

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN ACEITES ESENCIALES Y PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES: UNA REVISIÓN DE ASPECTOS METODOLÓGICOS



LIFE CYCLE ASSESSMENT IN ESSENTIAL OILS AND AGROINDUSTRIAL PRODUCTS: A REVIEW OF ITS METHODOLOGICAL ASPECTS

Mantilla, Nicolás Andrés; Jaramillo, Julián Ernesto; Villegas, Juan David

Nicolás Andrés Mantilla

nicolas2218052@correo.uis.edu.co

Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga,
Colombia, Colombia

Julián Ernesto Jaramillo

jejarami@uis.edu.co

Universidad Politécnica de Cataluña, España,
Colombia

Juan David Villegas

juand.villegas@sis-group.biz

Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza,
Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

ISSN: 2145-6097

ISSN-e: 2145-6453

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 2, 2024

riaa@unad.edu.co

Recepción: 28 Agosto 2022

Aprobación: 19 Diciembre 2022

Publicación: 20 Junio 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1304312012/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.6149>

Financiamiento

Fuente: Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, Ministerio de Educación Nacional, Ministerio de Comercio, Industria, y Turismo y al ICETEX, Convocatoria Ecosistema Científico – Colombia Científica

Nº de contrato: Fondo Francisco José de Caldas, Contrato RC-FP44842-212-2018

Beneficiario: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN ACEITES ESENCIALES Y PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES: UNA REVISIÓN DE ASPECTOS METODOLÓGICOS

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Resumen: Contextualización: el Análisis de Ciclo de Vida [ACV] constituye una herramienta útil para evaluar impactos potenciales ambientales de un producto. Dado el creciente interés en la mitigación del cambio climático y en la implementación de prácticas productivas sostenibles, resulta interesante estudiar el perfil ambiental de los productos de origen agrícola, con énfasis especial en los aceites esenciales, para identificar deficiencias en las tecnologías actuales y oportunidades de mejora.

Vacío de conocimiento: la literatura existente sobre líneas de producción de aceites esenciales es bastante limitada, pese a que el estudio de dichos procesos es bastante similar al de otros productos derivados de materia prima agrícola y de los cuales la bibliografía referente a su fabricación es más amplia.

Propósito: revisar los aspectos metodológicos abordados en investigaciones relacionadas con el análisis de ciclo de vida de materias primas agrícolas, haciendo énfasis especial en la producción de aceites esenciales. También se enfatizó en aquellos autores que utilizaron enfoques no convencionales y se describieron las razones que los motivaron a ello.

Metodología: Se buscaron y filtraron trabajos investigativos de los últimos 12 años en los que se analizó el ciclo de vida de productos agroindustriales. Los aspectos revisados incluyeron el alcance del análisis, las categorías de impacto, la unidad funcional, las fuentes de información, los métodos de asignación y las herramientas (software y base de datos) usadas.

Resultados y conclusiones: a partir de los aspectos mencionados anteriormente, fue posible identificar tendencias metodológicas como el uso del enfoque de cuna a la puerta, el software SimaPro, la base de datos Ecoinvent y los métodos de asignación másico y económico. Respecto al último método, se encontró que la asignación económica se acentúa más en el caso de los aceites esenciales, debido a las diferencias significativas que existen entre su masa y valor económico.

Palabras clave: agricultura, ciclo de vida, ambiente.

Abstract: Contextualization: Life Cycle Assessment [LCA] is a useful tool for assessing the potential environmental impacts

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Mantilla, N., Jaramillo, J. y Villegas, J. (2023). Análisis de ciclo de vida en aceites esenciales y productos agroindustriales: una revisión de aspectos metodológicos. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 14(2), 251 - 276. <https://doi.org/10.22490/21456453.6149>

of a product. Due to the growing interest in climate change mitigation and on the implementation of sustainable practices of production, it is interesting to study the environmental profile of essential oil products and similar products to identify shortcomings in current technologies and possibilities for improvement.

Knowledge gap: the existing literature about the essential oil production lines is quite limited, although its production is similar to other products derived from agricultural materials, for which the bibliography is more extensive.

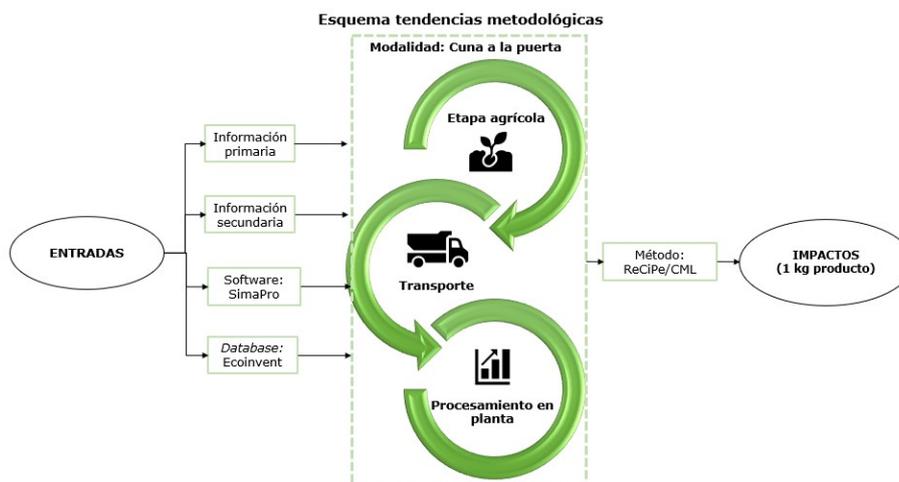
Purpose: to review the methodological aspects addressed in research related to life cycle analysis of agricultural feedstocks, with focus on essential oil production. The study was focused on those studies that employed a non-conventional approach describing the reasons for their methodological choices.

Methodology: research papers from the last 12 years, which analysed the life cycle of agro-industrial products, were searched and filtered. The aspects reviewed included the scope, the impact categories, the functional unit, the sources of information, the allocation methods, and the tools (software and database) used.

Results and conclusions: using the previous aspects, it was possible to identify methodological trends such as the general use of a cradle-to-gate approach, the use of SimaPro software coupled with the Ecoinvent database, and mass and economic allocation methods. Regarding the last method, it was found that the economic allocation is more accentuated in the case of essential oils, due to the significant differences that exist between their mass and economic value.

Keywords: agriculture, life cycle, environment.

RESUMEN GRÁFICO



El Análisis de Ciclo de Vida es utilizado para evaluar los desempeños ambientales de las líneas de obtención de productos de origen agrícola y aceites esenciales.

En sistemas de este tipo se encontró que resulta recomendable partir con una modalidad de cuna a la puerta, unidad funcional en términos básicos situada en el producto, métodos ReCiPe o CML las herramientas del software SimaPro y la base de dato Ecoinvent.

Autores

1. INTRODUCCIÓN

Los aceites esenciales [AE] son metabolitos secundarios de plantas que se caracterizan por su fragancia [generalmente de composición compleja], son obtenidos a través de destilación con vapor, destilación seca o por algún proceso mecánico sin calor (Consejo de Europa, 2008). En la actualidad, la industria de los AE se destaca por contar con una amplia gama de aplicaciones en diferentes sectores y ramas de la industria como la alimenticia, la farmacéutica, la cosmética y la de productos de aseo (Stashenko, 2009).

