg/h
			Digestato	9391,15	kg/h
			Vapor de agua	5056,78	kg/h



TOTAL	14960	kg/h	TOTAL	14960	kg/h
--------------	-------	------	--------------	-------	------

Los rendimientos y consumos energéticos de cada una de las unidades de proceso presentes en la biorefinería de menor complejidad son presentados en la Tabla 14:

Tabla 14. Rendimientos y consumo energético de la biorefinería de menor complejidad de CM

Etapa de procesamiento	Rendimiento de producto		Intensidad másica del proceso		Consumo de energía	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Pectina	150,0	kg/ton cáscara	3,95	kg de materias primas/kg de productos aislados	1278000	kWh/año (consumo)
Biogás	376,5	kg/ton de cáscara agotada			9067790,9	kWh/año (consumo)

Los indicadores energéticos y de consumo son mostrados en la Tabla 15:

Tabla 15. Indicadores energéticos de la biorefinería de menor complejidad de CM.

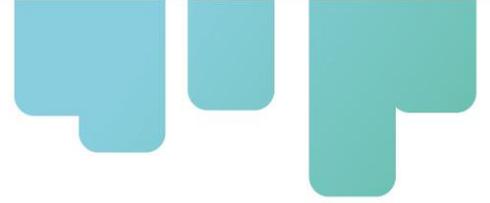
TOTAL	10345790,92	kWh/año (consumo)
Energía generada del biogás	5948800	kWh/año (surplus)
Índice de autogeneración eléctrica	57,5	%
Consumo específico de energía	1214,3	kW/ton cáscara de maracuyá
Energía térmica aprovechable	847,7	kWth/ton de aguacate
Eficiencia energética del motor	85,2	%

Biorefinería de mayor complejidad

Los resultados de la simulación se resumen a través de los flujos másicos que se han obtenido de cada uno de los productos envueltos en la simulación. La Tabla 16 muestra dichos flujos másicos y los porcentajes de rendimientos obtenidos a nivel de simulación. Una anotación que vale la pena tener en consideración es que el flujo másico que se consideró para realizar cada una de las simulaciones fue de 10 ton/h.

Tabla 16. Flujos másicos y rendimientos obtenidos del proceso de simulación.

Productos	Flujo másico (kg/h)	Rendimiento (kg/kg MP)
Jugo de maracuyá	2580,32	0,258
Aceite esencial	289	0,111
Pectina	759,5	0,081
Biogás	1845,69	0,184
Ácido levulínico	500,51	0,050



El análisis energético de la biorefinería fue realizado en términos del consumo de los servicios necesarios para el proceso de transformación de las cáscaras de maracuyá en los productos planteados. La Tabla 17 presenta los resultados de los consumos de vapor de alta, media y baja, así como de agua de enfriamiento y electricidad que requiere la biorefinería.

Tabla 17. Consumo de servicios de la biorefinería planteada para la cáscara de maracuyá.

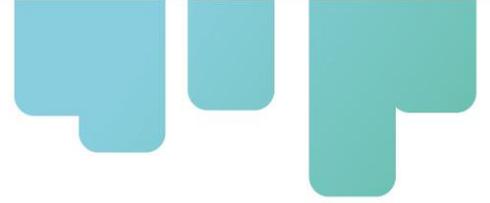
Servicio	Flujo	Unidades	Flujo entálpico	Unidades
Electricidad	735,34	kW	N,A,	N,A,
Vapor de baja	5,87	t/h	11172,1	MJ/t
Vapor de alta	3,98	t/h	6553,5	MJ/t
Vapor de media	2,36	t/h	15935,6	MJ/t
Agua de enfriamiento	433,90	m ³ /h	20,9	MJ/m ³

Resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacate de rechazo AR

La Tabla 18 presenta los balances de materia en términos de entrada y salida de cada una de las unidades involucradas en la biorefinería para el aprovechamiento de AR:

Tabla 18. Balances de entrada y salida de la biorefinería de menor complejidad de AR

Línea de producción de aceite de aguacate					
Entra	Valor	Unidad	Sale	Valor	Unidad
Aguacate	1000	kg/h	Aceite de aguacate	80	kg/h
			Semilla de aguacate	128	kg/h
			Cáscara de aguacate	150	kg/h
			Pulpa agotada	159	kg/h
			Agua residual	483	kg/h
TOTAL	1000	kg/h	TOTAL	1000	kg/h
Línea de producción de alimento animal					
Entra	Valor	Unidad	Sale	Valor	Unidad
Pulpa agotada	159	kg/h	Alimento animal	103,35	kg/h
			Vapor de agua	55,65	kg/h
TOTAL	159	kg/h	TOTAL	159	kg/h
Línea de producción de biogás					



Entra	Valor	Unidad	Sale	Valor	Unidad
Semilla de aguacate	128	kg/h	Biogás	37,09	kg/h
Cáscara de aguacate	150	kg/h	Ácido sulfhídrico	0,037	kg/h
Inóculo	10000	kg/h	Digestato	6656,59	kg/h
			Vapor de agua	3584,283	kg/h
TOTAL	10278	kg/h	TOTAL	10278	kg/h

Los rendimientos de productos obtenidos en cada una de las etapas involucradas en la biorefinería de AR y el consumo energético son presentados en la Tabla 19:

Tabla 19. Rendimientos y consumo energético de la biorefinería de menor complejidad de AR

Etapas de procesamiento	Rendimiento de producto		Intensidad másica del proceso		Consumo de energía	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Aceite de aguacate	110,2	kg/ton de pulpa	49,90	kg de materias primas/kg de productos aislados	172246	kWh/año (consumo)
Alimento animal	650,0	kg/ton de pulpa agotada			166140	kWh/año (consumo)
Biogás	133,4	kg/ton de cáscara y semilla			218400	kWh/año (consumo)

Los indicadores energéticos y de consumo son mostrados en la Tabla 20:

Tabla 20. Indicadores energéticos de la biorefinería de menor complejidad de AR.

TOTAL	556786	kWh/año (consumo)
Energía generada del biogás	145063	kWh/año (surplus)
Índice de autogeneración eléctrica	26,1	%
Consumo específico de energía	119,2	kWh/ton aguacate
Energía térmica aprovechable	0,0	kWh/ton de aguacate
Eficiencia energética del motor	85,2	%

Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja CN



Biorefinería de menor complejidad

La Figura 13 presenta en análisis económico de la biorefinería de baja complejidad para el aprovechamiento de CN. El análisis económico se realizó variando la escala de procesamiento con el fin de encontrar la escala mínima de procesamiento para que la biorefinería sea viable económicamente (cuando el VPN es 0) y las escalas y tiempos de retorno de la inversión para flujos mayores:

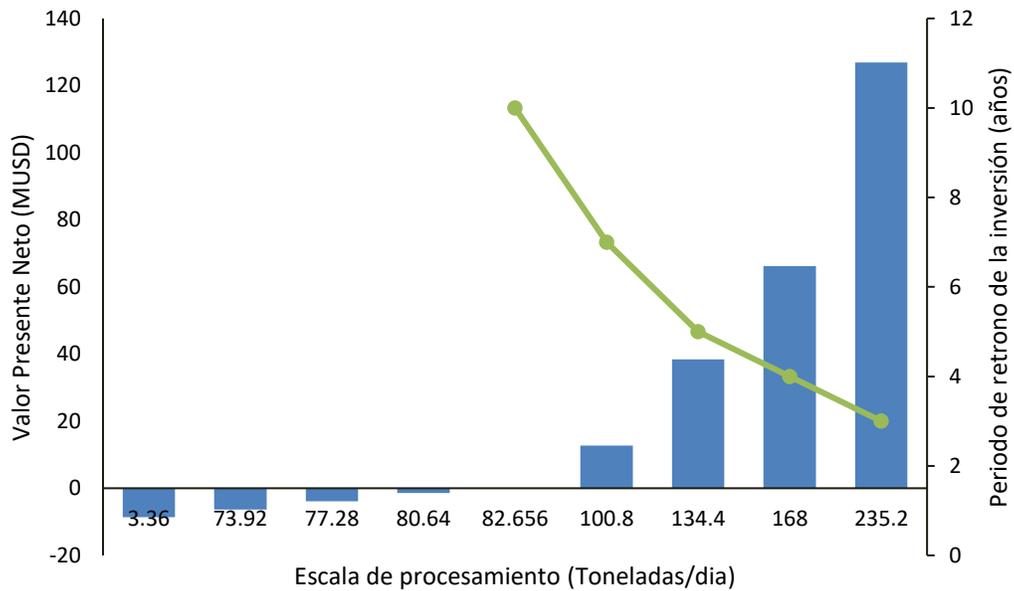


Figura 13. Análisis económico de la biorefinería de baja complejidad para el aprovechamiento de CN.

Biorefinería de mayor complejidad

El análisis económico se realizó con el fin de estipular si la biorefinería de mayor complejidad podría tener una viabilidad económica desde un punto de vista preliminar en el contexto colombiano. En el análisis económico se evidencian parámetros tales como el Valor Presente Neto (VPN), el período de retorno de la inversión y la tasa interna de retorno. También otros aspectos relacionados con la distribución de los costos en la biorefinería, análisis de escala, CAPEX and OPEX son analizados. En primer lugar, se muestra un diagrama de pastel que muestra la distribución de los costos asociados a los equipos empleados en la biorefinería con el fin de evidenciar cuál de las etapas planteadas resulta ser más costosa. La Figura 14 muestra dicha distribución.

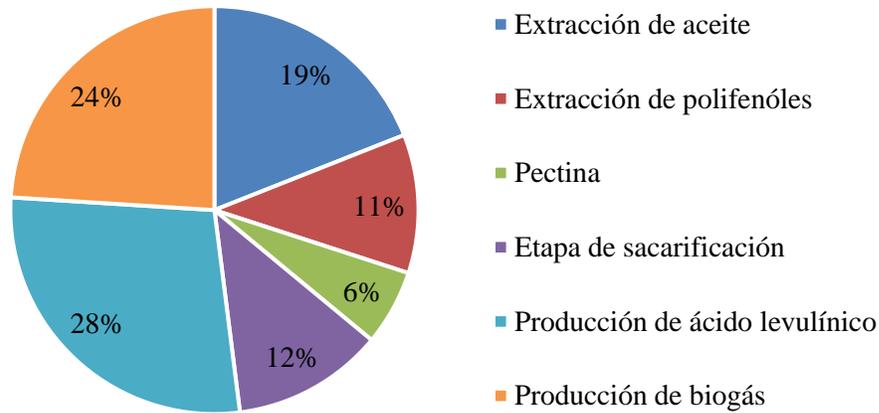


Figura 14. Distribución porcentual de los costos asociados a equipos en la biorefinería de CN.

La Figura 15, muestra el análisis de escla de la biorefinería basada en el uso de cáscaras de naranja y enfocada en la obtención de aceite esencial, polifenoles, pectina, biogás y ácido levulínico manejando como flujos de entrada de materia prima: 5, 10 y 15 ton/h.

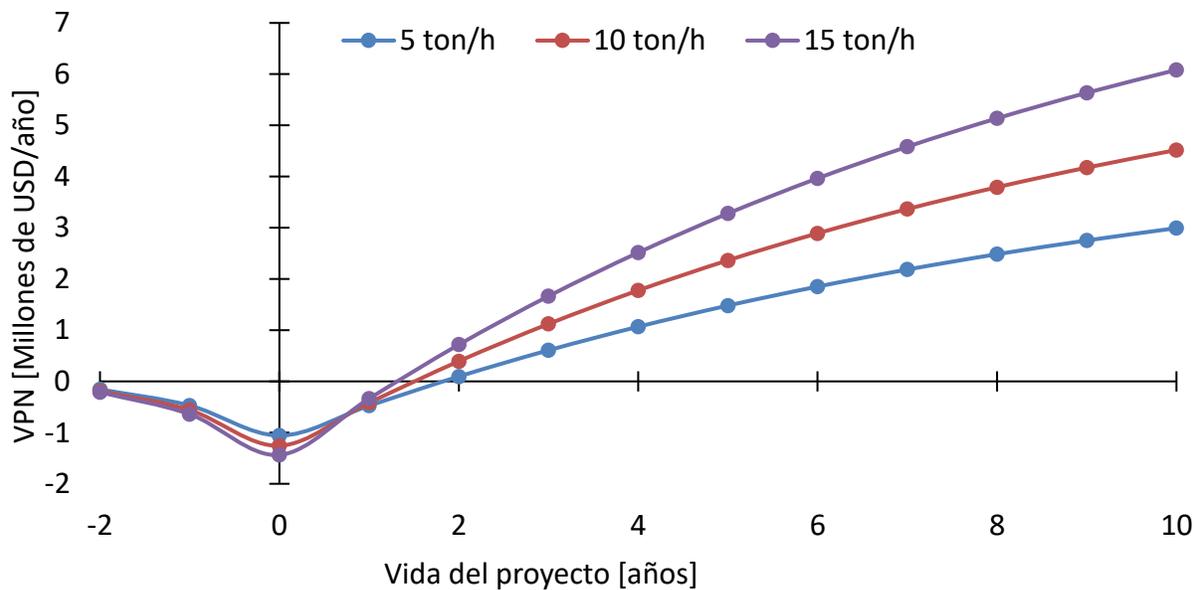


Figura 15. Análisis de sensibilidad de escala de la biorefinería a base de CN. Escenario 1: 5 ton/h, Escenario 2: 10 ton/h y Escenario 3: 15 ton/h.

Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá CM



Biorefinería de menor complejidad

La distribución de costos de la biorefinería de menor complejidad para CM se presenta en la Figura 16.

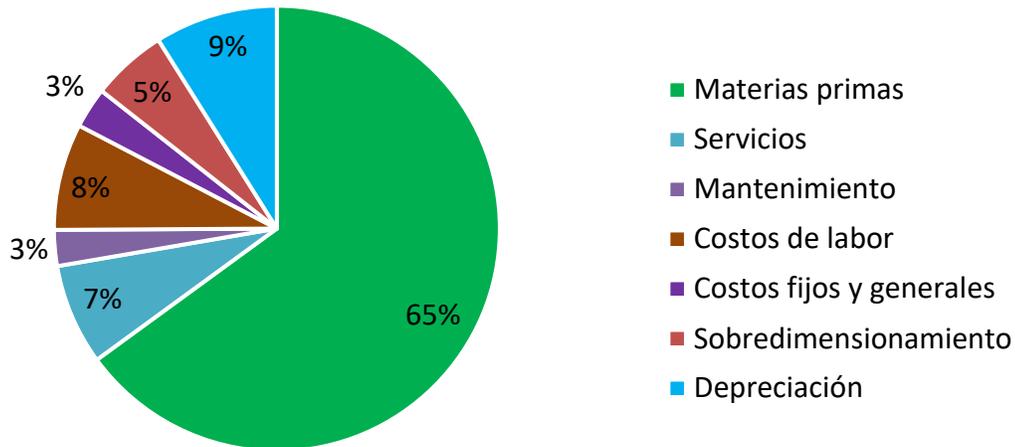


Figura 16. Distribución porcentual de los costos asociados a equipos en la biorefinería de CM.

En la Figura 17 se presenta las gráficas de VPN evaluadas a las escalas de 1, 2.3 y 1.5 toneladas horas:

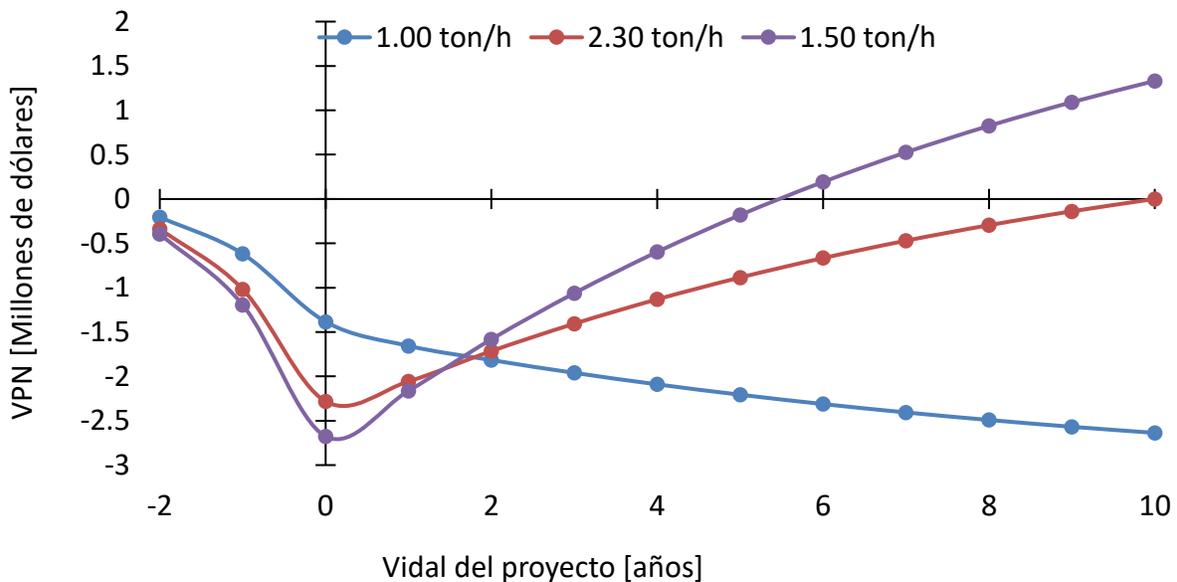


Figura 17. Análisis de sensibilidad de escala de la biorefinería a base de CM. Escenario 1: 1 ton/h, Escenario 2: 2.3 ton/h y Escenario 3: 1.5 ton/h.