Por otro lado, la elaboración de AE también tiene una repercusión en la macroeconomía. Se estima que el valor de mercado de los AE para 2021 ascendió a 17 360 millones de dólares y se espera que alcance los 27 000 millones de dólares para 2022 (Petruzzi, 2022). Debido a esto, y en concordancia con el interés global que existe en la actualidad por la protección ambiental, el desarrollo de la industria de los AE debe ir de la mano de proyectos de investigación y prospección que tengan como objetivo evaluar y establecer las tecnologías más sostenibles en términos económicos y ambientales.

En este contexto, el análisis de ciclo de vida (ACV), como metodología que permite evaluar los potenciales impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2007), surge como una herramienta útil para examinar el perfil ambiental de un producto e identificar oportunidades de mejora en él. Por esto se aprecia la necesidad de realizar una revisión de estudios en los que se haya aplicado esta herramienta a la producción de AE, con el fin de reconocer características metodológicas que permitan la identificación de buenas prácticas, en aras de contribuir a futuros estudios que se deseen desarrollar sobre el tema.

No obstante, si se revisa la literatura existente en relación con los análisis de este tipo aplicados a los AE, se verá que los resultados son limitados. Al usar el motor de búsqueda de Scopus con las palabras clave *Life cycle assessment* y *essential oil*, unidos con el operador booleano AND, y filtrar los estudios publicados entre el 2010 y el 2021, se observará un interés apenas naciente en el tema como se ilustra en la Figura 1; teniendo en cuenta que los resultados obtenidos dan cuenta de investigaciones que incluyen las palabras clave y no necesariamente tratan sobre el ACV aplicados a la producción de AE.

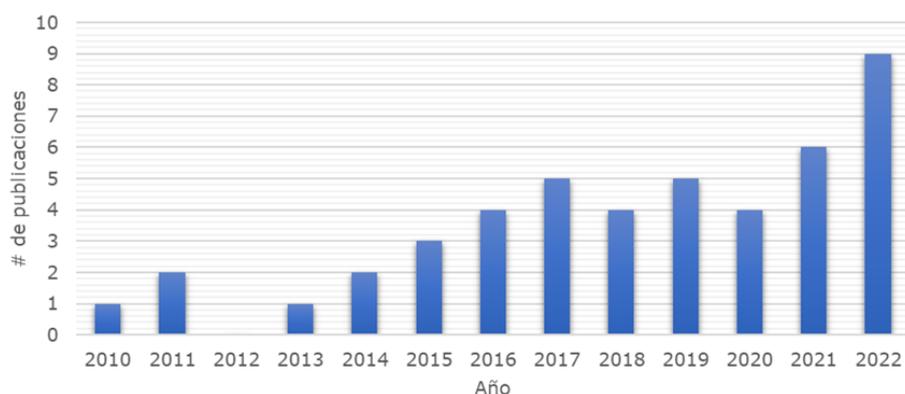


FIGURA 1.
Historial de publicaciones de interés entre 2010-2021.
Scopus.

Por lo mencionado anteriormente, la ejecución de una revisión enfocada únicamente en el ACV de los AE resultaría poco completa y, probablemente, no sería suficiente para el reconocimiento de tendencias. Por tanto, como parte de la revisión, se propone la inclusión de investigaciones sobre el ACV aplicado a otros tipos de productos basados en materia prima agrícola, teniendo en cuenta que la etapa de cultivo es trascendental en lo que a impactos ambientales se refiere debido a, por ejemplo, el uso y manufactura de químicos y pesticidas agrícolas (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2019) y al extensivo uso de recursos que implica, por la industrialización de los procesos. Trabajos de revisión de este estilo se han desarrollado

antes sobre productos de origen agrícola que son utilizados en la industria energética como es el caso de estudios sobre el bioetanol (Wiloso et al., 2012), biocombustibles basados en biomásas (Osman et al., 2021) y biogás (Hamma et al., 2019). Pero también se tienen ejemplos de aplicaciones a productos alimenticios como aceites comestibles (Khatri & Jain, 2017), aceite de oliva (Salomone et al., 2010) y otros cultivos (Alhashim et al., 2021). Estos artículos se caracterizan por abarcar casi siempre entre 20 y 50 investigaciones y por concentrarse frecuentemente en estudiar aspectos metodológicos típicos de los ACV como pueden ser la unidad funcional, los límites del sistema del producto y las categorías de impacto consideradas.

En el presente artículo se consideraron un total de 50 investigaciones halladas mediante diferentes motores de búsqueda de documentos académicos, de los cuales 13 analizaron aceites esenciales como productos. A partir de los resultados obtenidos se identificaron tendencias metodológicas comunes, tanto para el caso general de productos basados en materia agrícola como para el particular de AE. Con este fin, primero se describe detalladamente la metodología adoptada para búsqueda, filtrado y selección de estudios, junto con la presentación de los aspectos que se evaluaron en ellos; luego se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos para los estos aspectos; y, a modo de conclusión, se resumen de los hallazgos más importantes, el camino para seguir y algunos retos y proyecciones sobre el tema de investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Búsqueda e identificación de estudios

Los estudios que se tuvieron en cuenta para este trabajo fueron aquellos que utilizaron el ACV para evaluar productos basados en materias primas agrícolas. Para encontrarlos se recurrió al motor de búsqueda de Scholar Google y a bases de datos como ScienceDirect, Springer y Scopus. Concretamente, las búsquedas efectuadas aprovecharon las funciones booleanas de los motores de búsqueda y fueron las siguientes:

- (“Life cycle assessment” OR “Life cycle analysis”) AND (“essential oil” OR “agricultural” OR “bio**”)

De esta manera se dio prioridad a las investigaciones relacionadas con AE, pero también se incluyeron productos de origen agrícola y variedades de bioproductos que pueden tener diversas aplicaciones.

Selección de estudios para analizar

Para la selección de los estudios incluidos en la revisión fue necesario establecer algunos criterios. Estos fueron:

- Que se hubiesen publicado a partir del año 2010.
- Que más del 60 % de los estudios fueran recientes [publicados en los últimos 5 años], con el fin de garantizar que los estudios examinados representen las tendencias académicas actuales en ACV.
- Si la investigación no se trataba de aceites esenciales, se exigía que se considerara la etapa agrícola del producto.

Inicialmente, se separaron aquellos estudios en los que se trabajó con AE de los demás. De acuerdo con los criterios anteriores se eligieron un total de 50 investigaciones, incluyendo artículos publicados en revistas científicas y tesis de pregrado y de posgrado; de los artículos seleccionados, 13 contenían AE como materia de análisis. La Figura 2 ilustra el proceso llevado a cabo para la búsqueda y filtración de investigaciones revisadas, allí se aprecia que gran cantidad de los resultados fueron descartados por tratarse de registros duplicados o porque sus títulos no hacían referencia al análisis de ciclo de vida y se muestra cómo se llegó a la selección de los 50 trabajos que fueron objeto de la revisión.

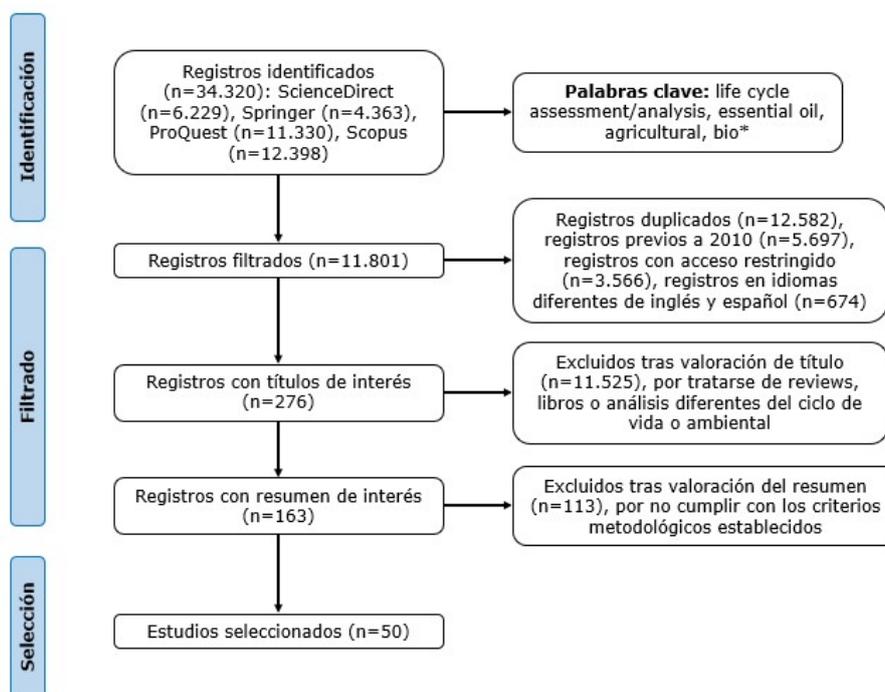


FIGURA 2.
Diagrama de flujo selección de estudios.
Autores

Análisis de los estudios seleccionados

Posteriormente, en función de lo que se deseó evaluar [algunas tendencias en la aplicación de los ACV a productos obtenidos de materia prima agrícola], se definieron los aspectos de las metodologías adoptadas por los autores estudiados. Éstos son:

- Unidad funcional.
- Enfoque.
- Fuentes de información.
- Categorías de impacto consideradas.
- Software utilizado.
- Bases de datos.
- Métodos utilizados para análisis de sistemas con productos múltiples (asignación o allocation).

Cada uno de estos aspectos se estudió para los productos agroindustriales en general y se enfatizó para los AE.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según se estableció en la metodología adoptada, la presentación de los resultados se muestra primero para todos los estudios seleccionados y luego se enfatiza en el caso particular de los relacionados directamente con AE. Dado que los trabajos investigativos analizados se caracterizan por tener materia prima agrícola, pero pueden hacer referencia a productos de diferentes áreas de la industria, resulta adecuado mostrar cómo se reparten entre ellas. Esto es ilustrado en la Figura 3.

Cabe resaltar que para los ACV con diversas líneas de producto se cuentan las áreas de la industria a la que pertenecen todos sus productos, por ello se encontrará que el conteo total es superior al de estudios considerados [50]. Por la variedad de aplicaciones encontrada se incluye la categoría de biomateriales en la

que se abarcan biopolímeros (Chen et al., 2016; Kachrimanidou et al., 2021), biomateriales de construcción (Pretot et al., 2014; Quintana et al., 2018) y bioadhesivos (Yang & Rosentrater, 2019; Arias et al., 2020). Un caso especial se encuentra en lo trabajado por Moutousidi & Kookos (2021), quienes incluyeron en su análisis la producción a escala comercial de nueve bioquímicos diferentes.

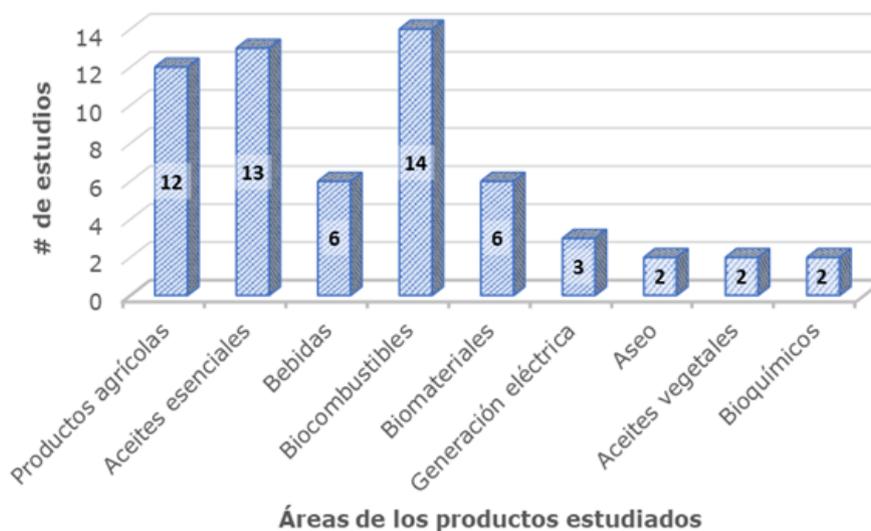


FIGURA 3.
Distribución de área de los productos estudiados en los análisis seleccionados.
autores.

Se destaca una presencia significativa de los AE, debido a los propósitos particulares del presente trabajo. Sin embargo, es más marcado el protagonismo de los biocombustibles, lo cual es consistente con lo descrito por Spinelli et al. (2013) quienes muestran que la importancia de la realización de ACV sobre los biocombustibles radica en la necesidad de comprobar que, aunque estos últimos son generalmente más costosos que los combustibles fósiles, representan emisiones mínimas de dióxido de carbono y sulfatos, con desempeños similares a las fuentes de energía fósil. Dentro de los estudios sobre biocombustibles es destacable, por lo particular de su caso, el de Muñoz et al. (2014) ya que se interesaron por el bioetanol, pero con énfasis especial en su aplicación como solvente para productos de hogar y cuidado personal.

De manera similar, la gran cantidad de estudios hallados sobre alimentos y bebidas de origen agrícola concuerdan con el hecho, marcado por Ingraio et al. (2015), de que la agricultura y el sector alimenticio son responsables de una parte considerable de los impactos ambientales, lo que tenderá a aumentar con el crecimiento poblacional mundial. Por estas razones son necesarias iniciativas de investigación para establecer, adoptar y difundir tecnologías de producción más sustentables. Además, también es apreciable cómo autores de determinados países se interesan en evaluar la sostenibilidad de los productos más relevantes de sus regiones, con el fin de contribuir a las intenciones globales de mitigación del cambio climático, sin perder el beneficio económico que dichos productos implican.