Biorefinería de mayor complejidad

El análisis económico se realizó con el fin de estipular si la biorefinería podría tener una viabilidad económica desde un punto de vista preliminar en el contexto colombiano. En el análisis económico se evidencian parámetros tales como el Valor Presente Neto (VPN), el período de retorno de la inversión y la tasa interna de retorno. También otros aspectos relacionados con la distribución de los costos en la biorefinería, análisis de escala, CAPEX and OPEX son analizados. En primer lugar, se muestra un diagrama de pastel que muestra la distribución de los costos asociados a los equipos empleados en la biorefinería con el fin de evidenciar cuál de las etapas planteadas resulta ser más costosa. La Figura 18 muestra dicha distribución.

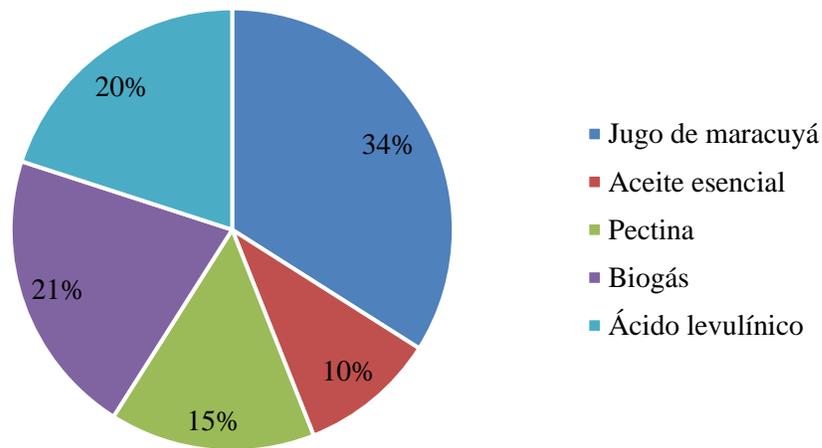


Figura 18. Distribución porcentual de los costos asociados a equipos en la biorefinería de CM.

Otros de los análisis envueltos en la biorefinería es la distribución de costos, los cuales, son presentados en forma de diagrama de pastel en la Figura 19.

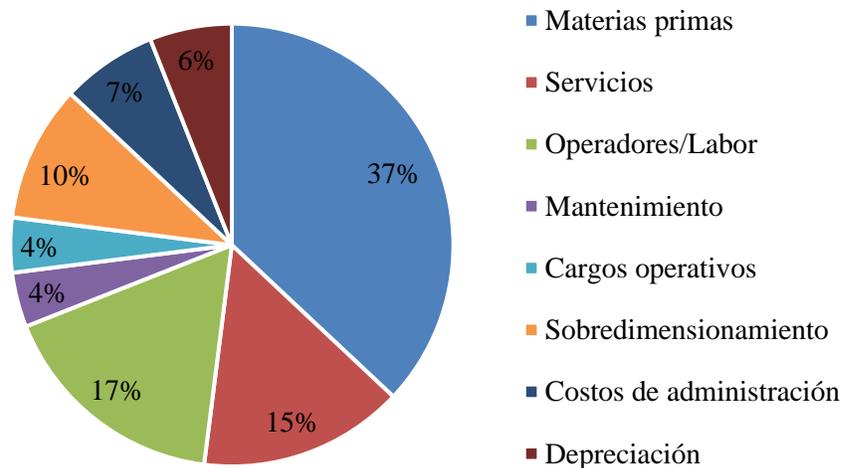


Figura 19. Distribución porcentual de los costos asociados en la biorefinería de CM.

Evaluación económica de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacate de rechazo AR

El análisis de la biorefinería para el aprovechamiento de aguacate de rechazo se realizó calculando la distribución de costos. La Figura 20 presenta los resultados obtenidos:

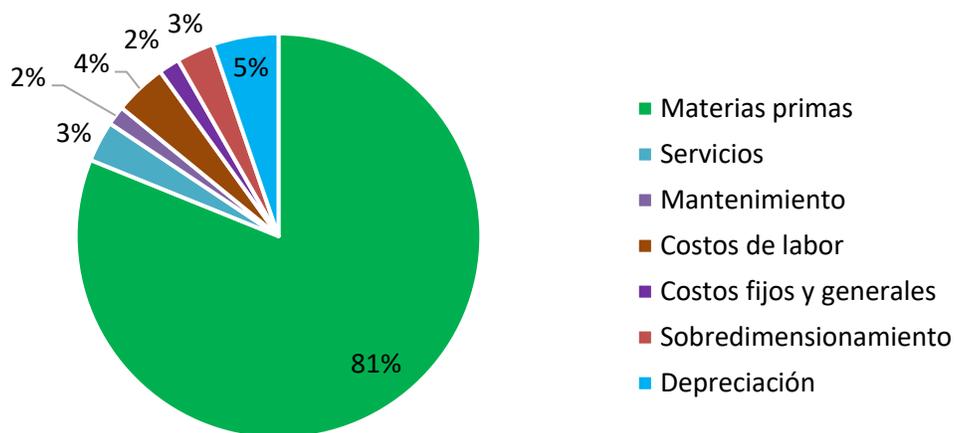


Figura 20. Distribución porcentual de los costos asociados a equipos en la biorefinería de AR.

La prefactibilidad de la biorefinería de AR se analizó a partir del cálculo del VPN. La Figura 21 presenta los resultados graficados a las escalas analizadas:

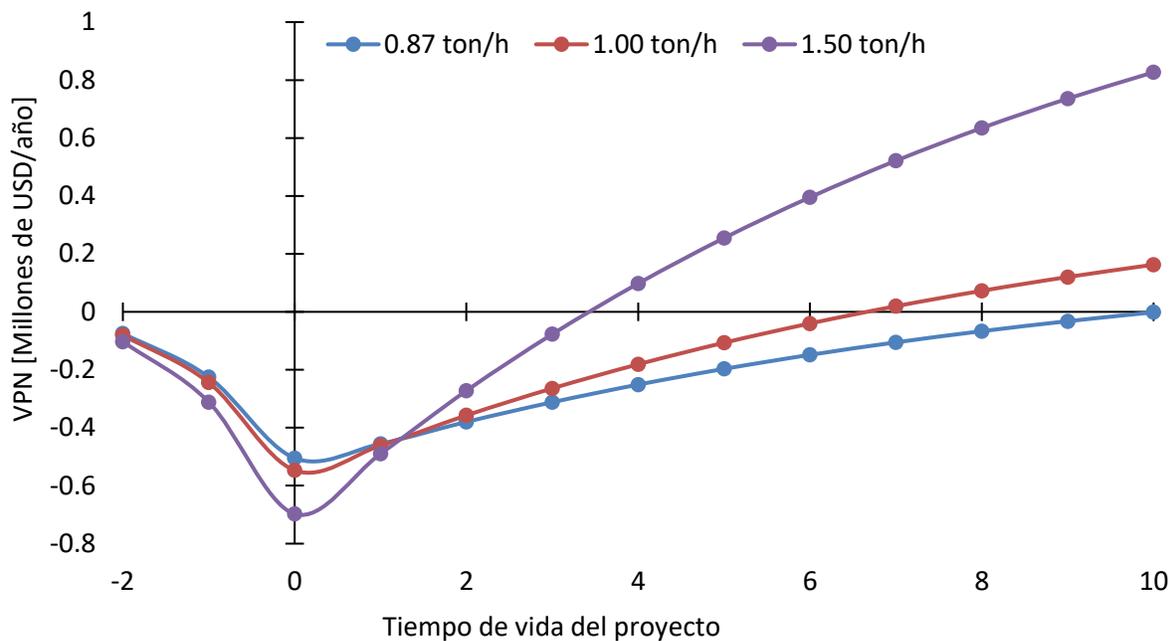


Figura 21. Análisis de sensibilidad de escala de la biorefinería a base de AR. Escenario 1: 0.87 ton/h, Escenario 2: 1 ton/h y Escenario 3: 1.5 ton/h.

Evaluación ambiental

Resultados de la evaluación ambiental de la biorefinería de baja complejidad de residuos de cáscara de naranja (CN)

Para el cálculo de la huella de carbono primero, se determinaron el objetivo y el alcance del trabajo.

Objetivo y alcance

- ✓ Objeto de investigación

El objetivo de este trabajo es una evaluación del ciclo de vida de la cuna a la puerta de la biorefinería de residuos de cáscara de naranja en el contexto colombiano. En este sentido, en el análisis de ciclo de vida ambiental (E-LCA) se planteó determinar el desempeño ambiental de tres escenarios diferentes para un productor de jugo de naranja de baja escala en Colombia. Se tomaron en cuenta los datos de la empresa FLP Procesados ubicada en Chinchina, Caldas (Colombia) (referidos al año 2019). La empresa opera con un flujo de 200 toneladas de naranja al mes. Los flujos de materias primas y servicios públicos se presentan en (Ortiz et al., 2020), Los escenarios a evaluar se muestran en la Figura 22. El caso base incluye la etapa agronómica del cultivo de naranja. Para este escenario, la unidad funcional se definió como 1 ha. La unidad funcional seleccionada para los tres escenarios fue 1 L de jugo de naranja. El escenario 1 fue la producción de jugo de naranja según los datos proporcionados por la empresa. El escenario 2 fue la producción de piel de naranja y la eliminación de CN en el relleno sanitario más cercano a la

empresa. Finalmente, el escenario 3 incluye los usos de CN en el contexto de la biorefinería. Para ello se consideró la biorefinería de baja complejidad propuesta por Ortiz-Sanchez (Ortiz-Sánchez, 2019). La biorefinería comprende la extracción de aceite esencial por destilación al vapor y la producción de biogás y fertilizantes por digestión anaeróbica. Los tres escenarios evaluados tienen un enfoque de la cuna a la puerta. En total, se tuvo en cuenta el caso base. Sin embargo, no es posible comparar el caso base con los tres escenarios presentados. Esto, la unidad funcional no es la misma. No obstante, se muestra que los resultados del caso base tienen una referencia.

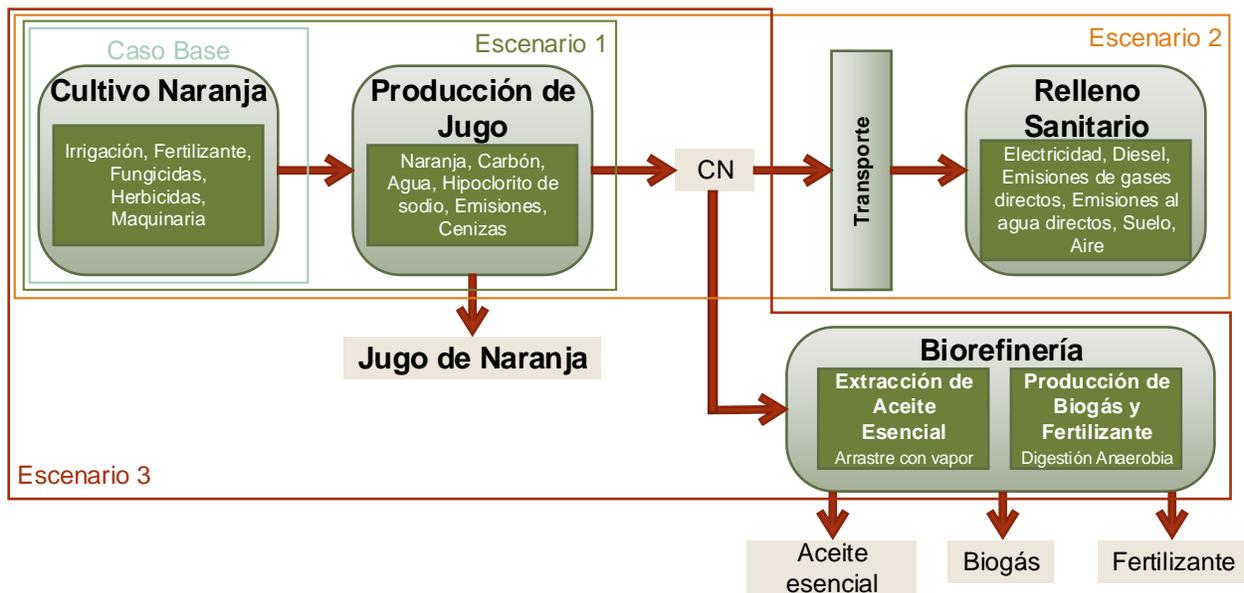


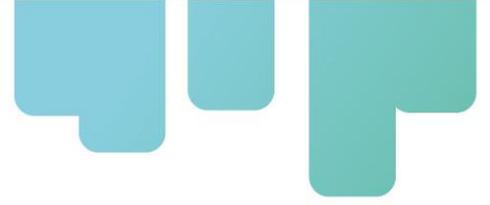
Figura 22. Límites de los escenarios evaluados

✓ **Unidad Funcional**

La unidad funcional se define como "un kilogramo de producto" en la biorefinería.

✓ **Límites del sistema**

El inventario del ciclo de vida de la biorefinería CN cubre toda la cadena de suministro. La primera etapa es el cultivo de la naranja. En esta etapa, se tomaron en cuenta los insumos necesarios para llevar a cabo el cultivo de naranja, así como la mano de obra, el trabajo se realiza mediante maquinaria y emisiones. La segunda etapa es el transporte directo de naranjas a la planta de procesamiento de jugo de naranja. Para esto, consideramos un radio de 20 km. La etapa de producción de jugo de naranja no se consideró en este trabajo. Finalmente, la tercera etapa corresponde a la biorefinería de los residuos de cáscara de naranja planteados en este trabajo para el contexto colombiano. Los datos del inventario para la primera y segunda etapa se refieren a las condiciones de cultivo y transporte de Colombia. Para esto, se utilizó la literatura abierta de las diferentes asociaciones de productores de cítricos de Colombia. No existen prácticas



estructuradas de manejo forestal en Colombia debido a la falta de políticas y control del gobierno. Por lo tanto, los datos del inventario de cultivos se recopilaron de viveros de semillas, agricultores y aserraderos ubicados en Manizales, Colombia. Por otro lado, los datos de inventario para la tercera etapa se obtuvieron del análisis técnico de la biorefinería propuesta para el contexto colombiano.

En la Figura 23 se muestra un modelo del sistema de producción considerado en este trabajo. El cultivo naranja está etiquetado en verde, el transporte en azul y el procesamiento de CN en naranja. Una de las características más importantes que afectan el rigor y la precisión del Análisis del ciclo de vida (LCA) es la disponibilidad de datos de inventario de calidad. En este trabajo, se utilizó literatura científica, modelos informáticos y cuestionarios para desarrollar el inventario del ciclo de vida. El inventario de datos para el subsistema de producción de naranja se recolectó de diferentes asociaciones de productores de cítricos de Colombia y se obtuvieron datos adicionales de la bibliografía.