Ejemplo de lo anterior es lo ejecutado por Fernández-Lobato et al. (2021), quienes se enfocaron en la producción de aceite de oliva en España, que es el principal productor en el mundo; otro ejemplo se halla en Khanali et al. (2018) al trabajar sobre la producción de aceite comestible de canola, que es uno de los principales productos de la canasta familiar en Irán; de la misma manera, en Tailandia fue estudiado el proceso productivo del *riceberry* por Chancaroonpong et al. (2021); y un último ejemplo está en Brito et al. (2021) que hicieron lo propio con la soja en Brasil, máximo productor y exportador de esta planta. Así mismo, se puede evidenciar el trabajo conjunto entre la academia y la industria, cuando las empresas quieren dar valor añadido desde el punto de vista ambiental a sus productos, como en el caso de Astuti et al. (2021), en el que

la procesadora de café indonesia *CVXYZ* impulsó el análisis del ciclo de vida para identificar alternativas que puedan mitigar los impactos ambientales asociados a la producción de café molido.

Enfatizando en los AE, la Tabla 1 muestra un reciente interés en la temática que va en crecimiento. Se confirma la variedad de productos de esta naturaleza en los que existe interés desde la industria y la academia, pues se encuentran aceites provenientes de cítricos, plantas aromáticas e incluso algas. Además, la Tabla 1, presentada a continuación, resume los resultados obtenidos para el caso de estudios de AE. Un análisis similar se realizó para los demás estudios seleccionados y a partir de ello es que se presenta, seguidamente, el recuento de los hallazgos que tuvo este trabajo investigativo.

TABLA 1.
Comparación de aspectos metodológicos en ACV sobre AE.

Autores (Año)	Producto	Enfoque	Flujo referencia (unidad funcional)	Métodos de asignación	Software	Base de datos
(Beccali et al., 2010)	AE de naranja	Cuna a la puerta	1 kg de producto	Másica/ Económica	SimaPro	Pre-Product Ecology Consultants Oko-Institut Ecoinvent
(Peña et al., 2015)	AE de limón	Cuna a la puerta	100 t de limones	Másica/ Económica	SimaPro	N. E.
(Moncada et al., 2016)	AE de orégano y romero	Puerta a la puerta	1 kg de aceite	N. A.	Waste Reduction Algorithm	Aspen Plus database NIST
(Pérez et al., 2016)	AE de macroalga <i>Ochtodes secundiramea</i>	Cuna a la puerta	700 mg de aceite	Másica	SimaPro	Ecoinvent
(Maham et al., 2018)	AE de <i>dragonhead</i>	Cuna a la puerta	1 kg de aceite	N. A.	SimaPro	Ecoinvent
(Lambert, 2018)	AE de ylang-tilang	Cuna a la puerta	1 l de aceite	Expansión de sistema	SimaPro	Ecoinvent
(Martínez-Hernández et al., 2019)	AE de naranja	Cuna a la puerta	Producción de 1 MJ de energía en forma de vapor	Económica	N. E.	N. E.
(González et al., 2020)	AE de caléndula	Cuna a la puerta	1 g de aceite	N. A.	SimaPro	Ecoinvent
(Gwee et al., 2020)	AE de <i>Aquilaria Sinensis</i>	Cuna a la puerta	1 kg de aceite	N. A.	GaBi	Gabi Professional Database
(González, 2021)	AE de <i>Sacha Inchi</i>	Cuna a la puerta	1 l de aceite	N. A.	SimaPro	Ecoinvent
(Machin et al., 2022)	AE de limón	Cuna a la puerta	1 t de producto	Másica/ Económica	SimaPro	Ecoinvent
(Pelaracci et al., 2022)	AE de cártamo	Cuna a la puerta	1 t de aceite	Expansión de sistema	SimaPro	Ecoinvent
(Moura et al., 2022)	AE de romero	Puerta a la puerta	1 g aceite	N. A.	SimaPro	Ecoinvent

autores.

Nota: N. A.: no aplica; N. E.: no especificado.

Modalidades y límites del sistema

Se hallaron en su mayoría casos con las modalidades de la cuna a la puerta y de la cuna a la tumba. Esto se repartió de la siguiente forma: 12 [24 %] de los ACV siguieron la modalidad de la cuna a la tumba, mientras que el 74 % de ellos utilizaron la de cuna a la puerta. Esta preferencia por el enfoque *cradle-to-gate* se explica debido a que el abanico de opciones para aplicaciones de productos de origen agrícola es bastante amplio,

de manera que la etapa final del ciclo de vida del producto [uso y disposición final puede también ser muy variable y, por tanto, traducirse en diversos valores de cargas ambientales. Además, teniendo en cuenta que las fuentes de información suelen ser pruebas realizadas a escala de laboratorio o a nivel industrial, pero no comercial, no es usual que sea posible obtener información relativa a las etapas finales del ciclo de vida del producto.

Los hechos anteriores son aún más evidentes al examinar los estudios de AE, en los que siempre se trabaja con el enfoque de la cuna-a-la-puerta; excepto en los casos de Moncada et al. (2016) y Moura et al. (2022) que son los únicos en usar un enfoque de la puerta a la puerta [*gate to gate*], lo hacen partiendo de la premisa de que su objetivo es comparar el desempeño de diferentes tecnologías de extracción de AE a partir de material vegetal. De cualquier forma, la etapa agrícola no sería un factor diferencial en el análisis, de manera que lo único que se lograría usando la modalidad de la cuna a la puerta sería que las diferencias entre tecnologías no sean tan significativas y apreciables.

Entre los trabajos que incluyeron también la parte final del ciclo de vida, se destaca que la mayoría correspondían a productos del área de los biocombustibles [6 de los 12 que lo hicieron], lo cual es entendible cuando se tiene presente que el uso [y disposición final] de éstos produce emisiones directas al medioambiente que resulta muy conveniente incluir para la completitud de los resultados. Ejemplo de esto son los trabajos de Pérez y Dumar (2011), Poeschl et al. (2012) y Zucaro et al. (2018). Un caso para resaltar en el que se trabaja con biocombustibles y no se adopta un alcance de la cuna a la tumba se encuentra en Li et al. (2020) pues, al trabajar con hidrógeno como combustible, las únicas emisiones que se tienen son de agua; de manera análoga, los dos artículos dedicados a materiales de construcción tampoco hicieron uso de ese método, pero por razones diferentes: Pretot et al. (2014) consideraron que el efecto de secuestro de carbono debido a la carbonatación del aglutinante del muro era relevante y Quintana et al. (2018) asumieron que las cargas ambientales durante la etapa de uso eran nulas.

Unidades funcionales

Para la localización de la unidad funcional, en las investigaciones exploradas, se reconoce una tendencia marcada a hacerlo en el producto [43 veces] y en términos másicos [31 ocasiones], más que nada por facilidad a la hora de realizar balances másicos para construcción del inventario del ciclo de vida [ICV]. Resaltan, por tanto, aquellos trabajos en los que se localizó la unidad funcional en puntos diferentes de la línea de producción. Esto ocurre principalmente cuando se trata de productos netamente agrícolas como el cacao (Rangel et al., 2013), el durazno (Ingrao et al., 2015), la bergamota (Strano et al., 2017) y las plantas aromáticas (Litskas et al., 2019), con los que se prefiere optar por el área de cultivo como unidad funcional, debido a que gran parte de los datos proporcionados por las fuentes de información están fundamentados sobre esta base y mantenerla en el ACV simplifica los cálculos por realizar. Este tipo de unidad funcional se repite en Sales et al. (2022), pero con la motivación especial de que se deseaba analizar la cadena de valor completa de la oliva, de forma que el interés no se encontraba en un solo producto sino en dos: la oliva misma y la generación eléctrica que puede obtenerse a partir del uso de sus residuos como biomasa.

De manera similar, son destacables algunos casos en que no se utiliza la masa como medida de la unidad funcional. Por ejemplo, 4 investigaciones utilizaron la energía como unidad de medida funcional para el caso de biocombustibles, en la modalidad de la cuna a la tumba (Cox et al., 2014; Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2021) y generación eléctrica (Kimming et al., 2011; Restrepo & Bazzo, 2015) por obvias razones; también es diciente y lógico el uso de 1 m² de producto como unidad funcional en el sector de la construcción, como lo hacen Pretot et al. (2014) y Quintana et al. (2018).

Por último, cabe mostrar el caso del uso de unidades funcionales volumétricas que se da, evidentemente, en algunos productos gaseosos o líquidos como el hidrógeno combustible (Iribarren et al., 2014), el bioetanol (Escobar et al., 2020), algunos aceites esenciales (González, 2021; Lambert, 2018), y bebidas (Ortiz-Sánchez & Cardona, 2021; Zhang & Rosentrater, 2019; Khanali et al., 2020). Dos casos especiales que cabe resaltar son los de Zucaro et al. (2018) y Krohnert & Stucki (2021) quienes, para facilitar la comparación del

rendimiento real de su producto de interés [un biocombustible para el primero y un shampoo para el segundo], tomaron como unidad funcional 1 km recorrido por un vehículo de tamaño medio y un lavado de cabello, respectivamente.

En cuanto a los AE, las unidades funcionales escogidas se ubican, en su mayoría [11 de 13 casos], en términos máxicos y volumétricos del producto generado. Se resaltan los casos de Beccali et al. (2010) y de Machin et al. (2022) quienes trabajaron sistemas con más de un producto, por lo que la unidad funcional se fija en el producto principal que se desea abordar [jugos naturales de cítricos, cáscaras deshidratadas, entre otros]. También se destacan las excepciones halladas en los estudios de Peña et al. (2015) y de Martínez-Hernández et al. (2019) quienes, también para resolver el problema de analizar sistemas con múltiples productos, optaron por situar la unidad funcional en términos de la materia prima utilizada [limones] en el caso de los primeros y cierta cantidad de energía aprovechada para proporcionar el vapor necesario para el procesamiento en el segundo caso.

Fuentes de información

A propósito de las fuentes de información utilizadas, se puede intuir que la disponibilidad de información de primera mano se suele imponer como requisito para la realización del análisis, sobre todo en lo que se refiere a la etapa agrícola del ciclo de vida del producto. De hecho, en 37 de los 50 casos considerados se recurrió a información primaria. Esto está estrechamente relacionado con: 1) la influencia trascendental de las condiciones geográficas y climáticas sobre el rendimiento de las prácticas agrícolas y 2) con que actualmente muchos países no cuentan con bases de datos agrícolas nacionales. Estas dos condiciones en conjunto hacen que muchos autores prefieran construir sus ICV con información propia del contexto particular, en vez de tener que recurrir a datos internacionales que [muy probablemente] no reflejen el comportamiento real del ciclo de vida del producto y que, por tanto, se traduzcan en resultados poco representativos. En las investigaciones sobre aceites, por ejemplo, se observa que para todas se recurrió tanto a fuentes primarias como secundarias. Lo anterior indica que se tiene conciencia de que la representatividad de los datos utilizados para la construcción del ICV, que es el núcleo del análisis, constituye un punto fundamental en la validez de los resultados que se pueden obtener.

Lo anterior implica que no se desecha totalmente el uso de información secundaria o de fondo [background], ya que todas las investigaciones examinadas se apoyaron también en bases de datos internacionales para algunos elementos de sus ICV [como se verá en la sección de Software y base de datos]. En este sentido, la literatura revisada muestra la importancia de que esta información de fondo sea simplemente un complemento para aquellos resquicios que la información primaria no puede abarcar y de que, en la medida de lo posible, se utilicen plantillas dedicadas al país en el que se desarrolla el estudio [Ecoinvent, por ejemplo, cuenta con plantillas de suministro de energía eléctrica para el caso específico de gran variedad de países del mundo].

Métodos de asignación

Un porcentaje considerable de los ACV abarcados no requirió de métodos de asignación [44 %], debido a que generalmente se trataba de sistemas con un único producto; por lo contrario, los criterios más utilizados fueron el másico [7], el económico [6] y ambos en conjunto [5]. También cabe destacar el uso de la expansión de sistema, que se da en 5 ocasiones, y un caso en el que se implementan todos los criterios siguientes: energético (Li et al., 2020), de cargas evitadas (Iribarren et al., 2014), exergético (Escobar et al., 2020) y volumétrico (Arias et al., 2020).

Así mismo, se destaca el trabajo de Ofori-Boateng & Lee (2014) que, a pesar de considerar un sistema de múltiples productos [bioetanol-fitoquímicos], no aplicaron ningún método de asignación, puesto que su interés no se hallaba en determinar los impactos ambientales potenciales y exergéticos sobre un producto en especial, sino sobre toda una biorrefinería. Igualmente, cabe mencionar lo ejecutado por Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2021), quienes se ocuparon de mezclas de biocombustibles con combustibles convencionales como el diésel; en este estudio se establecieron [como productos de análisis] las mezclas de

diferentes proporciones de los combustibles y, aunque se hayan tenido en cuenta las líneas de producción de diferentes productos, el producto final de interés es uno solo y es la mezcla combustible de manera tal que no se necesitaron métodos de asignación.

En lo que respecta a estudios sobre AE, el 46 % de los estudios no tuvo que recurrir a métodos de asignación, debido a que trabajaban con sistemas con un único producto principal; por su parte, en la mayoría de los demás trabajos se evidencia que los métodos de asignación preferidos son: el método másico, el económico o ambos en simultáneo. Se utilizan ambos métodos cuando se desea examinar la sensibilidad de esta elección, estudiando cómo pueden cambiar los resultados obtenidos en función del método adoptado (Beccali et al., 2010; Peña et al., 2015; Machin et al., 2022); estos análisis de sensibilidad tienen especial interés en estos sistemas, debido a que generalmente los AE tienen una baja masa en relación con su valor económico. Por el contrario, según lo abarcado por Lambert (2018) y Pelaracci et al. (2022), se recurre a la expansión de sistema con el fin de incluir las cargas ambientales evitadas gracias al reciclaje o al aprovechamiento de coproductos de otras industrias.