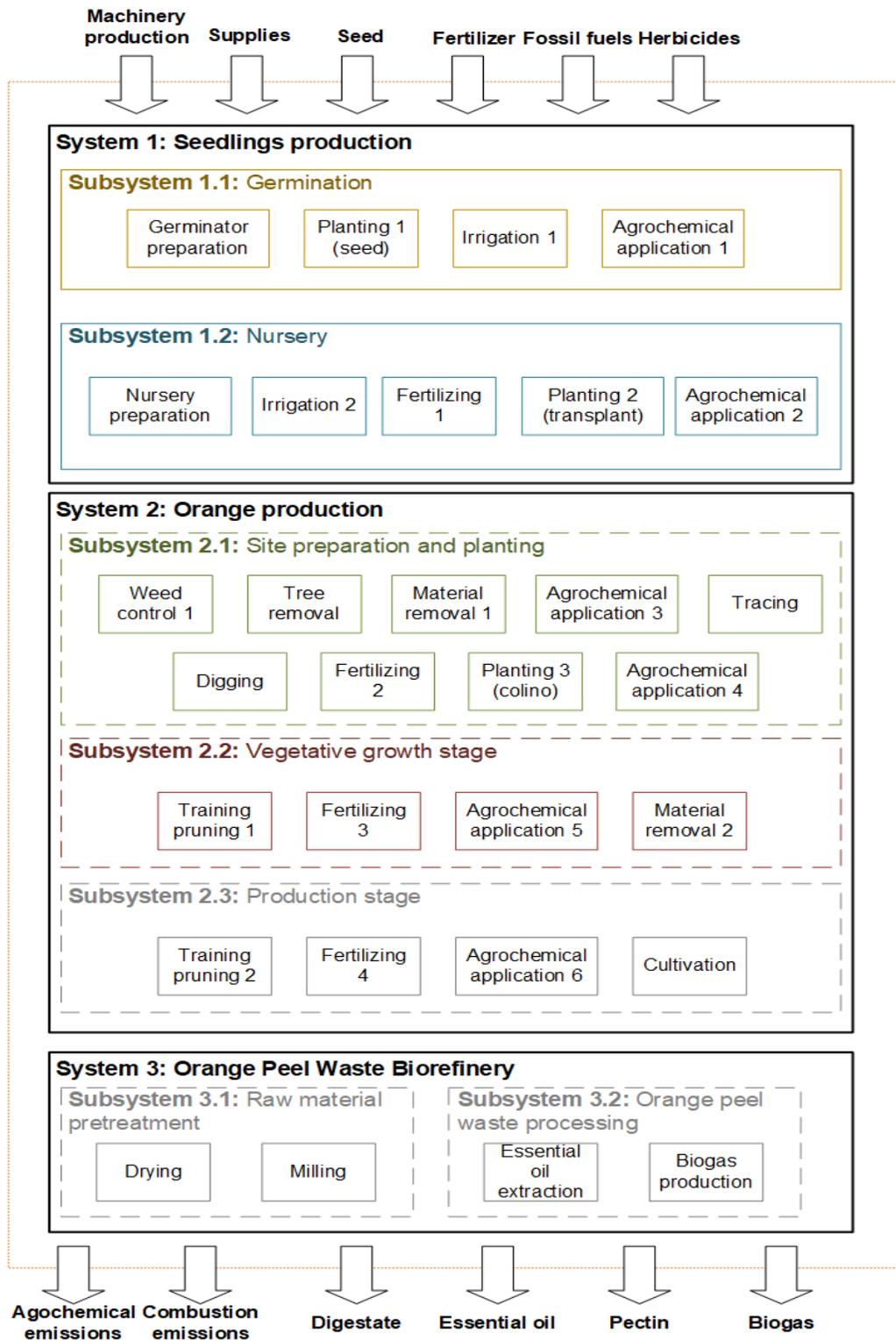
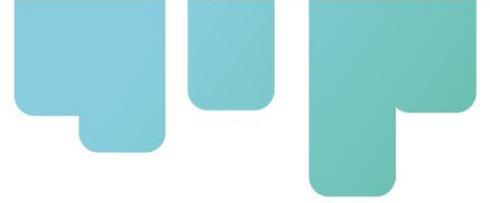


Figura 23. Sistema evaluado para el cálculo de la huella de carbono



La Figura 24 muestra las contribuciones del impacto ambiental de la etapa agronómica del cultivo de naranja:

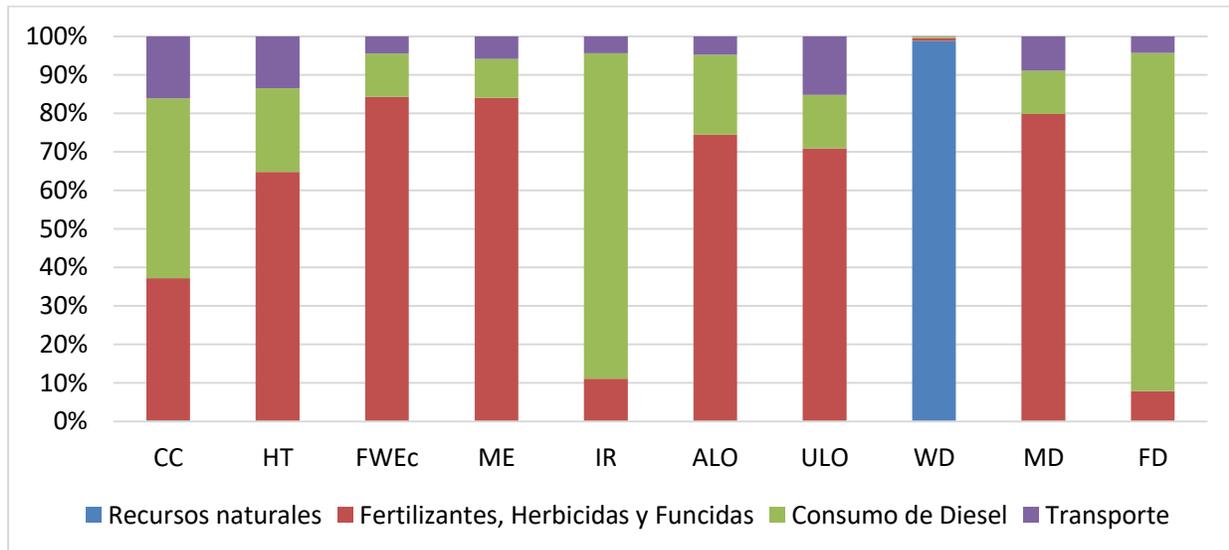


Figura 24. Contribuciones de impacto ambiental de la etapa agronómica del cultivo de naranja.

La Tabla 21 presenta los valores cuantitativos de las principales categorías de impacto ambiental obtenidas para la etapa agronómica del cultivo de naranja:

Tabla 21. Caracterización de los impactos asociados al cultivo de naranja.

Categoría	Unidad	Total	Recursos naturales	Agroquímicos	Consumo de diesel	Transporte
CC	kg CO ₂ eq	1,17	3,69,E-03	0,43	0,54	0,19
HT	kg 1,4-DB eq	0,37	0,00,E+00	0,24	0,08	0,05
FWec	kg 1,4-DB eq	0,04	2,98,E-12	0,03	4,47,E-03	1,75,E-03
ME	kg 1,4-DB eq	0,04	8,12,E-11	0,03	3,55,E-03	2,07,E-03
IR	kBq U235 eq	0,30	-	0,03	0,25	0,01
LO	m ² a	0,03	-	0,02	0,01	1,42,E-03
ULO	m ² a	0,18	-	0,13	0,03	0,03
WD	m ³	1,50	1,48	0,01	0,01	2,93,E-03
MD	kg Fe eq	0,13	-	0,11	0,02	0,01
FD	kg oil eq	1,53	-	0,12	1,34	0,07

La Figura 25 muestra la comparación de los tres escenarios analizados en porcentaje. Las categorías que presentaron mayor impacto para estos procesos fueron la acidificación terrestre (TA), la formación de oxidación fotoquímica (POF), la formación de material particulado (PMF), la transformación natural de la tierra (NLT) y las categorías mencionadas anteriormente.

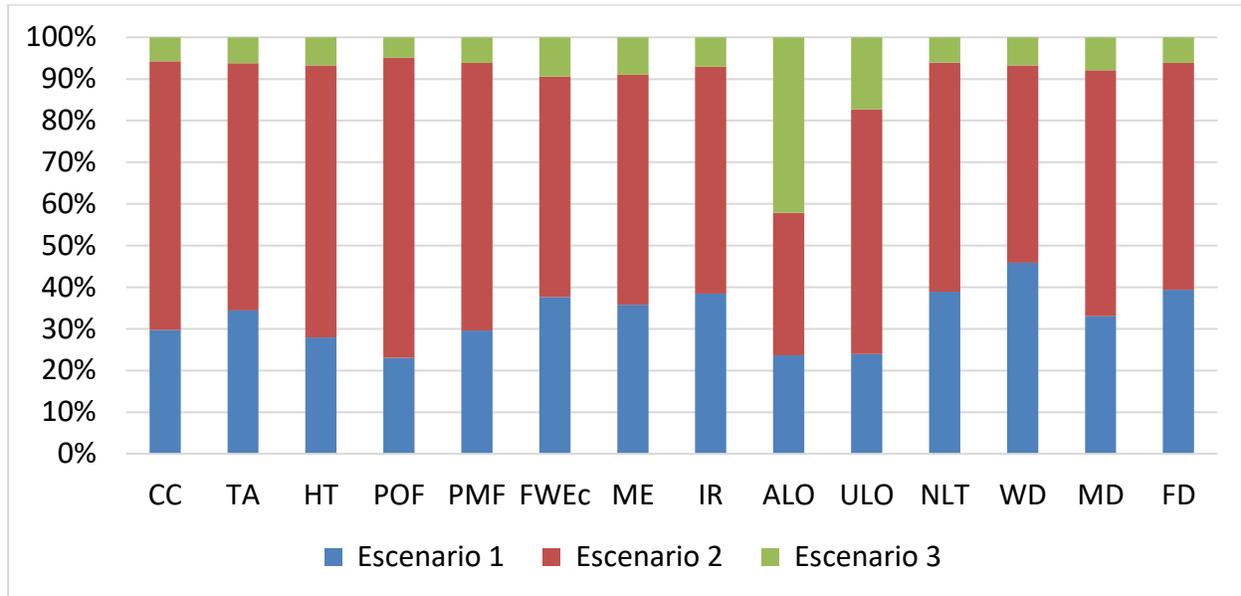
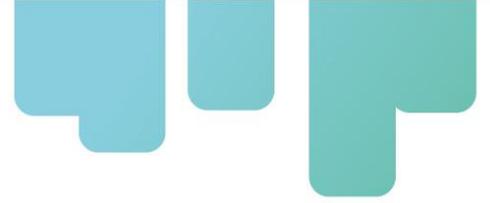


Figura 25. Contribuciones de impacto ambiental de los escenarios evaluados.

La Tabla 21 presenta los valores cuantitativos de las principales categorías de impacto ambiental obtenidas para la etapa agronómica del cultivo de naranja:

Tabla 21. Caracterización de los impactos asociados los escenarios evaluados.

Indicador	Unidad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
CC	kg CO ₂ eq	3,21	6,96	0,62
TA	kg SO ₂ eq	0,02	0,04	0,00
HT	kg 1,4-DB eq	0,67	1,57	0,16
POF	kg NMVOC	0,01	0,03	2,35,E-03
PMF	kg PM10 eq	0,01	0,01	1,41,E-03
FWec	kg 1,4-DB eq	0,07	0,10	0,02
ME	kg 1,4-DB eq	0,06	0,10	0,02
IR	kBq U235 eq	0,53	0,76	0,10
ALO	m ² a	0,05	0,08	0,10
ULO	m ² a	0,33	0,82	0,24
NLT	m ²	0,00	0,00	0,00
WD	m ³	2,69	2,78	0,39
MD	kg Fe eq	0,24	0,43	0,06
FD	kg oil eq	2,93	4,05	0,45



Resultados de la evaluación ambiental de la biorefinería de mayor complejidad de residuos de cáscara de naranja (CN)

El análisis ambiental fue realizado siguiendo la metodología GREENSCOPE, la cual está basada en el cálculo de indicadores que se interpretan en términos de sostenibilidad ambiental (G. J. Ruiz-Mercado et al., 2012; Gerardo J Ruiz-Mercado et al., 2012; Ruiz-Mercado et al., 2013). A continuación, se muestran los datos obtenidos para el análisis ambiental de la biorefinería.

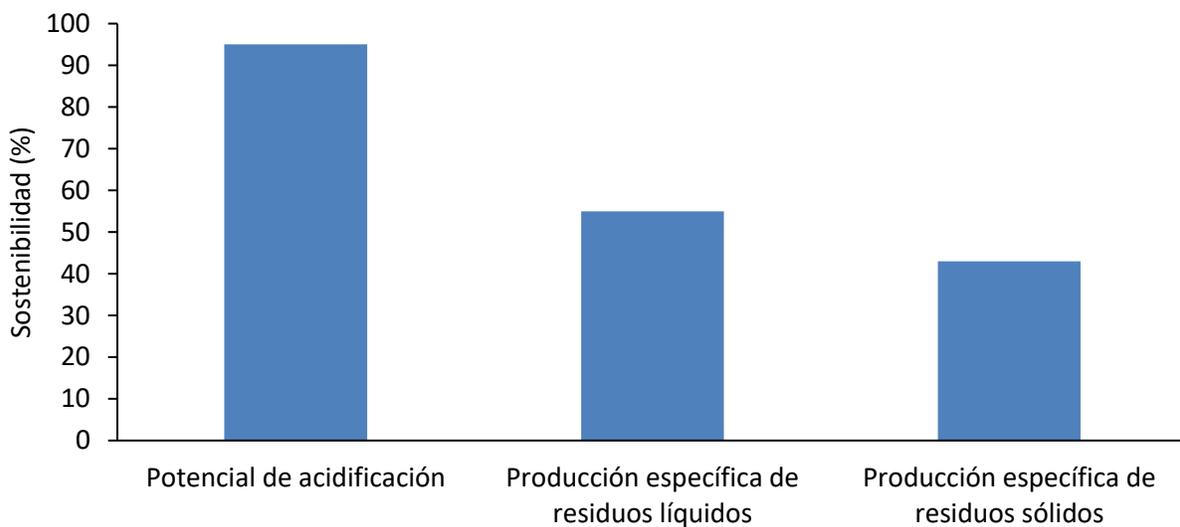
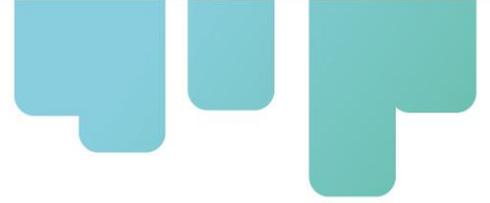


Figura 26. Sostenibilidad de la biorefinería a base de cáscara de naranja en términos de producción de corrientes residuales líquidas y gaseosas.



Discusión

Discusión y comparación de la composición química de los residuos de cáscara de naranja

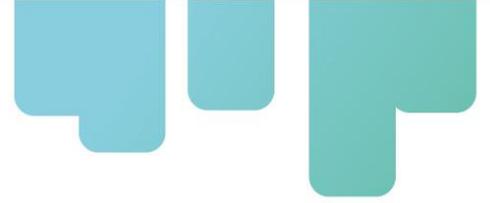
La comparación de los resultados obtenidos para CN con los datos reportados por otros autores para esta materia prima se discuten en esta sección. Esta comparación se realiza teniendo en cuenta que las diferencias entre los datos informados y los resultados experimentales pueden aparecer debido al posible cambio de propiedades de esta materia prima en diferentes cultivos.

En términos generales, los resultados muestran que las materias primas estudiadas tienen un gran potencial para ser empleadas en procesos bioquímicos por su contenido relativamente alto de celulosa, pectina, grasa y extractos, así como su bajo contenido de cenizas. La Tabla 5 muestra la caracterización química de CN para empresas colombianas y argentinas. Los resultados obtenidos por Marin et al. (Marín et al., 2007) se presentan para comparar los resultados obtenidos en este trabajo.

Discusión y comparación de la obtención de productos de interés

Aceite esencial

La extracción de aceites esenciales ha sido estudiada a partir de diferentes técnicas. Golmohammadi et al. (Golmohammadi et al., 2018) estudiaron un nuevo proceso de extracción que utiliza la explosión de la corriente (alta temperatura, presión y tiempos cortos). Estos autores obtuvieron un rendimiento de 1,13% w/w. La hidro-destilación asistida por microondas es una técnica alternativa que se ha estudiado para extraer con éxito el aceite esencial. Bustamante y col. (Bustamante et al., 2016) estudiaron la extracción del aceite esencial con esta técnica obteniendo un rendimiento de 1,8% w/w. Otros estudios informan el pretratamiento de CN para mejorar la extracción de aceites esenciales (Wu et al., 2017). Sin embargo, en el contexto de biorefinería de CN, la madurez de la tecnología representa una decisión de diseño importante para garantizar el rendimiento adecuado y la viabilidad económica del proceso. En este trabajo se seleccionó la extracción por destilación al vapor para la extracción de aceites esenciales. Además, esta tecnología permite arrastrar solo los componentes volátiles de CN. Por lo tanto, no se extraen compuestos polifenólicos con temperaturas de ebullición superiores a 200 °C. El aceite esencial por destilación al vapor con CN seco obtuvo un rendimiento del 1,14% w/w. Por otro lado, el rendimiento obtenido con CN húmedo fue del 0,61% w/w. A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que al disminuir la humedad de la muestra y el diámetro de las partículas, se pueden obtener mayores rendimientos de extracción. Estos resultados se parecen a los reportados por la literatura. Por ejemplo, Kisuma et al. (Kusuma et al., 2016) informan un rendimiento de extracción entre 0,59-0,70% w/w durante 7 horas de CN con destilación al vapor. Sikdar y col. (Sikdar et al., 2016) informan un rendimiento de extracción de aceite esencial de 2,4% w/w a 96 °C durante 60 min. Patsalou y col. (Patsalou et al., 2017) informó un valor de extracción del 0,43% w/w. Los principales factores para explicar los diferentes resultados son las



condiciones de operación del proceso de extracción, como el pretratamiento de CN (diámetro de partículas y humedad).

Potencial bioquímico de metano

La producción de biogás se realizó para la CN de la empresa colombiana. El proceso de digestión anaeróbica se realiza para producir una mezcla de gases llamada biogás, que está compuesta por metano, dióxido de carbono y amoníaco. Esta mezcla de gases puede usarse para producir calor y energía en sistemas de cogeneración, microturbinas y motores de combustión interna. La cantidad de biogás varía de una materia prima a otra. Por lo tanto, hay algunas materias primas con bajo potencial para producir biogás. El potencial para producir biogás se puede evaluar mediante la implementación de la prueba de potencial bioquímico de metanol (BMP). De esta forma, se realizó la prueba BMP de CN para evaluar el efecto de la extracción de aceites esenciales en el potencial de biogás de las muestras de CN.

Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja (CN)

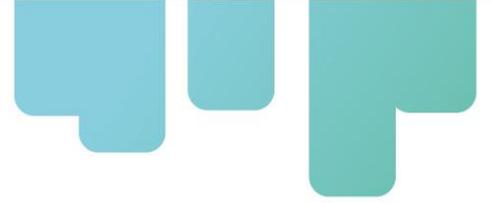
Biorefinería de menor complejidad

Los resultados de la simulación se resumen a través de los flujos másicos que se han obtenido de cada uno de los productos envueltos en la simulación. La Tabla 9 muestra dichos flujos másicos y los porcentajes de rendimientos obtenidos a nivel de simulación.

Los resultados de la simulación de la extracción de aceites esenciales y la producción de biogás son similares a los reportados por Lohrasbi et al., (Lohrasbi et al., 2010). Además, el esquema de biorefinería propuesto es similar a otros esquemas de biorefinerías para la valorización de CN reportados en la literatura abierta (Joglekar et al., 2019; Lohrasbi et al., 2010; Patsalou et al., 2017). En todos los casos, la producción de aceite esencial es una etapa fundamental debido al alto beneficio de este producto (Lohrasbi et al., 2010). Finalmente, la producción de biogás y biometano se considera en la biorefinería CN en la mayoría de los casos con fines de generación de energía para mitigar el impacto ambiental de los desechos orgánicos producidos en este tipo de configuración de proceso (Pourbafrani et al., 2013). Sin embargo, otros productos derivados de la matriz lignocelulósica de la CN deben estudiarse para aumentar la implementación real de las instalaciones para valorizar este tipo de residuo. La Tabla 9 muestra el indicador de masa y energía para la biorefinería de menor complejidad

Biorefinería de mayor complejidad

Los rendimientos reportados en la Tabla 10, fueron calculados como la relación de los flujos másicos generados en el proceso de producción de la biorefinería planteada, utilizando los métodos descritos en el anterior informe. En este sentido, los porcentajes de extracción de componentes tales como el aceite esencial, polifenoles y pectina fueron del 95.6%, 98.3% y 84.9%. Mientras que la conversión obtenida en la transformación de los sólidos resultantes de la

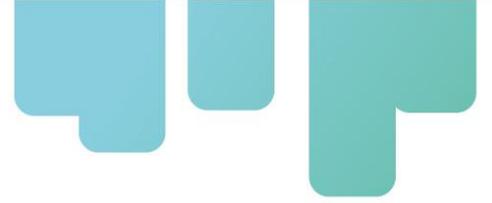


etapa de sacarificación enzimática (i.e., sólido principalmente comprendido por lignina) fue de alrededor del 58%. Por otro lado, la conversión de la celulosa envuelta en la etapa de sacarificación a glucosa fue del 88% y su posterior conversión a ácido levulínico fue de alrededor del 76,5%. Los rendimientos de extracción reportados anteriormente para el aceite esencial y los polifenoles son tan altos debido a que pocas etapas de procesamiento son requeridas para su producción, lo cual, evita las pérdidas de componentes a través de líneas secundarias, tales como aquellas que derivan de un proceso de filtración (Bagde et al., 2017; Martínez Sabajanes et al., 2012; Mira et al., 1999). Por otro lado, el porcentaje de extracción de la pectina tiene un valor menor al 90%, lo cual puede ser atribuido a la pérdida de la pectina durante su procesamiento y purificación, también a que, durante el proceso de precipitación de pectina envuelto en el esquema de producción, la cantidad de pectina inicial no es totalmente precipitada, dando lugar a pérdidas que, aunque parecen significativas están muy acorde con diferentes publicaciones (Kulkarni and Vijayanand, 2010; Rivas et al., 2008b).

Las conversiones alcanzadas en la producción de biogás y ácido levulínico, también son muy similares a aquellas conversiones que se han reportado en la literatura (Chang et al., 2007; Taherzadeh, 2011; Weingarten et al., 2012). En efecto, la degradación de sólidos ricos en lignina no es una tarea simple para el consorcio de microorganismos que forman parte del proceso de digestión anaerobia debido a la recalcitrancia que este sólido aun presenta luego de haber sido sometido a diferentes tipos de procesamientos (Zhang et al., 2013). Por otro lado, la fracción celulósica que forma parte de la cáscara de naranja fue convertida en ácido levulínico a través del uso de procesos catalíticos. Así, la glucosa fue degradada en ácido levulínico, ácido fórmico, 5-hidroximetil furfural y residuos sólidos. Los cuales a la salida del reactor de conversión tiene una distribución másica de 82%, 12%, 5%, 1%, respectivamente (Weingarten et al., 2012). Lo anterior implica que no toda la glucosa es transformada en ácido levulínico como producto final del proceso y, por tanto, es posible considerar que no toda la glucosa puede ser potencialmente convertida en el producto deseado.

Los resultados obtenidos a nivel de rendimientos másicos y conversiones reportadas anteriormente, son muy similares a algunos casos de biorefinerías a partir de cáscaras de naranja que se han reportado en la literatura (Martínez Sabajanes et al., 2012).

Los productos generados en la biorefinería fueron propuestos como productos potenciales que pueden resultar del procesamiento de las cáscaras de naranja recién generadas en las plantas de extracción de jugo. No obstante, un análisis de mercado debe ser realizado con el fin de evaluar y contextualizar los productos propuestos en este trabajo para definir si tienen cabida en la industria química colombiana o en la industria química internacional. Lo anterior, se abre como una posibilidad para realizar cambios en la biorefinería para proponer escenarios que puedan llegar a ser más atractivos para las necesidades del comercio actual. Además, otro aspecto importante que debe ser una de las principales premisas que prevalezcan durante este trabajo es que el diseño y simulación de biorefinerías, las cuales son directamente esquematizadas a partir



de la potencialidad de la materia prima, deben ser contextualizadas con el fin de dar un enfoque mucho más realista que permita acercar más los bandos de la investigación y la empresa público/privada.

Una modificación que surgió en base a los resultados obtenidos y tomando el ácido levulínico como uno de los productos con mayor potencial económico, es el incremento de glucosa o azúcares que son enviados al proceso de conversión catalítica. Para ello, una fracción que puede llegar a ser muy representativa dentro de la cáscara de naranja como lo son los azúcares solubles, es una fracción que deber ser contemplada. Así, como etapa previa de procesamiento antes de la extracción de aceite se puede dar lugar a la extracción de los azúcares solubles contenidos en las cáscaras de naranja (Kuo et al., 2017; Martínez Sabajanes et al., 2012). Así, una mayor cantidad de materia prima podrá estar disponible para la producción de ácido levulínico incrementando a su vez el porcentaje de ganancias de la biorefinería debido a los ingresos generados por la venta de este producto.

Los resultados reflejados en la Tabla 11, muestran que la biorefinería planteada consume grandes cantidades de vapor de media presión. Esto se debe a que el paso de producción de ácido levulínico se realiza a condiciones de alta presión y temperatura. Por otro lado, los consumos de vapor de baja y alta presión se atribuyen a aquellos procesos que requieren mantener temperaturas relativamente bajas y altas tales como en los procesos de extracción de polifenoles, pectina y aceite esencial (Mira et al., 1999; Talhaoui et al., 2015). El consumo de electricidad de la biorefinería está ligado al consumo energético asociado a equipos tales como bombas, compresores y molinos (Mussatto et al., 2013). Finalmente, el consumo de agua de enfriamiento está ligado a todos aquellos procesos que en la biorefinería requieran pasar de temperaturas mayores a los 40°C, lo cual, es el caso de todos los bloques planteados en la biorefinería. Atendiendo a los resultados energéticos reportados en la tabla 9 en términos de los flujos entálpicos, es posible dilucidar una distribución porcentual de consumo neto de energía de la biorefinería, la cual, es presentada en la Figura 27.

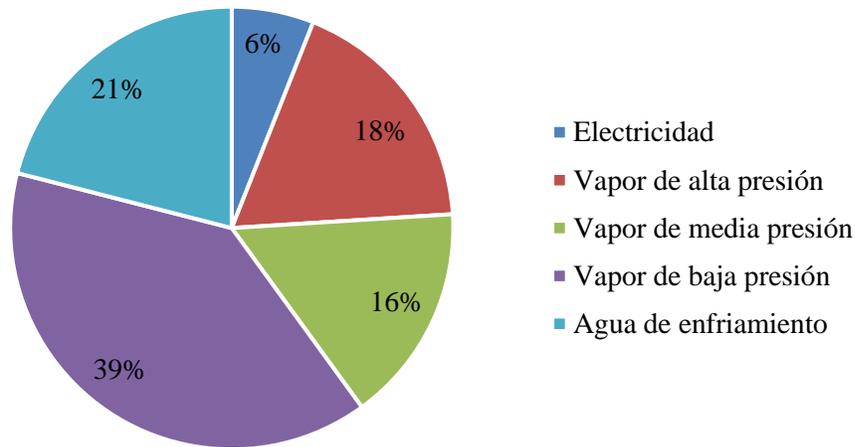
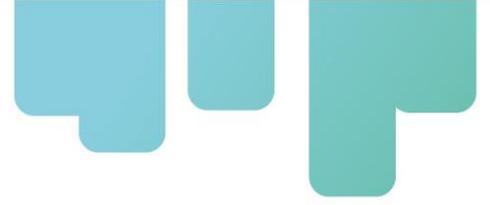


Figura 27. Distribución porcentual del consumo de servicios de una biorefinería a partir de cáscara de naranja.

La distribución porcentual del consumo de energía neto de la biorefinería, muestra que el vapor de media presión es quien debe ser en mayor medida generado en la biorefinería, a través de un sistema de cogeneración de energía. Por tanto, una parte del biogás generado debe ser evaluado como posible materia prima para ser alimentada a un sistema de generación de vapor (Deublein and Steinhauser, 2010; Solarte-Toro et al., 2018b). Lo anterior incluye que dentro del esquema de la biorefinería se debe evaluar si la aplicación de un sistema de cogeneración resulta ser un escenario óptimo, debido a que, dependiendo de la contextualización del proyecto, el precio de generar los servicios dentro de la misma planta puede llegar a resultar más costoso que la compra de los servicios (i.e., especialmente la electricidad). Otros indicadores que son interesantes reportar en el caso de biorefinerías es el rendimiento de energía térmica y eléctrica que se consume por unidad másica de materia prima y la relación entre la energía consumida en la biorefinería en términos de servicios y la energía que podría llegar a ser generada si todo el residuo se somete a un proceso de combustión ideal. Los resultados de las dos relaciones mencionadas anteriormente son 3,91 MJ/kg y 0,20. Los anteriores resultados implican que se consumen alrededor de 4 MJ de energía térmica para procesar todo el flujo cáscara de naranja considerada en la simulación. Por otro lado, la relación de la energía térmica consumida en la biorefinería con la cantidad de energía liberada por la materia prima si se sometiese a un proceso de combustión, es menor a 1, lo cual, implica que el proceso es susceptible de incluir una unidad de autogeneración. No obstante, este indicador debe ser refinado aún más con el fin de involucrar no sólo correlaciones teóricas del potencial energético de la materia prima sino también correlaciones que impliquen la eficiencia energética de los procesos de transformación para obtener dicha energía térmica. Así este indicador podría ser empleado para determinar de manera rápida si vale la pena o no pensar en un sistema de autogeneración de energía en una



biorefinería, debido a que su inclusión en el diseño lleva, en algunas ocasiones, altos costos de capital.

Biorefineria de mayor complejidad optimizada en términos económicos

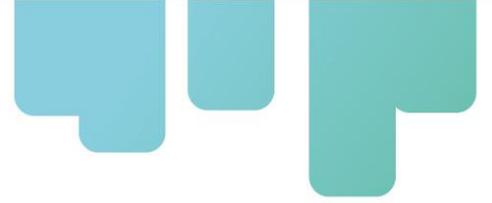
El modelo matemático se formuló y resolvió utilizando GAMS como herramienta computacional, se utilizó el solucionador CPLEX.

La configuración óptima obtenida al resolver el problema se muestra en la Figura 12. Esta biorefinería consta de tres unidades para la producción de aceite esencial, compuestos polifenólicos, biogás y fertilizante. El proceso consiste en la destilación al vapor, la extracción de compuestos polifenólicos con etanol y la producción de biogás por fermentación anaeróbica, los reactivos necesarios para el proceso son CO₂, etanol y nutrientes para la producción de biogás. Los servicios necesarios fueron agua de refrigeración, electricidad y vapor a baja presión. Estos servicios fueron proporcionados por una fuente externa como una caldera y el suministro público de electricidad ya que el sistema de cogeneración se consideró inviable y no puede satisfacer los requisitos.

Si bien el VPN no alcanza un valor positivo (Ver Tabla 12), el alto precio de mercado de los compuestos polifenólicos (representa el 99% de los ingresos de la biorefinería) hace de esta ruta la mejor alternativa. Esta solución puede llevar a un análisis derivado donde el proceso independiente para producir compuestos polifenólicos puede ser otro caso, pero la limitación es que los residuos no están integrados en el proceso. A pesar de que el biogás no representa un factor de asignación que contribuya significativamente, el objetivo principal es la valorización de todos los residuos de la biorefinería.

La solución alternativa al problema fue el proceso autónomo, que consiste en la extracción de aceite esencial y producción de biogás, el valor actual neto fue de -7.647 mUSD. Esta alternativa es similar al caso de los tallos cortados del café (Aristizábal Marulanda et al., 2019), donde el sistema de producción y cogeneración de etanol se encontró como la solución óptima, en este caso el sistema de cogeneración se considera el proceso independiente. Comparando los resultados económicos, aunque la función objetivo y los principales productos difieren con este estudio, el margen económico fue negativo en ambos estudios debido a la baja escala de procesamiento y al alto costo de producción e inversión de capital para el caso y procesos propuestos.

Como se puede observar en la Tabla 12, los resultados económicos asociados a la biorefinería, la mayor contribución al OPEX fueron los servicios públicos, los gastos generales de los pantalones y el costo de la mano de obra. Resultados similares de distribución de costos obtenidos por Aristizábal et al. (Aristizábal Marulanda et al., 2019) donde los servicios públicos también fueron los de mayor costo. El alto consumo de servicios públicos indica que un posible diseño de red de intercambiadores de calor para la configuración óptima reduciría los costos y se pueden obtener



mejores resultados económicos, Materia prima, fija y general, y la depreciación estuvo entre los costos con menor contribución, Los cargos por depreciación fueron menores debido a la vida útil más larga del proceso.

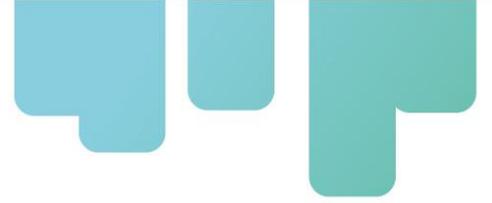
La no prefactibilidad se puede relacionar también con los bajos rendimientos en masa que indican una baja eficiencia global del proceso ($2,752 \times 10^{-3}$ para aceite esencial, $4,935 \times 10^{-2}$ para los compuestos polifenólicos y $1,763 \times 10^{-2}$ para biogás). Estos rendimientos se calcularon en base húmeda de CN.

Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá (CM)

Biorefinería de menor complejidad

El proceso de valorización de la cáscara de maracuyá puede ser propuesto desde diferentes ópticas. En este sentido, se puede proponer un proceso de menor envergadura tecnológica que este solo destinado a la producción de pectina y biogás. Otro aspecto importante a considerar es la escala de procesamiento. Para este modelo se propone trabajar una escala de procesamiento de cáscara de maracuyá de 1 tonelada por hora. El análisis de la biorefinería se realiza en términos técnicos y económicos. El análisis técnico involucra el análisis de los rendimientos de los productos y el cálculo del índice de intensidad másica del proceso. Respecto al análisis económico, se evalúa la inversión de capital, la distribución de los costos y el valor presente neto (VPN) en función de la escala de procesamiento.

El rendimiento de extracción de pectina estimado para el proceso fue de 150 kg/tonelada. El rendimiento de extracción a partir de la cáscara de maracuyá es muy similar al rendimiento de 158,5 kg/ton obtenido a partir de cáscaras de naranja reportado por Ortiz-Sanchez et al., (Mariana Ortiz-Sanchez et al., 2020). Este rendimiento demuestra que la cáscara de maracuyá puede ser considerada como una fuente de pectina viable en comparación con otras materias primas. Luego de que se ha realizado el proceso de extracción de pectina, la cáscara agotada procede a ser empleada en un proceso de digestión anaerobia para generar biogás. El contenido de la cáscara de maracuyá esta dado en términos de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina no extraída. El rendimiento de biogás que se obtuvo en el proceso planteado fue de $405.6 \text{ m}^3/\text{ton}$ de cáscara de maracuyá que entra al proceso. Este volumen de producción de biogás denota que esta materia prima tiene un alto potencial de generación al igual que otros sustratos como la semilla de aguacate. Este rendimiento es comparable también con otras materias primas reportadas por Solarte-Toro et al., (Solarte-Toro et al., 2018a). Una vez los rendimientos del proceso han sido analizados se procede a estimar el valor de índice de intensidad másica del proceso (IMP). Las entradas de materia prima al proceso son etanol, ácido cítrico, agua, inóculo, y cáscara de maracuyá. Por otro lado, las salidas del proceso son pectina, biogás y digestato. Si se considera el digestato como un posible producto para ser valorizado en la biorefinería de cáscara de maracuyá se tiene un IMP de 3,95. Este valor está en el intervalo establecido para procesos que generan

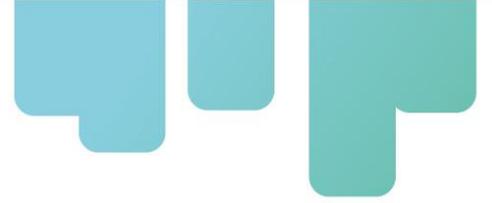


productos a granel (Budzinski et al., 2019). No obstante, si el digestato no se considerara como un producto comercializable se tendría un valor de 60,38 para el IMP. Lo anterior ratifica que el proceso de digestión anaerobia en húmedo consume una gran cantidad de materia prima para la generación de su producto principal (i.e., biogás). Por tanto, se requiere hacer un cambio tecnológico o de proceso para disminuir la cantidad de inóculo adicionado al proceso. Algunas alternativas para disminuir la cantidad de inóculo que ingresa al proceso de digestión anaerobia están relacionadas con la recirculación de lodo al proceso de digestión, la disminución de la relación inóculo sustrato, entre otras. A pesar del alto valor del IMP del proceso sin considerar el digestato como producto, es posible decir que la extracción de pectina y producción de biogás parecen ser una alternativa viable desde el punto de vista técnico dado que la materia prima permite obtener buenos rendimientos en la generación de los productos de interés.

Analizando la perspectiva energética, la línea de producción de pectina y biogás consumen 1'278000 y 9'067790 kWh/año. Los “altos” valores de consumo energético de las líneas productivas mencionadas poseen estos valores dado que en el caso de la extracción de pectina se requieren una gran cantidad de equipo tanto de mezcla como de bombeo, mientras que el consumo energético de la línea de biogás se incrementa debido a que se incrementa el tamaño de combustión interna que requiere en el proceso. Considerando los valores mencionados anteriormente, la biorefinería de cáscara de maracuyá consume alrededor de 10345790 kWh/año. Otra justificación de la diferencia de magnitud de los valores de consumo energético presentados en la biorefinería de maracuyá y aguacate es que la planta de extracción de pectina funciona de manera continua 24 horas al día por 350 días. Así, la línea de extracción de pectina tiene un consumo de 152,14 kW. El biogás generado en el proceso de digestión anaerobia tiene la capacidad de generar 5'948800 kWh/año. Por tanto, el índice de autogeneración del proceso es alrededor de un 57%. Además, se tiene una capacidad de recuperación de energía térmica de los gases de combustión que salen del motor de 847.7 kW/ton de cáscara de maracuyá. Vale la pena aclarar que el motor de combustión interna seleccionado para hacer el proceso de generación tiene una eficiencia global del 85.2%.

Biorefinería de mayor complejidad

Los rendimientos reportados en la Tabla 16, fueron calculados como la relación de los flujos máxicos generados en el proceso de producción de la biorefinería planteada utilizando los métodos descritos en el anterior informe número II. En este sentido, los porcentajes de extracción de componentes tales como el juego, aceite esencial y pectina fueron del 69,72%, 88,92% y 94,87%. Mientras que la conversión obtenida en la transformación de los sólidos resultantes de la etapa de sacarificación enzimática (i.e., sólido principalmente comprendido por lignina) fue de alrededor del 55% (similar a la obtenida en el caso de la cáscara de maracuyá). Por otro lado, la conversión de la celulosa envuelta en la etapa de sacarificación a glucosa fue del 90% y su posterior conversión a ácido levulínico fue de alrededor del 70.3% (similar a las conversiones reportadas en los procesos publicados para la conversión de glucosa en ácido levulínico a través del proceso *Biofiene*). Los rendimientos de extracción reportados anteriormente para el aceite esencial es tan

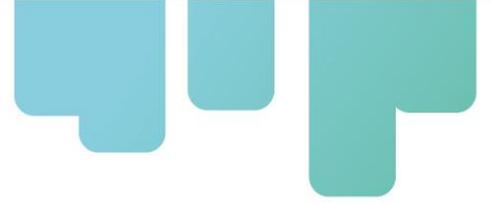


altos debido a que pocas etapas de procesamiento son requeridas para su producción, lo cual, evita las pérdidas de componentes a través de líneas secundarias, tales como aquellas que derivan de un proceso de filtración (Bagde et al., 2017; Martínez Sabajanes et al., 2012; Mira et al., 1999). Por otro lado, el porcentaje de extracción de la pectina tiene un valor alto, lo cual puede ser atribuido a las pocas pérdidas de la pectina durante su procesamiento y purificación (Kulkarni and Vijayanand, 2010; Rivas et al., 2008c).

Las conversiones alcanzadas en la producción de biogás y ácido levulínico, también son muy similares a aquellas conversiones que se han reportado en la literatura (Chang et al., 2007; Taherzadeh, 2011; Weingarten et al., 2012). En efecto, la degradación de sólidos ricos en lignina no es una tarea simple para el consorcio de microorganismos que forman parte del proceso de digestión anaerobia debido a la recalcitrancia que este sólido aun presenta luego de haber sido sometido a diferentes tipos de pretratamientos (Zhang et al., 2013). Por otro lado, la fracción celulósica que forma parte de la cáscara de maracuyá fue convertida en ácido levulínico a través del uso de procesos catalíticos. Así, la glucosa fue degradada en ácido levulínico, ácido fórmico, 5-hidroximetil furfural y residuos sólidos. Los cuales a la salida del reactor de conversión tiene una distribución másica de 82%, 12%, 5%, 1%, respectivamente (la distribución másica de los productos obtenidos en la producción de ácido levulínico no varía debido a que se emplea el mismo modelo cinético que el que se usó para la cáscara de naranja) (Weingarten et al., 2012). Lo anterior implica que no toda la glucosa es transformada en ácido levulínico como producto final del proceso y, por tanto, es posible considerar que no toda la glucosa puede ser potencialmente convertida en el producto deseado. Los resultados obtenidos a nivel de rendimientos másicos y conversiones reportadas anteriormente son muy similares algunos casos de biorefinerías a partir de cáscaras de naranja que se han reportado en la literatura (Martínez Sabajanes et al., 2012).

Los productos generados en la biorefinería fueron propuestos como productos potenciales que pueden resultar del procesamiento del fruto de maracuyá in situ al proceso de extracción de jugo. No obstante, un análisis de mercado debe ser realizado con el fin de evaluar y contextualizar los productos propuestos en este trabajo para definir si tienen cabida en la industria química colombiana o en la industria química internacional. Lo anterior, se abre como una posibilidad para realizar cambios en la biorefinería para proponer escenarios que puedan llegar a ser más atractivos para las necesidades del comercio actual. Además, otro aspecto importante que debe ser una de las principales premisas que prevalezcan durante este trabajo es que el diseño y simulación de biorefinerías, las cuales son directamente esquematizadas a partir de la potencialidad de la materia prima, deben ser contextualizadas con el fin de dar un enfoque mucho más realista que permita acercar más los bandos de la investigación y la empresa público/privada.

Al igual que en el caso de la cáscara de naranja, modificaciones pueden ser sugeridas en base a los resultados obtenidos entre estas alternativas se encuentra el aprovechamiento de la semilla de cáscara de maracuyá para la obtención de aceite esencial de forma cíclica en el año. Lo anterior

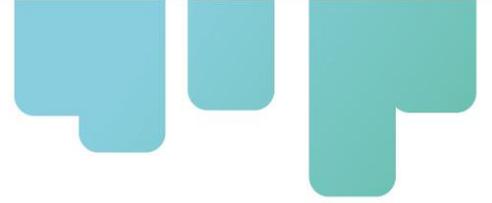


implica almacenar la producción de semillas durante la producción de jugo durante trimestres o cuatrimestres y solo ahí realizar la producción de aceite debido. Lo anterior se plantea siguiendo la descomposición jerárquica de procesos como postulado en la definición del régimen de flujo del proceso. Esto permitirá disminuir costos variables del proceso como el consumo de materias primas y servicios de forma continua que son algunas de las limitantes que se han identificado en procesos que ofrecen tan bajos rendimientos de productos cuando estos son generados en continuo.

Discusión de los resultados técnicos y energéticos de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacate de rechazo (AR)

La valorización del aguacate rechazado en los cultivos colombianos puede ser realizado a través de la generación de productos de valor agregado bajo el concepto de biorefinería (Dávila et al., 2017). Existen diferentes configuraciones de biorefinería que pueden ser planteadas considerando las tres fracciones principales que componen el aguacate (i.e., pulpa, semilla y cáscara). En este trabajo se propuso la valorización del aguacate para la producción de aceite de aguacate, alimento animal, biogás y electricidad. La biorefinería propuesta fue analizada en términos técnico y económicos. El análisis técnico se realizó en a través del cálculo del rendimiento y el índice de intensidad másica de proceso (IMP). Por otro lado, el análisis económico se realizó considerando ítems tales como inversión de capital, valor presente neto (VPN) y distribución de costos.

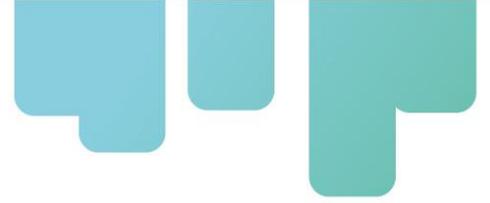
En relación al análisis técnico, se calcularon los rendimientos de cada uno de los productos en relación a una (1) tonelada de aguacate. El rendimiento de aceite de aguacate que se obtuvo fue de 80 kg/tonelada de aguacate. Este resultado es demasiado bajo en comparación con otros resultados en la literatura. Por ejemplo, Costagli and Betti reportaron un rendimiento de extracción de aceite de aguacate de 141 kg/tonelada de aguacate (Costagli and Betti, 2015). No obstante, el bajo rendimiento obtenido en el proceso simulado puede variar en un intervalo que va desde el 10% hasta el 30%. Entre las principales características del aceite de aguacate cabe resaltar su alto contenido de ácido oleico (60% - 80%) y palmítico (10% - 25%). Otra característica importante del aceite de aguacate es su contenido de vitamina E, el cual se encuentra alrededor de 130 mg/kg (Costagli and Betti, 2015). En relación al rendimiento de alimento animal obtenido del proceso, se obtuvo un valor de 103.35 kg/ton de aguacate o 650 kg/ton de pulpa agotada. La producción de alimento animal sale como una alternativa de valorización de la pulpa agotada que sale del proceso de producción de aceite de aguacate. En cuanto a las semilla y cáscara del aguacate se propone usar estas materias primas para la producción de biogás y energía eléctrica para suministrar un porcentaje de la energía eléctrica que se consume en ambas líneas de producción (i.e., aceite de aguacate y alimento animal). Las semilla y cáscara de aguacate se emplean para generar biogás a través de un proceso de digestión húmeda. El rendimiento de biogás de la semilla y cáscara de 201 L/kg y 28 L/kg, respectivamente. A partir de estos valores se concluye que la semilla de aguacate tiene un potencial de generación de biogás 7 veces mayor que la cáscara. Lo anterior se explica debido al relativamente alto contenido de almidón que



presenta la semilla de aguacate (la cual oscila entre 25% y 30% en base seca). En conjunto, se obtuvo un rendimiento de 29.67 m³/ton de aguacate que ingresa al proceso. El biogás generado durante este proceso debe ser purificado antes de ser empleado como combustible en un motor de combustión interna. El proceso de purificación del biogás consiste en la remoción de sulfuro de hidrógeno y humedad. Una vez purificado el biogás este se alimenta como combustible a un motor de combustión interna para la generación de electricidad. Los motores que se emplean en este tipo de procesos poseen una gran variedad de eficiencias energéticas. No obstante, el motor seleccionado para formar parte del proceso tiene una eficiencia energética global del 85.2%.

Otro indicador que resulta de vital importancia analizar en biorefinerías es el índice de intensidad másica del proceso (IMP). Este indicador relaciona la cantidad de materias primas empleadas para obtener un kilogramo de producto(s). Así, un valor ideal del IMP es 1 y entre mayor sea su valor menos viable será el proceso dado que se requiere mucho para producir poco. Aunque la biorefinería planteada se perfila como un proceso de baja escala, se ha establecido un marco común que indica que para procesos de generación de productos a granel (como es el caso del aceite de aguacate y alimento animal) los IMP varía entre 1 a 6. En el caso de la biorefinería planteada se tiene un IMP de 1,60 si se considera el digestato como un posible producto del proceso. Si este no fuese el caso, el IMP se incrementa a un valor de 49,9 kg/kg. Un análisis detallado de este indicador nos permite observar que el inóculo empleado en el proceso de digestión anaerobia tiene una contribución mayor al 75% del total de las materias primas empleadas en el proceso. Por tanto, una disminución de esta entrada al proceso podría incrementar su viabilidad técnica sin necesidad de considerar el digestato como producto comercializable.

El análisis energético del proceso se realiza en base a los consumos de las líneas de producción de aceite de aguacate, alimento animal y biogás. El consumo energético de estas tres líneas de producción fue de 172246, 166140, y 218400 kWh/año. Estos consumos energéticos fueron calculados considerando que la biorefinería opera 8 horas al día y 350 días al año. Por tanto, los requerimientos energéticos de los equipos en las líneas de producción fueron de 60.65, 58.5 y 78 kW. En este sentido, el consumo de energía eléctrica global de la biorefinería fue de 556786 kWh/año. No obstante, el biogás al ser un vector energético puede ser empleado como medio de autogeneración. La cantidad de energía eléctrica que es posible derivar de la combustión del biogás es de 145063 kWh/año. Por tanto, el biogás generado de la digestión anaerobia de la semilla y cáscara del aguacate puede llegar a cubrir un 26,1% de las necesidades energéticas de la biorefinería. Lo anterior genera una disminución en los costos de energía de la biorefinería. Además, a partir de los gases de combustión librados por el motor de combustión interna es posible recuperar alrededor de 173636 kWh/año de energía térmica que puede ser empleada para el calentamiento de agua en el proceso de desinfección y lavado de los frutos de aguacate a la entrada del proceso. Así, la biorefinería propuesta parece ser una buena alternativa para su implementación en el contexto colombiano desde el punto de vista técnico.