Software y bases de datos

Se encuentra una marcada preferencia por el uso de SimaPro y GaBi, con un uso preponderante del 62 % para el primero y 12 % para el segundo; mientras que otras opciones como Open LCA (Brito et al., 2021), Umberto NXT LCA (Aguirre-López et al., 2017) y Waste Reduction Algorithm (Moncada et al., 2016) son usados solo una vez en todos los estudios escogidos. Así mismo, las bases de datos más utilizadas fueron Ecoinvent (31 veces), GaBi professional database (4 veces), Agri-footprint y ELCD (2 veces); por su parte, las demás bases encontradas sólo se usaron una vez y fueron estas: Pre-Product Ecology Consultants, Oko-Institut, Plastics Europe, Ebalance Database China, Agribalyse, Australasian LCA, Australasian Unit Process LCI.

Se puede remarcar también que algunos estudios no se basaron en una única base de datos, sino que recurrieron a varias. Por ejemplo, en el caso de Chen et al. (2016) se utilizó la Plastics Europe Database para aprovechar información específica sobre la industria de los plásticos y se complementó la información con los datos disponibles en Ecoinvent. De manera similar, en el trabajo de Campiglia et al. (2020) se completan los datos de Ecoinvent con información de Agri-footprint y ELCD.

En cuanto a los trabajos sobre AE, mientras 11 de los 13 estudios usan SimaPro, se destaca el hecho de que en algunos de los estudios abarcados no había especificación literal de software o base de datos utilizados, lo cual obstruye la repetibilidad del estudio (Peña et al., 2015 y Martínez-Hernández et al., 2019). Además, vale la pena hacer mención de otras herramientas utilizadas por algunas investigaciones, como fueron el software Gabi junto con su respectiva base de datos (Gwee et al., 2020) y el *Water Reduction Algorithm* en conjunto con las bases de datos del *National Institute of Standards and Technology* y de Aspen Plus (Moncada et al., 2016).

La preponderancia de SimaPro es entendible, teniendo en cuenta que es una herramienta que permite realizar estudios de diferente naturaleza [como huella de carbono, huella hídrica y EPD], permite una representación gráfica de ciclos de vida complejos de un modo sistemático y transparente y está equipada por defecto con bases de datos como Ecoinvent, Agri-footprint y ELCD; estas características resultan bastante atractivas a nivel académico e industrial. Además, la que puede considerarse la principal desventaja de SimaPro, que es la necesidad de licencia para su uso [en contraste con herramientas abiertas como OpenLCA], parece no representar un problema para los usuarios; por lo contrario, parece una inversión razonable a cambio de obtener resultados aplicables a un contexto internacional, más fáciles de analizar y más transparentes.

Categorías de impacto

En principio se consideran todas las categorías incluidas en los estudios seleccionados, pero los resultados finales incluirán únicamente aquellas que se repiten en más del 20 % de los estudios. Éstas son presentadas según la nomenclatura de la Tabla 2.

TABLA 2.
Nomenclatura para identificación de categorías de impacto.

Nomenclatura	Categoría de impacto
AC	Acidificación
TAC	Acidificación terrestre
AD	Agotamiento abiótico
OD	Agotamiento de la capa de ozono
MD	Agotamiento mineral
FD	Agotamiento de recursos fósiles
CC	Cambio climático
AEC	Ecotoxicidad acuática
FEC	Ecotoxicidad de agua dulce
MEC	Ecotoxicidad marina
TEC	Ecotoxicidad terrestre
CE	Efectos carcinógenos
NCE	Efectos no carcinógenos
RI	Efectos respiratorios inorgánicos
EU	Eutrofización
FEU	Eutrofización de agua dulce
MEU	Eutrofización marina
PMF	Formación de material particulado
POF	Formación de oxidantes fotoquímicos
LO	Ocupación de tierra/uso de tierra
HT	Toxicidad humana

autores.

Ahora, tal y como era de esperarse, se halla una frecuencia del 100% de inclusión para la categoría de cambio climático o calentamiento global. Detrás de esta, las categorías más utilizadas son: formación de oxidantes fotoquímicos, con un 64 % agotamiento de la capa de ozono, con un 58 %; acidificación, con un 56 %; y toxicidad humana, con un 40 %; todo esto se ilustra en la Figura 4. El uso recurrente de estas categorías de es consistente con los principales impactos asociados a las prácticas agrícolas: 1) la producción de CO₂, debida a los procedimientos de encalado, tiene efecto directo en el cambio climático y en la acidificación de los océanos; 2) la generación de óxidos de nitrógeno, por prácticas como el arado y uso de fertilizantes nitrogenados, contribuye al agotamiento de la capa de ozono y a la formación de oxidantes fotoquímicos; 3) la aplicación de pesticidas, que contienen químicos que luego son emitidos al ambiente, aporta a potenciales impactos tóxicos en humanos.

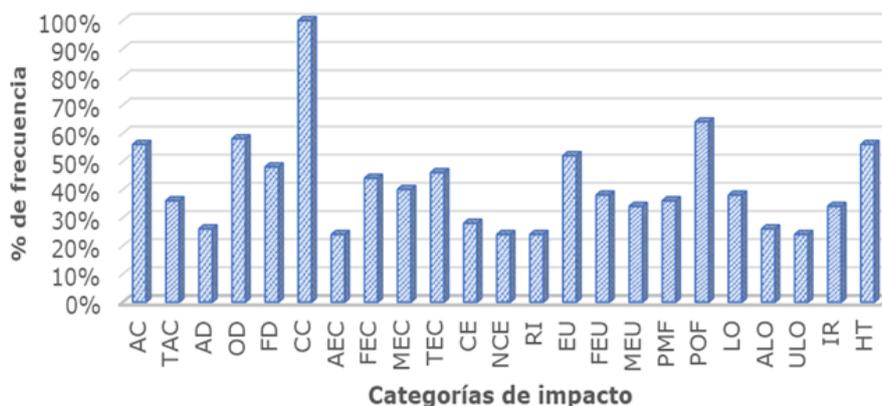


FIGURA 4.

Comparación de frecuencia de uso de categorías de impacto en ACV basados en materia agrícola. autores.

Por otra parte, dependiendo de los fines específicos del estudio, algunas categorías pueden referirse al mismo impacto y solo difieren en la parte específica del ambiente que afectan. Por ejemplo, la acidificación terrestre presenta una frecuencia del 36 % y las eutrofizaciones de agua dulce y marina contribuyen en un 38 % y 34 %, respectivamente; mientras que la ecotoxicidad se analiza en tres ecosistemas diferentes: terrestre en un 46 % de los casos, marino en un 40 %, y agua dulce en un 44 % de ellos. Por último, en concordancia con el hecho de que se trata de ACV ejecutados sobre productos con materia prima agrícola, se aprecia una frecuencia significativa en el uso de las categorías de ocupación de tierra [LO] y ocupación de tierra agrícola [ALO] con participaciones del 38 % y 26 % respectivamente.