Discusión del análisis económico de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de naranja (CN)

Biorefinería de menor complejidad

El caso base estudiado (es decir, considerando un caudal másico de 140 kg / h) fue inviable en las condiciones económicas evaluadas. La producción de aceite esencial y biogás no es factible a esta escala. Por tanto, es conveniente estudiar otras alternativas para valorizar el proceso. En este caso, se evalúa el incremento del caudal. Como se puede ver en la Figura 13, la inversión de capital inicial para iniciar el proyecto no se alcanza durante la vida útil especificada del proyecto (es decir, 10 años). Por este motivo, se realizó un análisis de escalas para encontrar las diferentes escalas para hacer factible la biorefinería de CN. Una vez realizado este proceso, se encontró la mínima escala de procesamiento de la biorefinería. El valor de este punto para tener un beneficio cero con un flujo de 82,65 toneladas diarias de CN. Por lo tanto, esta es la escala mínima a considerar si se construirá una biorefinería de CN.

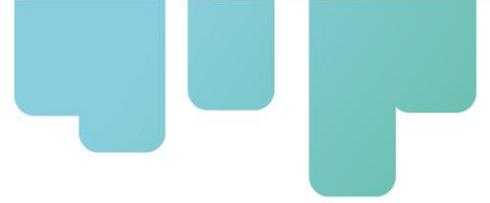
La escala mínima de procesamiento obtenida en este trabajo es menor que informado por Serna et al. (Siles et al., 2016) (es decir, 880 toneladas por día). Sin embargo, esta diferencia se puede atribuir a la materia prima utilizada en la biorefinería propuesta por estos autores, así como a los productos obtenidos. Las escalas superiores a 82,65 toneladas por día darán un beneficio neto positivo en menos tiempo (ver la Figura 13).

En la zona oeste de Colombia se produce el 29% de la producción total de la naranja. Aproximadamente el 50% de esta corona se usa para producir jugo de naranja (17,26 millones de toneladas de CN por día). La escala mínima de procesamiento obtenido en esta configuración corresponde a 1,75 del CN producido en la zona oeste.

El período de recuperación tiene una tendencia exponencial decreciente. Por lo tanto, las escalas de procesamiento más altas se reducirán en una proporción menor del período de recuperación del proyecto. Como resultado, se podrían considerar escalas económicamente viables, pero no razonables. No obstante, la precisión de las escalas estimadas, así como los beneficios netos de la biorefinería pueden variar del 30% al 50% debido a las estimaciones realizadas por el Aspen Process Economic Analyzer (APEA) es una estimación de Clase 5 (Cardona Alzate et al., 2018; Ghanta et al., 2013a, 2013b). A partir del análisis económico, se pueden identificar dos regiones. Finalmente, las escalas propuestas en este trabajo para la biorefinería de CN pueden variar considerando la paleta de productos propuesta, así como la inclusión de otros aspectos económicos como costos externos, cargos de contingencia y costos de ingeniería para mejorar la calidad de la evaluación de una Clase. 5 a clase 4.

Biorefinería de mayor complejidad

Los resultados presentados en la Figura 14 muestran que la etapa más costosa en la biorefinería



de cáscara de naranja fue la producción de ácido levulínico, debido a que en este proceso se tienen en consideración la compra de reactores de alta presión y columnas de destilación. Por otro lado, la producción de biogás es el segundo proceso que más abarca el costo de los equipos en toda la biorefinería. Lo anterior se debe a que en la producción de biogás el proceso considera un volumen de reactor muy grande y todas las etapas asociadas a la purificación del biogás en términos del H_2S , NH_3 y otros compuestos no deseados (Cozma et al., 2015). Las etapas de extracción, no representan más del 40% de los costos asociados a costos de equipos en la biorefinería debido a que los equipos que se plantean son de media complejidad tecnológica.

Otro de los análisis envuelto en la biorefinería es la distribución de costos, los cuales, son presentados en forma de diagrama de pastel en la Figura 28.

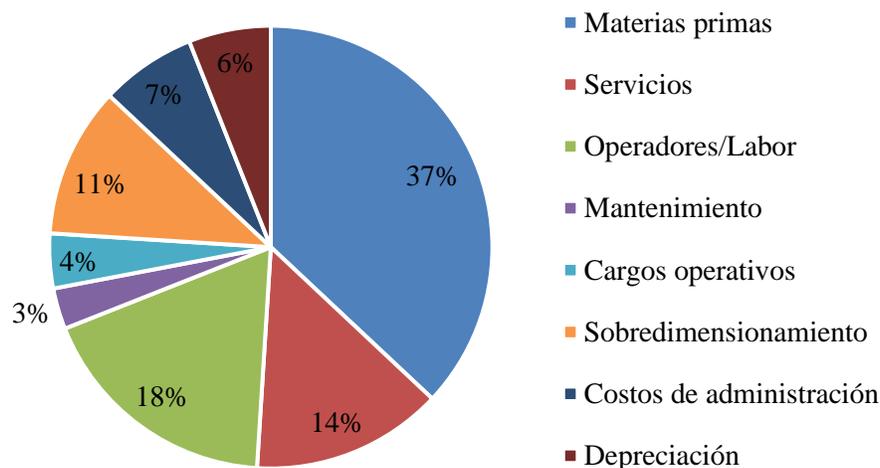
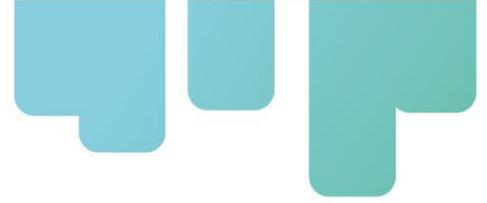


Figura 28. Distribución porcentual de los costos asociados en la biorefinería.

Tal y como se presenta en la Figura 28, los resultados muestran que la cáscara de naranja, es uno de los costos más relevantes dentro de todo el proceso, siendo aproximadamente el 37% del total. Por otro lado, los costos relacionados con los servicios, operación y mantenimiento y el sobrediseño de la planta son los costos más relevantes dentro de la planta. La distribución presentada para esta biorefinería tiene cierto grado de disparidad con otras biorefinerías publicadas para residuos lignocelulósicos tales como la zoca de café y el bagazo de caña (Aristizábal M. et al., 2015; Moncada et al., 2014b). Esto se debe a que la cantidad de equipos empleados en estas biorefinerías es muy alta en comparación a los equipos considerados en el presente trabajo, lo cual hace que los costos asociados en la depreciación de capital sean mucho más grandes en las biorefinerías publicadas. Así pues, la distribución de costos permite dilucidar que los costos mas grandes son aquellos asociados a todos los insumos requeridos para la transfocación de la materia prima en los productos deseados (Moncada B. et al., 2016).



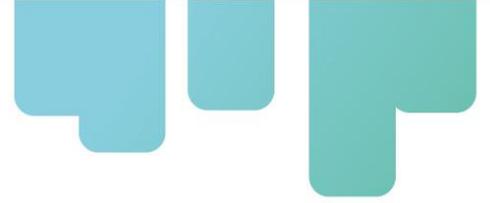
Otro aspecto que es de igual importancia en los análisis anteriores está relacionado con la realización de un análisis de sensibilidad de escala, el cual, se emplea para ver la escala mínima de procesamiento.

Esta escala es definida como la escala en la cual se recupera toda la inversión inicial realizada en el proyecto durante el periodo de vida del mismo. También, el análisis de escala se realiza para evaluar como varía el VPN y el período retorno de la inversión, los cuales son una función de los flujos de caja calculados a partir de las ganancias anuales que la venta de los productos genera a la biorefinería.

A partir del análisis de sensibilidad de escala es posible observar que la biorefinería propuesta tiene un alto potencial para ser implementada en el contexto colombiano, sin tener en consideración otro tipo de datos económicos tales como el IPCC, el impuesto de importación de equipos, entre otros. Así pues, es posible observar que el periodo de retorno de la inversión está localizado entre los 1 y 2 años de vida del proyecto. Lo anterior se atribuye al precio de los productos considerados en la biorefinería, los cuales son relativamente altos. Finalmente, la escala mínima de procesamiento del proyecto no es posible mostrarla en la anterior gráfica, sin embargo, aquella escala que cumple la condición $VPN = 0$ en 10 años es de aproximadamente 400 kg/h.

Discusión del análisis económico de las biorefinerías para el aprovechamiento de residuos de cáscara de maracuyá (CM)

En relación al análisis económico del proceso, se analizó el costo total de la inversión de las líneas de producción de pectina y biogás. Los valores obtenidos fueron 450000 y 360000 dólares, respectivamente. También en los costos totales del proceso se incluye una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes tanto del proceso de extracción de pectina como de la producción de biogás. Esta planta de tratamiento de aguas residuales tiene un costo aproximado de 399510 dólares. En este sentido, la inversión total de capital está estipulada en 1,21 millones de dólares. La diferencia de precio respecto a la biorefinería de aguacate planteada está en que el proceso de producción de pectina requiere muchos más equipos que el proceso de producción de aceite de aguacate y alimento animal. Por otro lado, el alto valor de la planta de producción de biogás se ve justificado al incremento en el flujo de entrada de cáscara agotada proveniente del proceso de extracción de pectina. Respecto a la distribución de costos, las materias primas es el elemento que más participación tiene en la distribución de costos totales (65%). No obstante, otro aspecto como la depreciación de capital tienen un porcentaje relativamente alto (10%). Por último, la variación del VPN con la escala de procesamiento se presenta para dar cuenta de la viabilidad económica del proyecto a diferentes escalas de procesamiento. En el caso de 1 ton/h se tiene que el proceso no es viable económicamente. Así pues, se hace necesario incrementar la escala del proceso. A partir de esto se encuentra que la mínima escala de procesamiento para viabilidad económica es de 2.3 ton/h. Finalmente, se estima el valor de la ganancia neta a una



escala de 3.0 ton/h en 1.3 millones de dólares. A partir de los resultados del análisis económico, es posible observar que el proceso de valorización de cáscara de maracuyá es complejo desde este punto de vista dado que se requieren unos volúmenes de producción de residuo demasiado altos.

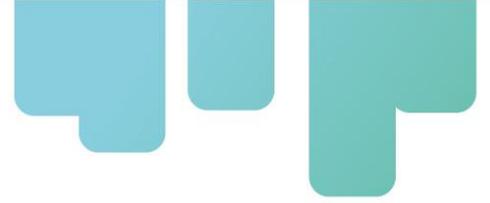
Discusión del análisis económico de las biorefinerías para el aprovechamiento de aguacates de rechazo (AR)

El análisis económico del proceso se realizó en base a tres factores: Costos de capital por línea de producción, Distribución de costos en la biorefinería y Variación del VPN en función de la escala. Los costos de capital por línea de producción para la obtención de aceite de aguacate, alimento animal y biogás fueron de 200000, 150000 y 120000 dólares, respectivamente. Por tanto, la línea de producción más costosa es la producción de aceite de aguacate, lo cual puede ser explicado a la presencia de equipos especializados tales como el malaxer, la centrifuga decantador y la centrifuga de discos. En cuanto a la distribución de costos, El costo de las materias primas juega un papel fundamental dentro del proceso aportando un 81% de total de los costos operativos de la planta. El costo de compra de aguacate para la planta fue considerado en 0,14 USD/kg, el cual es el precio que los agricultores cobran por el aguacate generado a los centros de acopio en muchos de los municipios del territorio colombiano. Por otro lado, el inóculo (i.e., lodo anaerobio) no posee un alto valor unitario. Sin embargo, la cantidad a transportar es tan considerable que tiene una gran participación dentro del porcentaje de costos de las materias primas. Finalmente, la biorefinería fue diseñada para el procesamiento de 1 tonelada/hora de aguacate. A esta escala de procesamiento se observa que la biorefinería es viable desde el punto de vista económico con una recuperación de la inversión en aproximadamente 7 años. Las ganancias netas del proyecto al final de la vida útil de la planta son de 160000 dólares. A partir de esta información es posible intuir que a mayor escala mayor ganancias (dado el concepto de economía de escala). En este sentido, incrementar el volumen de procesamiento a 1,5 toneladas/h puede generar una ganancia neta de 830000 dólares y un periodo de retorno de la inversión de 3.4 años. Finalmente, la mínima escala de procesamiento requerida para alcanzar viabilidad económica es de 0.87 toneladas/h.

Discusión del análisis ambiental

Discusión del análisis ambiental para la biorefinería de CN de menor complejidad

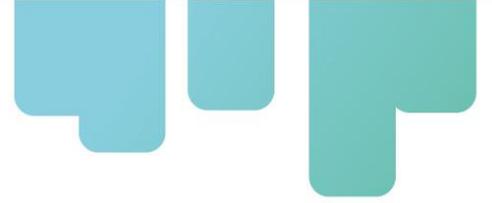
La contribución relativa del E-LCA para el cultivo de naranja (caso base) se muestra en la Figura 24. Las categorías que presentaron el mayor impacto fueron cambio climático (CC), toxicidad humana (HT), ecotoxicidad de agua dulce (FWEc), ecotoxicidad marina (ME), radiación ionizante (IR), ocupación de tierras agrícolas (ULO), agotamiento de agua (WD), agotamiento de metales (MD) y agotamiento de fósiles (FD). Se agruparon los impactos de agroquímicos (fertilizantes, herbicidas e insecticidas), transporte, diesel consumido y recursos naturales utilizados durante el



cultivo. La Tabla 21 presenta los resultados numéricos de las categorías evaluadas para el caso base. De esto se desprende que la adición de agroquímicos al cultivo fue lo que generó mayor impacto. Las categorías que más impactan en la aplicación de agroquímicos fueron FWec, ME, ALO, HT, ULO y MD. La aplicación de fertilizantes nitrogenados y azufrados genera NO_3 , PO_4^{-3} contaminando las aguas subterráneas. Además, la escorrentía de fósforo y la lixiviación de la tierra también impactan FWec y ME. Estas categorías están relacionadas principalmente con adiciones de pesticidas y emisiones de clorpirifos. En la categoría ALO, el uso de agroquímicos en el cultivo de la naranja fue el más alto. La razón es la explotación de los recursos naturales y los usos del suelo. Estos son necesarios para la producción de agroquímicos reflejados en ULO. Las emisiones de cromo, zinc y cobre que se generan en la aplicación de campo de fertilizantes P_2O_5 contribuyen a la importante contribución que esto tiene en HT y MD. Los fertilizantes nitrogenados son los más consumidos en el cultivo de la naranja. Por tanto, las emisiones de N_2O generadas por la aplicación de estos fertilizantes son las que más contribuyen a la CC. Por otro lado, la producción de ácido nítrico (utilizado para la producción de este tipo de fertilizante) contribuye al CC con emisiones de CO_2 .

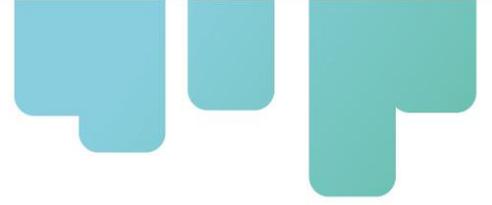
El uso de diesel fue el segundo grupo con el impacto más significativo en el cultivo de naranja. El diesel se usa en el sistema de aspersión, desbrozadora, motosierra y tractor. Esta maquinaria se utiliza en la preparación del terreno, la siembra y el crecimiento vegetativo. En Colombia, la fruta se recolecta generalmente de forma manual. Por este motivo, no se tuvo en cuenta el consumo de diésel a la hora de recolectar el cultivo. Las categorías que más impactan en el consumo de diesel fueron IR, FD y CC. Las categorías IR y FD tienen el mayor peso para el consumo de biodiesel debido a los impactos que genera su producción. Por otro lado, las emisiones de CO_2 y CO que se producen principalmente en el uso de biodiesel se vieron reflejadas en CC. El uso de recursos naturales y transporte en el cultivo de la naranja fue bajo. En cuanto al uso de los recursos naturales, la categoría WD fue la que tiene más peso. Por último se debe al riego que se debe hacer al cultivo.

La Tabla 22 presenta los resultados numéricos de los escenarios evaluados. Como se puede observar, el escenario con mayor impacto ambiental fue 2. El escenario 2 incluye las etapas del cultivo de la naranja, la producción industrial del jugo y la disposición de CN en un relleno sanitario. El siguiente escenario con mayor impacto ambiental fue el 1. Se toma en cuenta la etapa de cultivo de la naranja y la producción industrial de jugo. Finalmente, el escenario 3 que incluye el escenario 1, más el uso de CN en el contexto de la biorefinería, es el de menor impacto ambiental. A partir de esto, es posible concluir que en términos ambientales, la explotación de una industria productora de jugos es viable. Además, la cartera de productos aumenta para que aumenten las ganancias. Sin embargo, es necesaria una evaluación económica de esta alternativa.



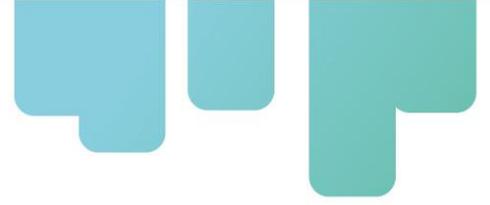
La implementación de esta nueva etapa apoya el desarrollo de la bioeconomía. Así, se consideran los objetivos de desarrollo sostenible definidos en la Agenda 2030.

En cuanto a los escenarios de producción de CN con y sin relleno sanitario, la etapa de producción de jugo de naranja tiene el menor impacto ambiental de toda la cadena productiva ya que la descomposición de CN en un relleno sanitario produce grandes cantidades de gases y lixiviados. Además, más del 50% del impacto ambiental se atribuye a la etapa agronómica. Por tanto, la huella medioambiental del proceso de producción de zumo de naranja es baja. Este resultado se puede explicar debido al consumo relativamente bajo de energía y materiales en el proceso de producción de jugo de naranja. Este proceso tiene un mejor comportamiento medioambiental que otros procesos alimentarios en los que intervienen diferentes aditivos y colorantes. La disposición de CN en vertederos es la peor opción desde el punto de vista ambiental (ver Figura 2). Sin embargo, esta opción ha sido implementada tradicionalmente por los productores de jugo de naranja ya que las ganancias del proceso permiten implementar esta opción, y el desempeño ambiental del proceso no ha sido un problema hasta ahora. A partir de los resultados obtenidos en este estudio y otros hallazgos similares reportados en la literatura abierta, los productores de jugo de naranja deben considerar otras alternativas para eliminar o valorizar el CN. Por ejemplo, Negro et al., (Negro et al., 2017) han informado de otras alternativas de disposición (por ejemplo, compostaje y alimentación animal) como mejores opciones. Por otra parte, Ortiz D.L (Ortiz et al., 2020) estudió el desempeño energético del uso de CN como fuente de energía en calderas. Estas opciones pueden considerarse como las opciones más cercanas en el futuro, ya que la implementación completa de una configuración de biorefinería, o la mejora independiente requiere (por ejemplo, extracción de aceite esencial), en la mayoría de los casos, requiere grandes inversiones de capital, que la decisión- los fabricantes no están dispuestos a aceptar. Finalmente, otro motivo para dejar de lado la opción del vertedero está relacionado con que esta opción tiene varios inconvenientes económicos, que hacen insostenible esta alternativa de disposición. Por lo tanto, hacia mejores prácticas de manejo de CN, debería realizarse un estudio integral de los diferentes procesos disponibles para eliminar estos residuos. Por otro lado, la comparación del proceso de generación de CN y la generación y valorización de CN a través del concepto de biorefinería. Existe una reducción significativa del impacto ambiental de acuerdo con todas las categorías de impacto presentadas en la Figura 25. Este hecho se puede atribuir a la baja cantidad de emisiones de sólidos, líquidos y gaseosos. Además, la consideración del digestato de CN como fertilizante para ser utilizado en el cultivo de naranja permite reducir el uso de agroquímicos. Así, una forma de incrementar la sustentabilidad de los procesos alimentarios puede ser la implementación de procesos capaces de generar insumos más amigables con el ambiente a otras etapas de la cadena productiva. Si el interés por valorizar los residuos de CN se centra únicamente en aumentar el rendimiento económico del proceso, el impacto ambiental puede aumentar. Este enunciado puede servir de pauta para proponer la valorización integral de los residuos agroindustriales.



Biorefinería de mayor complejidad

Los resultados mostrados en la Figura 26 muestran que la biorefinería propuesta tiene un alto porcentaje de sostenibilidad en términos de producción de corrientes con un alto potencial de acidificación de la tierra. Lo cual, se atribuye al bajo uso de productos ácidos en la biorefinería tales como ácidos fuertes, como es el caso del ácido sulfúrico. Este potencial también se debe a que en el proceso de producción de ácido levulínico se emplea un catalizador ácido heterogéneo, el cual, es fácilmente recuperable y reutilizable. Por otro lado, en términos de producción de corrientes de desecho líquidas y sólidas, el porcentaje de sostenibilidad está cerca del 50%, lo cual implica que se debe mejorar el proceso en términos de reducción de residuos. Otro aspecto que también es importante analizar son las emisiones gaseosas y su potencial de calentamiento global, el cual tiene un valor de 0,96 kg de CO₂/kg productos generados. Este resultado indica que se están generando emisiones durante el procesamiento de la cáscara de naranja. Los anteriores resultados son comparables con aquellos obtenidos para otras biorefinerías (Fermeglia et al., 2007; Rincón et al., 2014).



Conclusiones

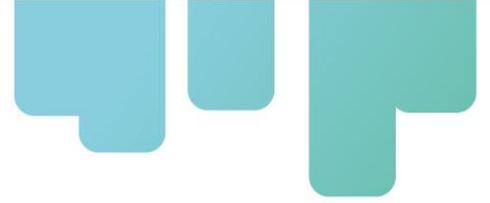
La evaluación técnica energética y económica de las biorefinerías analizadas a partir de residuos obtenidos durante la cosecha, postcosecha y procesamiento industrial (residuos de cáscara de naranja, residuos de cáscara de maracuyá y aguacate de rechazo) demostró el potencial de estas materias primas a ser aprovechadas para la producción de productos de interés comercial como lo son el aceite esencial ampliamente utilizado en la industria farmacéutica y de alimentos, pectina cítrica y de maracuyá y un vector energético que presenta gran acogida a nivel industrial para potencializar los procesos agroindustriales y cerrar el ciclo de vida del fruto.

En el presente informe se toma la CN como un residuo representativo y demostrativo de las frutas estudiadas, para realizar la evaluación completa de una biorefinería que incluye no solamente un estudio técnico detallado a la medida para una región en Colombia, sino también el estudio de los pilares económicos y ambientales que forman parte de la sostenibilidad para garantizar un buen desempeño del proceso.

Los resultados experimentales fueron relevantes en términos de contenido de sustancias de alto valor agregado y su potencial fue estudiado al detalle a través de diferentes extracciones y conversiones. Todo lo anterior con un estudio minucioso de 2 tipos de biorefinería integrada demostraron la prefactibilidad técnica, energética, económica y ambiental de un sistema productivo para procesar más de 450 kg hora de cáscara de naranja hacia productos de valor agregado. Lo anterior es un hito para la región que puede extrapolarse a otros países en términos metodológicos para valorizar y hacer más eficiente la cadena de los cítricos en Colombia, Ecuador y Perú.

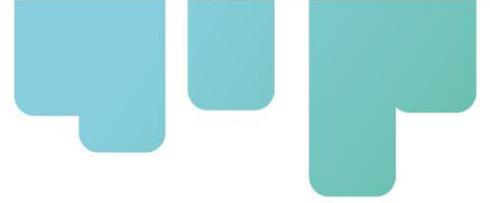
La propuesta de biorefinerías de mayor complejidad permiten ampliar el panorama de aprovechamiento de las materias primas analizadas considerando productos de mayor valor agregado que ayuden a la factibilidad de las biorefinerías propuestas. Para el caso de las biorefinerías de cáscara de naranja y maracuyá se pudo observar esta tendencia, lo cual permite también contemplar procesos con flujos de alimentación más cercanos a los obtenidos en regiones colombianas.

El análisis ambiental demostró que el concepto de biorefinería presenta menor impacto ambiental en términos de huella de carbono (kg de CO₂ equivalentes) que la disposición del residuo en un relleno sanitario.

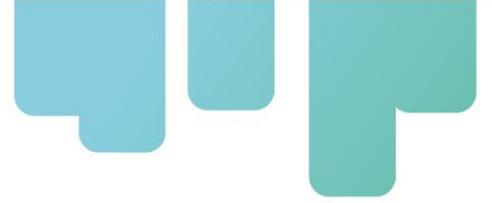


Referencias Bibliográficas

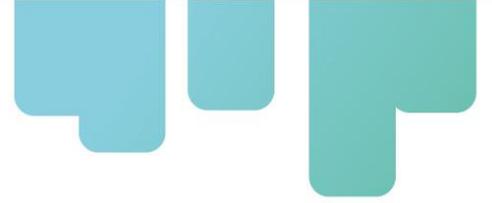
- Acetic Acid Glacial- Chembid [WWW Document], 2020.
- Albrecht, F.G., König, D.H., Baucks, N., Dietrich, R.U., 2017. A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study. *Fuel* 194, 511–526. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.003>
- Alvarez, J., Hooshdaran, B., Cortazar, M., Amutio, M., Lopez, G., Freire, F.B., Haghshenasfard, M., Hossein, S., Olazar, M., 2018. Valorization of citrus wastes by fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel* 224, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.028>
- Ammonia - Chembid [WWW Document], 2020.
- Anonymus, 1922. Commercial production of mucic acid. *Chem. Metall. Eng.* 26, 1118.
- Aristizábal-Marulanda, V., Cardona Alzate, C.A., Martín, M., 2019. An integral methodological approach for biorefineries design: Study case of Colombian coffee cut-stems. *Comput. Chem. Eng.* 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.038>
- Aristizábal M., V., Gómez P., Á., Cardona A., C.A., 2015. Biorefineries based on coffee cut-stems and sugarcane bagasse: Furan-based compounds and alkanes as interesting products. *Bioresour. Technol.* 196, 480–489. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.057>
- Atnaw, S.M., Sulaiman, S.A., Yusup, S., 2014. Influence of fuel moisture content and reactor temperature on the calorific value of Syngas resulted from gasification of oil palm fronds. *Sci. World J.* Article ID, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/121908>
- Bagde, P.P., Dhenge, S., Bhivgade, S., 2017. Extraction of Pectin from Orange Peel and Lemon Peel. *Int. J. Eng. Technol. Sci. Res.* 4, 1–7. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0609142>
- Boundy, B., Davis, S.C., Wright, L., Badger, P.C., Perlack, B., 2010. Biomass Energy Data book, Office of the Biomass Program Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. <https://doi.org/10.5860/choice.43sup-0518>
- Budzinski, K., Blewis, M., Dahlin, P., D'Aquila, D., Esparza, J., Gavin, J., Ho, S. V., Hutchens, C., Kahn, D., Koenig, S.G., Kottmeier, R., Millard, J., Snyder, M., Stanard, B., Sun, L., 2019. Introduction of a process mass intensity metric for biologics. *N. Biotechnol.* 49, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.07.005>
- Bustamante, J., Stempvoort, S. Van, García-gallarreta, M., Houghton, J.A., Briers, H.K., Budarin, V.L., Matharu, A.S., Clark, J.H., 2016. Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste. *J. Clean. Prod.* 137, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.108>
- Calabrò, P.S., Panzera, M.F., 2017. Anaerobic digestion of ensiled orange peel waste: preliminary batch results. *Therm. Sci. Eng. Prog.* <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.12.011>
- Cardona-Alzate, C.A., Parra-Ramírez, D., Serna-Loaiza, S., 2017. Perspectives of energy production from microalgae: The biodiesel and cogeneration cases, in: Magalhaes-Pires, J.-C. (Ed.), *Recent Advances in Renewable Energy. Microalgae as a Source of Bioenergy: Products, Processes and Economics*. Bentham Science Publishers, pp. 1–436.



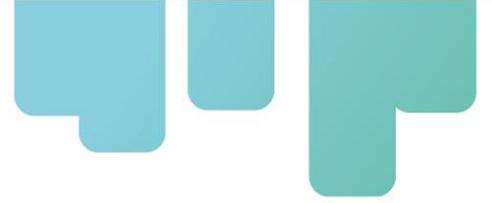
- Cardona Alzate, C.A., Solarte Toro, J.C., Peña, Á.G., 2018. Fermentation, thermochemical and catalytic processes in the transformation of biomass through efficient biorefineries. *Catal. Today* 302, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.09.034>
- Carmona-Garcia, E., Ortiz-Sánchez, M., Cardona Alzate, C.A., 2019. Analysis of the Coffee Cut Stems as Raw Material for the Production of Sugars for Acetone–Butanol–Ethanol (ABE) Fermentation: Techno-Economic Analysis. *Waste and Biomass Valorization* 10, 3793–3808. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00632-x>
- Carvajal, J.C., Gómez, Á., Cardona, C.A., 2016. Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. *Bioresour. Technol.* 214, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.103>
- Cerón Salazar, I.X., 2013. Design and Evaluation of Proceses to Obtain Antioxidant-Rich Extracts from tropical fruits cultivated in Amazon, Caldas and Northern Tolima Regions. Universidad Nacional de Colombia.
- Chang, C., Cen, P., Ma, X., 2007. Levulinic acid production from wheat straw. *Bioresour. Technol.* 98, 1448–1453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.031>
- Cherubini, F., Jungmeier, G., 2010. LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15, 53–66. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0124-2>
- Chidikofan, G., Benoist, A., Sawadogo, M., Volle, G., Valette, J., Coulibaly, Y., Pailhes, J., Pinta, F., 2017. Assessment of Environmental Impacts of Tar Releases from a Biomass Gasifier Power Plant for Decentralized Electricity Generation. *Energy Procedia* 118, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.034>
- Ciriminna, R., Pagliaro, M., Marina, A., Fidalgo, A., 2016. Pectin Production and Global Market. Citric Acid Anhydrous [WWW Document], 2020.
- Córdoba, K., Tavares, T., Guolo, C., Sossela, G., 2005. Características físico-químicas da casca do maracujá. *CEPPA* 23, 221–230. <https://doi.org/10.5380/cep.v23i2.4491>
- Costagli, G., Betti, M., 2015. Avocado oil extraction processes: Method for cold-pressed high-quality edible oil production versus traditional production. *J. Agric. Eng.* 46, 115–122. <https://doi.org/10.4081/jae.2015.467>
- Cozma, P., Wukovits, W., Mămăligă, I., Friedl, A., Gavrilesco, M., 2015. Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. *Clean Technol. Environ. Policy* 17, 373–391. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0787-7>
- Dávila, J.A., Hernández, V., Castro, E., Cardona, C.A., 2014. Economic and environmental assessment of syrup production. Colombian case. *Bioresour. Technol.* 161, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.131>
- Dávila, J.A., Rosenberg, M., Castro, E., Cardona, C.A., 2017. A model biorefinery for avocado (*Persea americana* mill.) processing. *Bioresour. Technol.* 243, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.063>
- Deublein, D., Steinhauser, A., 2010. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Wiley.
- Diekmann, W., Jime, D., Lamuela-ravento, R., Plescher, A., Gartzl, I., Buxaderas, S., Codina, C.,



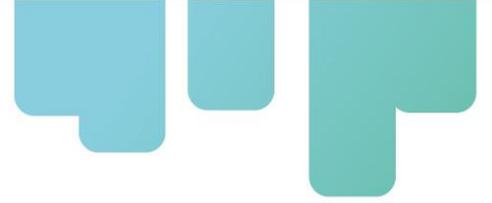
2006. An industrial approach in the search of natural antioxidants from vegetable and fruit wastes. *Food Chem.* 97, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.03.033>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., Duarte, M., 2010. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia 2010. Unidad de Planeación Minero Energética de la República de Colombia (UPME).
- Fermeglia, M., Longo, G., Toma, L., 2007. A Hierarchical Approach for the Estimation of Environmental Impact of a Chemical Process : from Molecular Modeling to Process Simulation 1199–1204.
- García-Velásquez, C.A., Cardona, C.A., 2019. Comparison of the biochemical and thermochemical routes for bioenergy production: A techno-economic (TEA), energetic and environmental assessment. *Energy* 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.073>
- García, C.A., Morales, M., Quintero, J., Aroca, G., Cardona, C.A., 2017a. Environmental assessment of hydrogen production based on *Pinus patula* plantations in Colombia. *Energy* 139, 606–616. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.012>
- García, C.A., Peña, Á., Betancourt, R., Cardona, C.A., 2017b. Energetic and environmental assessment of thermochemical and biochemical ways for producing energy from agricultural solid residues: Coffee Cut-Stems case. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.029>
- Ghanta, M., Fahey, D.R., Busch, D.H., Subramaniam, B., Ullmans - Propylene Oxide, 2013a. Comparative Economic and Environmental Assessments of H₂O₂-based and Tertiary Butyl Hydroperoxide-based Propylene Oxide Technologies. *Rep. Carcinog.* 12, 268–277. <https://doi.org/10.1021/sc300121j>
- Ghanta, M., Ruddy, T., Fahey, D., Busch, D., Subramaniam, B., 2013b. Is the Liquid-Phase H₂O₂-Based Ethylene Oxide Process More Economical and Greener Than the Gas-Phase O₂-Based Silver-Catalyzed Process ? *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 18–29.
- Golmohammadi, M., Borghei, A., Zenouzi, A., 2018. Optimization of essential oil extraction from orange peels using steam explosion. *Heliyon* 4, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00893>
- Guangul, F.M., Sulaiman, S.A., Ramli, A., 2014. Study of the effects of operating factors on the resulting producer gas of oil palm fronds gasification with a single throat downdraft gasifier. *Renew. Energy* 72, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.022>
- Guo, X., Han, D., Xi, H., Rao, L., Liao, X., 2012. Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure , microwave or traditional heating : A comparison. *Carbohydr. Polym.* 88, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.12.026>
- Gutiérrez, L.F., Sánchez, Ó.J., Cardona, C.A., 2009. Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol obtained from lignocellulosic residues of oil palm industry. *Bioresour. Technol.* 100, 1227–1237. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.09.001>
- Hosseini, S.S., Khodaiyan, F., Kazemi, M., Najari, Z., 2019. Optimization and characterization of pectin extracted from sour orange peel by ultrasound assisted method. *Int. J. Biol. Macromol.* 125, 621–629. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.096>