Otro punto interesante, relacionado con las categorías de impacto consideradas, se halla en los métodos de análisis de impacto del ciclo de vida preferidos por los autores abordados: los más usados fueron ReCiPe [32 %] y CML [30 %] en sus correspondientes variantes. La predilección por estos métodos se puede explicar dado que el método CML fue el primero que ofreció la posibilidad de limitar los niveles de incertidumbre, restringiendo el modelado a las etapas tempranas de la cadena causa-efecto, a través de indicadores de punto medio; mientras que ReCiPe, considerado muchas veces como una continuación de CML, a esta ventaja añadió la posibilidad de obtener resultados mediante indicadores de punto medio y punto final, combinando los beneficios de los dos enfoques [menores incertidumbres en los indicadores de punto medio y mayor comprensión de los efectos finales de los impactos en los de punto final].

En cuanto a los casos particulares de los AE, se destacan las categorías de cambio climático, formación de oxidantes fotoquímicos y ecotoxicidad terrestre; apareciendo en 13, 9 y 8 casos, respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 5. Una vez más, según se vio previamente, las categorías más utilizadas coinciden con aquellas que se ven más afectadas por las prácticas agrícolas. Por otra parte, cabe resaltar el trabajo de Moura et al. (2022) en el que, a razón de los objetivos específicos del análisis, sólo se consideraron las categorías de cambio climático y demanda energética acumulada.

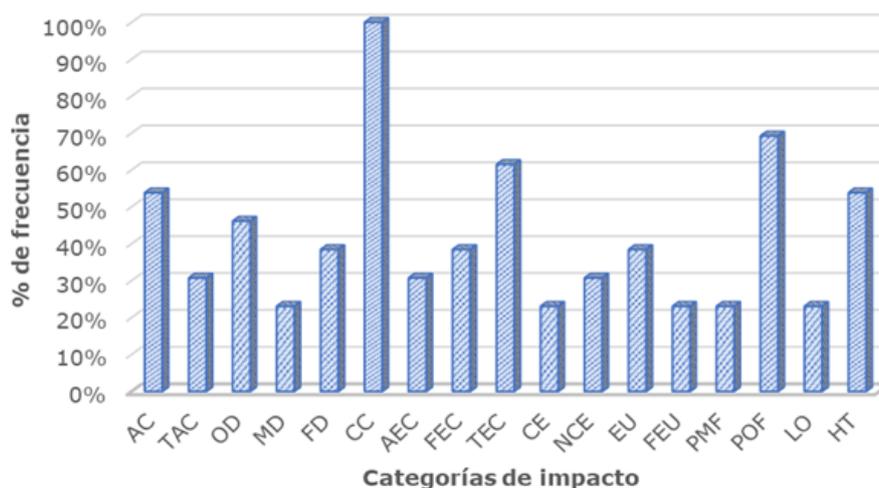


FIGURA 5.
Comparación de frecuencia de uso de categorías de impacto en ACV sobre AE esenciales.
autores.

5. CONCLUSIONES

La literatura reciente sobre análisis de ciclo de vida, aplicados sobre el área específica de los aceites esenciales, es limitada y así lo demuestra el proceso de búsqueda llevado a cabo con el fin de ejecutar la presente revisión; no obstante, el interés en realizar investigaciones de esta naturaleza está creciendo y es consistente con el crecimiento simultáneo de la industria de los AE y de la conciencia de protección ambiental global. En este sentido, la trascendencia del efecto ambiental ejercido por las prácticas agrícolas es notoria, pues dichas prácticas impactan al ambiente en diferentes formas. De acuerdo con esto, y teniendo en cuenta que las aplicaciones de los AE [y de muchos otros productos cuya materia prima es de origen agrícola] son muy diversas, es usual y recomendable [en tanto no se requieran estudios de caso particular] adoptar modalidades de la cuna a la puerta para los análisis de ciclo de vida sobre esta clase de productos; de esta forma no son omitidos los efectos significativos de la etapa agrícola y se consigue que los resultados obtenidos sean aplicables a una mayor cantidad de casos.

En este estudio se encontró que los autores de las investigaciones examinadas suelen situar la unidad funcional en el producto y en términos másicos, puesto que ello facilita la realización de análisis comparativos con diferentes líneas de producción posibles para la obtención de un mismo producto y la construcción del ICV. Dado que la normativa de referencia ISO, relacionada con la metodología de ACV, no es rigurosa con las categorías de impacto que deben tenerse en cuenta y que existen diferentes métodos de análisis, las categorías incluidas en los ACV son variadas. Sin embargo, hay categorías de impacto que son utilizadas en la mayoría de los casos por su relación con las prácticas agrícolas, como el cambio climático, la formación de oxidantes fotoquímicos, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación y la toxicidad humana.

En sistemas con múltiples productos y diferencias significativas entre su peso másico y su valor económico, como es el caso de los AE, es recomendable recurrir a dos métodos de asignación [másico y económico] para verificar la sensibilidad de los resultados y comparar los resultados obtenidos mediante de cada uno, con el fin de que las conclusiones obtenidas no se vean sesgadas por la elección de un solo método. Con relación a esto, cabe anotar que el tándem formado por el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent se impone ante las demás posibilidades disponibles en el mercado a la hora de realizar ACV en productos como los de las investigaciones revisadas. Esto se debe a que Ecoinvent es una base de datos con información bastante

completa, aplicable a una gran cantidad de casos geográficos particulares, y SimaPro es un software cuya licencia integra implícitamente a Ecoinvent.

Por último, de acuerdo con los resultados hallados, es esperable y deseable la realización de más trabajos de revisión como este [en áreas de la agroindustria más maduras] y que cuenten con una literatura más nutrida, con el propósito de que sirvan como base para futuros ACV dedicados a ellas. Adicionalmente, la realización de otros trabajos análogos a este serviría como actualización de este estudio porque las investigaciones posteriores, al contar con una base bibliográfica mucho más robusta, podrán confirmar o discutir las tendencias aquí identificadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, Ministerio de Educación Nacional, Ministerio de Comercio, Industria, y Turismo y al ICETEX [Convocatoria Ecosistema Científico – Colombia Científica, Fondo Francisco José de Caldas, Contrato RC-FP44842-212-2018].

LITERATURA CITADA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2019). *Overview of Greenhouse Gases*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
- Aguirre-López, M. A., Alzate, J. A. y Cano, N. A. (2017). Evaluación de la carga ambiental asociada a un cultivo de hortensias en La Ceja del Tambo (Antioquia-Colombia) mediante el Análisis de Ciclo de Vida. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 210-221. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2.65138>
- Alhashim, R., Deepa, R. & Anandhi, A. (2021). Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Using LCA: A Review. *Climate*, 164(9). <https://doi.org/10.3390/cli9110164>
- Arias, A., González-García, S., González-Rodríguez, S., Feijoo, G. & Moreira, M. T. (2020). Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of bio-adhesives for the wood panel industry. A comparison with petrochemical alternatives. *Science of the Total Environment*, 738(10). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140357>
- Astuti, R., Kurniawan, B. C. & Setiawan, D. T. (2021). Implementation of Life Cycle Assessment (LCA) in environmental impact evaluation on production of ground coffee. *E3S Web of Conferences*, 306. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130604019>
- Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M. & Mistretta, M. (2010). Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *Journal of Environmental Management*, 91(7), 1415-1428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.028>
- Brito, T., Marques, P., Fernandes Silva, A. & Aranha, J. (2021). LCA of Soybean Supply Chain Produced in the State of Pará Located in the Brazilian Amazon Biome. *Biology and life sciences forum*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/IECAG2021-10072>
- Campiglia, E., Gobbi, L., Marucci, A., Rapa, M., Ruggieri, R. & Vinci, G. (2020). Hemp Seed Production: Environmental Impacts of Cannabis sativa L. Agronomic Practices by Life Cycle Assessment (LCA) and Carbon Footprint Methodologies. *Sustainability*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166570>
- Chancaroonpong, P., Mungkung, R. & Gheewala, S. H. (2021). Life Cycle Assessment and eco-efficiency of high value-added riceberry rice products to support Thailand 4.0 policy decisions. *Journal of Cleaner Production*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126061>
- Chen, L., Pelton, R. E. O. & Smith, T. M. (2016). Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137(20), 667-676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.094>
- Consejo de Europa. (2008). *Pharmacopoeia* (6th ed.). The Stationery Office.