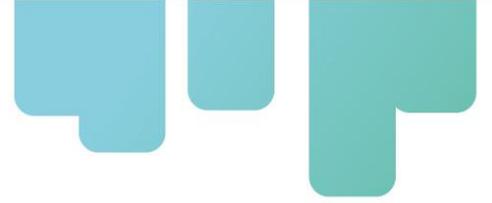
- IChemE, 2002. The Sustainability Metrics: Sustainable development progress metrics recommended for use in process industries.
- Indiamart, 2019. Mucic Acid - Galactaric Acid Latest Precio, Manufacturers & Suppliers [WWW Document]. Web page. URL <https://dir.indiamart.com/impcat/mucic-acid.html> (accessed 8.26.19).
- Inorganic Chemicals Precios | Intratec.us [WWW Document], n.d. URL <https://www.intratec.us/user/products/commodities-Precios/inorganic-chemicals-Precios> (accessed 2.5.20).
- International Renewable Energy Agency, 2017. Biogas Cost Reductions to Boost Sustainable Transport [WWW Document]. IRE. URL <https://www.irena.org/newsroom/articles/2017/Mar/Biogas-Cost-Reductions-to-Boost-Sustainable-Transport>
- Joglekar, S.N., Pathak, P.D., Mandavgane, S.A., Kulkarni, B.D., 2019. Process of fruit peel waste biorefinery: a case study of citrus waste biorefinery, its environmental impacts and recommendations. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04196-0>
- Kulkarni, S.G., Vijayanand, P., 2010. Effect of extraction conditions on the quality characteristics of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa L.*). *LWT - Food Sci. Technol.* 43, 1026–1031. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.11.006>
- Kumar, A., Samadder, S.R., 2017. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Manag.* 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Kuo, C.H., Huang, C.Y., Shieh, C.J., Wang, H.M.D., Tseng, C.Y., 2017. Hydrolysis of Orange Peel with Cellulase and Pectinase to Produce Bacterial Cellulose using *Gluconacetobacter xylinus*. *Waste and Biomass Valorization* 0, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0034-7>
- Kusuma, H., Putra, A., Mahfud, M., 2016. Comparison of Two Isolation Methods for Essential Oils from Orange Peel (*Citrus auranticum L*) as a Growth Promoter for Fish: Microwave Steam Distillation and Conventional Steam Distillation. *J. Aquac. Res. Dev.* 7, 1–5. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000409>
- Lewkowski, J., 2005. Synthesis, chemistry and applications of 5-hydroxymethyl-furfural and its derivatives. *Arkivoc* 2001, 17. <https://doi.org/10.3998/ark.5550190.0002.102>
- Lieder, M., Rashid, A., 2016. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *J. Clean. Prod.* 115, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J., 2010. Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresour. Technol.* 101, 7382–7388. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078>
- Mandegari, M.A., Farzad, S., Görgens, J.F., 2017. Recent trends on techno-economic assessment (TEA) of sugarcane biorefineries. *Biofuel Res. J.* 4, 704–712. <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.3.7>
- Marín, F.R., Soler-Rivas, C., Benavente-García, O., Castillo, J., Pérez-Alvarez, J.A., 2007. By-



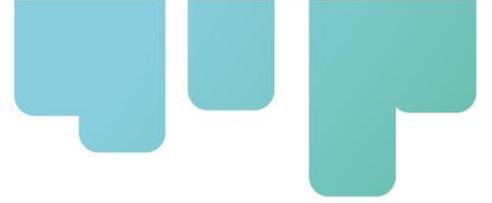
- products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chem.* 100, 736–741. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.040>
- Martínez Sabajanes, M., Yáñez, R., Alonso, J.L., Parajó, J.C., 2012. Pectic oligosaccharides production from orange peel waste by enzymatic hydrolysis. *Int. J. Food Sci. Technol.* 47, 747–754. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02903.x>
- Mehtiö, T., Toivari, M., Wiebe, M.G., Harlin, A., Penttilä, M., Koivula, A., 2016. Production and applications of carbohydrate-derived sugar acids as generic biobased chemicals. *Crit. Rev. Biotechnol.* <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1060189>
- Methanol - chembid [WWW Document], 2020.
- Mira, B., Blasco, M., Berna, A., Subirats, S., 1999. Supercritical CO₂ extraction of essential oil from orange peel: Effect of operation conditions on the extract composition. *J. Supercrit. Fluids* 14, 95–104.
- Moncada B., J., Aristizábal M., V., Cardona A., C.A., 2016. Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochem. Eng. J.* 116, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>
- Moncada B., J., Aristizábal M., V., Cardona A., C.A., 2016. Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochem. Eng. J.* 116, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>
- Moncada, J., Cardona, C.A., Rincón, L.E., 2015a. Design and analysis of a second and third generation biorefinery: The case of castorbean and microalgae. *Bioresour. Technol.* 198, 836–843. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.077>
- Moncada, J., Hernández, V., Chacón, Y., Betancourt, R., Cardona, C.A., 2015b. Citrus Based Biorefineries, in: Simmons, D. (Ed.), *Citrus Fruits. Production, Consumption and Health Benefits*. Nova Publishers, pp. 1–26.
- Moncada, J., Matallana, L.G., Cardona, C.A., 2013. Selection of process pathways for biorefinery design using optimization tools: A colombian case for conversion of sugarcane bagasse to ethanol, poly-3-hydroxybutyrate (PHB), and energy. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 4132–4145. <https://doi.org/10.1021/ie3019214>
- Moncada, J., Tamayo, J., Cardona, C.A., 2014a. Evolution from biofuels to integrated biorefineries: Techno-economic and environmental assessment of oil palm in Colombia. *J. Clean. Prod.* 81, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.021>
- Moncada, J., Tamayo, J.A., Cardona, C.A., 2014b. Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. *Chem. Eng. Sci.* 118, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.07.035>
- Moncada, J., Tamayo, J.A., Cardona, C.A., 2014c. Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. *Chem. Eng. Sci.* 118, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.07.035>
- Murat, D., Duren, I. Van, Mes, M., Kersten, S., Clancy, J., 2016. Biomass and Bioenergy Design of sustainable second-generation biomass supply chains. *Biomass and Bioenergy* 94, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.004>
- Mussatto, S.I., Moncada, J., Roberto, I.C., Cardona, C.A., 2013. Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: The Brazilian case. *Bioresour. Technol.* 148, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.046>



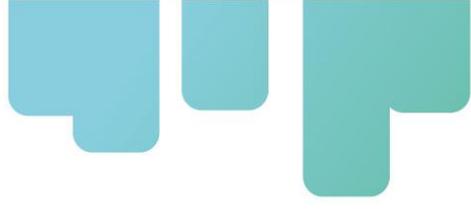
- Nayak, A., Bhushan, B., 2019. An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *J. Environ. Manage.* 233, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Negro, V., Ruggeri, B., Fino, D., Tonini, D., 2017. Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014>
- Ortiz-Sánchez, M., 2019. Evaluation of different biorefinery configurations for orange peel waste processing. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Ortiz-Sanchez, Mariana, Solarte-Toro, J.-C., González-Aguirre, J.-A., Peltonen, K.E., Richard, P., Cardona-Alzate, C.A., 2020. Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from Orange Peel Waste under the biorefinery concept. *Biochem. Eng. J.* 107680. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680>
- Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J.C., Orrego-Alzate, C.E., Acosta-Medina, C.D., Cardona-Alzate, C.A., 2020. Integral use of orange peel waste through the biorefinery concept: an experimental, technical, energy, and economic assessment. *Biomass Convers. Biorefinery* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00627-y>
- Ortiz, D.L., Batuecas, E., Orrego, C.E., Rodríguez, L.J., Camelin, E., Fino, D., 2020. Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study. *J. Clean. Prod.* 265, 121587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121587>
- Palmeros Parada, M., Osseweijer, P., Posada Duque, J.A., 2017. Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Ind. Crops Prod.* 106, 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>
- PanReac. AppliChem, 2017. PanReac. AppliChem. ITW Reagents [WWW Document].
- Pantoja-Chamorro, A.L., Hurtado-Benavides, A.M., Martínez-Correa, H.A., 2017. Caracterización de aceite de semillas de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims.) procedentes de residuos agroindustriales obtenido con CO₂ supercrítico. *Acta Agron.* 66, 178–185. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n2.57786>
- Paone, E., Komilis, D., 2018. Strategies for the sustainable management of orange peel waste through anaerobic digestion 212, 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.039>
- Patsalou, M., Karolina, K., Makri, E., Vasquez, M.I., Drouza, C., Koutinas, M., 2017. Development of a citrus peel-based biorefinery strategy for the production of succinic acid. *J. Clean. Prod.* 166, 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.039>
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., 1991a. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fourth Ed. ed. McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., 1991b. *Plant design and economics for chemical engineers*, Fourth Ed. ed. McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS.
- Phuong, T., Pham, T., Kaushik, R., Parshetti, G.K., Mahmood, R., Balasubramanian, R., 2014. Food-waste-to-energy conversion technologies : Current status and future directions. *Waste Manag.* 38, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>
- Posada, J.A., Patel, A.D., Roes, A., Blok, K., Faaij, A.P.C., Patel, M.K., 2013. Potential of bioethanol as a chemical building block for biorefineries: Preliminary sustainability assessment of 12



- bioethanol-based products. *Bioresour. Technol.* 135, 490–499.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.058>
- Pourbafrani, M., McKechnie, J., Maclean, H.L., Saville, B.A., 2013. Life cycle greenhouse gas impacts of ethanol, biomethane and limonene production from citrus waste. *Environ. Res. Lett.* 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015007>
- Prakash Maran, J., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., Sridhar, R., 2013. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. *Carbohydr. Polym.* 97, 703–709.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.052>
- Quintero, J.A., Moncada, J., Cardona, C.A., 2013. Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: A process simulation approach. *Bioresour. Technol.* 139, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.048>
- Rincón, L.E., Moncada, J., Cardona, C.A., 2014. Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia: A biorefinery point of view. *Ind. Crops Prod.* 52, 457–465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.004>
- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., Domínguez, J.M., 2008a. Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *J. Agric. Food Chem.* 56, 2380–2387.
<https://doi.org/10.1021/jf073388r>
- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., Domínguez, J.M., 2008b. Submerged Citric Acid Fermentation on Orange Peel Autohydrolysate. *J. Agric. Food Chem.* 56, 2380–2387.
<https://doi.org/10.1021/jf073388r>
- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., Domínguez, J.M., 2008c. Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *J. Agric. Food Chem.* 56, 2380–2387.
<https://doi.org/10.1021/jf073388r>
- Ruiz-Mercado, G.J., Gonzalez, M.A., Smith, R.L., 2013. Sustainability indicators for chemical processes: III. biodiesel case study. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 6747–6760.
<https://doi.org/10.1021/ie302804x>
- Ruiz-Mercado, G. J., Smith, R.L., Gonzalez, M.A., 2012. Sustainability Indicator for Chemical Processes: I. Taxonomy. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 2309–2328.
- Ruiz-Mercado, Gerardo J, Smith, R.L., Gonzalez, M.A., 2012. Sustainability Indicators for Chemical Processes: II. Data Needs. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 2329–2353.
<https://doi.org/10.1021/ie200755k>
- Sikdar, D.C., Menon, R., Duseja, K., Kumar, P., Swami, P., 2016. Extraction of citrus oil from orange (*Citrus sinensis*) peels by steam distillation and its characterizations, *International Journal of Technical Research and Applications.*
- Siles, J.A., Vargas, F., Gutiérrez, M.C., Chica, A.F., Martín, M.A., 2016. Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. *Bioresour. Technol.* 211, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.056>
- Sinnott, R.K., Towler, G., 2013. *Chemical Engineering Design*, Chemical Engineering Design. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61216-2>
- Solarte-Toro, J.C., Chacón-Pérez, Y., Cardona-Alzate, C.A., 2018a. Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as



- raw material. *Electron. J. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.03.005>
- Solarte-Toro, J.C., Chacón-Pérez, Y., Cardona-Alzate, C.A., 2018b. Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material. *Electron. J. Biotechnol.* 33, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.03.005>
- Solarte-toro, J.C., Romero-garcía, J.M., Martínez-patiño, J.C., 2019. Acid pretreatment of lignocellulosic biomass for energy vectors production : A review focused on operational conditions and techno-economic assessment for bioethanol production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.024>
- Sulphuric Acid - Chembid [WWW Document], 2020.
- Taguchi, Y., Oishi, A., Iida, H., 2008. One-step Synthesis of Dibutyl Furandicarboxylates from Galactaric Acid. *Chem. Lett.* 37, 50–51. <https://doi.org/10.1246/cl.2008.50>
- Taherzadeh, M.J., 2011. Enhanced biogas production from rice straw , triticale straw and softwood spruce by NMMO pretreatment 6, 0–4. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.019>
- Talhaoui, N., Taamalli, A., Gómez-Caravaca, A.M., Fernández-Gutiérrez, A., Segura-Carretero, A., 2015. Phenolic compounds in olive leaves: Analytical determination, biotic and abiotic influence, and health benefits. *Food Res. Int.* 77, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.011>
- Tovar, A.K., Godínez, L.A., Espejel, F., Ramírez-Zamora, R.M., Robles, I., 2019. Optimization of the integral valorization process for orange peel waste using a design of experiments approach: Production of high-quality pectin and activated carbon. *Waste Manag.* 85, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.029>
- Towler, G., Sinnott, R., 2012. *Chemical engineering design*, 2nd ed. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-61216-2>
- Transportation, U.. D. of, 2017. *Hazardous Materials List* [WWW Document].
- U.S Environmental Protection Agency, 2017. *Toxic Releases Inventory (TRI) Program. PBT list* [WWW Document].
- Wang, L.J., 2013. Production of Bioenergy and Bioproducts from Food Processing Wastes: A Review. *Am. Soc. Agric. Eng.* 56, 217–229.
- Weingarten, R., Cho, J., Xing, R., Conner, W.C., Huber, G.W., 2012. Kinetics and reaction engineering of levulinic acid production from aqueous glucose solutions. *ChemSusChem* 5, 1280–1290. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100717>
- Wikandari, R., Nguyen, H., Millati, R., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J., 2015. Improvement of Biogas Production from Orange Peel Waste by Leaching of Limonene. *Biomed Res. Int.* 1–6.
- Wu, F., Jin, Y., Xu, X., Yang, N., 2017. Electro fluidic pretreatment for enhancing essential oil extraction from citrus fruit peel waste. *J. Clean. Prod.* 159, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.010>
- Zhang, C., Li, J., Liu, C., Liu, X., Wang, J., Li, S., Fan, G., Zhang, L., 2013. Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion. *Bioresour. Technol.* 149, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.070>



Zondervan, E., Nawaz, M., de Haan, A.B., Woodley, J.M., Gani, R., 2011. Optimal design of a multi-product biorefinery system. *Comput. Chem. Eng.* 35, 1752–1766.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.042>

Tabla de indicadores

Indicador detalle	Unidad del Indicador	Valor antes del proyecto	Valor después del proyecto
Diseño de proceso biorefinerías	Número de procesos	0	3

Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

FONTAGRO
Banco interamericano de Desarrollo
1300 New York Avenue, NW, Stop
W0502, Washington DC 20577
Correo electrónico: fontagro@iadb.org