- Cox, K., Renouf, M., Dargan, A., Turner, C. & Klein-Marcuschamer, D. (2014). Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane molasses. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 8(4), 579-593. <https://doi.org/10.1002/bbb.1488>
- Escobar, J. C., Grillo, M. L., Martínez, A. M., Ferreira, G., Ocampo, E. A., Almazán, O. A. & Silva, E. E. (2020). Exergy and Environmental Analysis of a Polygeneration System of Alcohol Industry. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 1539-1554.
- Fernández-Lobato, L., García-Ruiz, R., Jurado, F. & Vera, D. (2021). Life cycle assessment, C footprint and carbon balance of virgin olive oils production from traditional and intensive olive groves in southern Spain. *Journal of Environmental Management*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112951>
- González, N. C. (2021). *Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi (Plukenetia Volubilis) en Santander Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás]. Craiusta. <http://hdl.handle.net/11634/32432>
- González-Aguirre, J. A., Solarte-Toro, J. C. & Cardona, C. A. (2020). Supply chain and environmental assessment of the essential oil production using Calendula (*Calendula Officinalis*) as raw material. *Helijon*, 6(11).
- Gwee, Y. L., Yusup, S., Tan, R. R. & Yiin, C. (2020). Techno-economic and life-cycle assessment of volatile oil extracted from *Aquilaria sinensis* using supercritical carbon dioxide. *Journal of CO2 Utilization*, 38, 156-157. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.01.002>
- Hamma, N. I., Hanafiah, M. M. & Gheewala, S. H. (2019). A review on life cycle assessment of biogas production: challenges and future perspectives in Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 122, 361-374. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.047>
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Rafiee, S., Mohammadi, P., Ghobadiam, B., Lam, S. S., Tabatabaei, M. & Aghbashlo, M. (2021). Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends. *Energy Conversion and Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114300>
- Ingrao, C., Matarazzo, A., Tricase, C., Clasadonte, M. T. & Huisinigh, D. (2015). Life Cycle Assessment for highlighting environmental hotspots in Sicilian peach production systems. *Journal of Cleaner Production*, 92, 109-120. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614013493>
- Iribarren, D., Susmozas, A., Petrakopoulou, F. & Dufour, J. (2014). Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification. *Journal of Cleaner Production*, 69, 165-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.068>
- Kachrimanidou, V., Ioannidou, S. M., Ladakis, D., Papapostolou, H., Kopsahelis, N., Koutinas, A. A. & Kookos, I. K. (2021). Techno-economic evaluation and life-cycle assessment of poly (3-hydroxybutyrate) production within a biorefinery concept using sunflower-based biodiesel industry by-products. *Bioresource Technology*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124711>
- Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Keyhani, F., Hosseinzadeh-Bandbafha, H. & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modelling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997>
- Khanali, M., Mousavi, S. A., Sharifi, M. & Nasab, F. K. (2018). Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production*, 196, 714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.217>
- Khatri, P. & Jain, S. (2017). Environmental life cycle assessment of edible oils: A review of current knowledge and future research challenges. *Journal of Cleaner Production*, 152, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.096>
- Kimming, M., Sundberg, C., Nordberg, A., Baky, A., Bernesson, S., Norén, O. & Hansson, P. A. (2011). Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants - A comparative life cycle assessment. *Biomass and bioenergy*, 35(4), 1572-1581. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.027>

- Krohnert, H. & Stucki, M. (2021). Life Cycle Assessment of a Plant-Based, Regionally Marketed Shampoo and Analysis of Refill Options. *Sustainability*, 13(8478). <https://doi.org/10.3390/su13158478>
- Lambert, M. (2018). *Cradle-to-gate Life Cycle Analysis (LCA) of Ylang-Ylang Complete Essential Oil Destined for cosmetic Use from Central Region, Ghana Using the Software SimaPro* [Tesis de maestría, Universidad Libre de Bruselas]. Archivo digital. https://mem-envi.ulb.be/Memoires_en_pdf/M
- Li, Q., Song, G., Xiao, J., Hao, J., Li, H. & Yuan, Y. (2020). Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from biomass staged-gasification. *Energy*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116416>
- Litskas, V., Chrysargyris, A., Stravrinides, M. & Tzortzakis, N. (2019). Water-energy-food nexus: A case study on medicinal and aromatic plants. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1334-1343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.065>
- Machin, L. M., Wheeler, J. & Mele, F. D. (2022). Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.014>
- Maham, S. G., Rahimi, A. & Smith, D. L. (2018). Environmental assessment of the essential oils produced from dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in conventional and organic farms with different irrigation rates. *Journal of Cleaner Production*, 204, 1079-1086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.348>
- Martínez-Hernández, E., Molina, M. M., Melgarejo, L. A., Palmerín, M. E., Zermeño, J. A., Rosas, A., Aburto, J. & Amezcua-Allieri, M. A. (2019). Energy-water nexus strategies for the energetic valorization of orange peels based on techno-economic and environmental impact assessment. *Food and bioproducts processing*, 117, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.002>
- Moncada, J., Tamayo, J. A. & Cardona, C. A. (2016). Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Oregano (*Origanum vulgare*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 112, 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.067>
- Moura, B., Monteiro, H., Mata, T. M. & Martins, A. A. (2022). Life cycle energy and carbon emissions of essential oil extraction from Rosemary. *Energy Reports*, 8, 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.063>
- Moutousidi, E. S. & Kookos, I. K. (2021). Life cycle assessment of biobased chemicals from different agricultural feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129201>
- Muñoz, I., Flury, K., Jungbluth, N., Rigarlford, G., Canals, L. M. & King, H. (2014). Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 109-119. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0613-1>
- Ofori-Boateng, C. & Lee, K. (2014). An oilm palm-based biorefinery concept for cellulosic ethanol and phytochemicals production: Sustainability evaluation using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*, 62(1), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.022>
- Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2007). *ISO 14040: Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia*. ICONTEC.
- Ortiz-Sánchez, M. & Cardona, C. A. (2021). Comparative environmental life cycle assessment of orange peel waste in present productive chains. *Journal of Cleaner Production*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128814>
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H. & Rooney, D. W. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4075-4118. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>
- Pelaracci, S., Rocchi, L., Romagnoli, F., Boggia, A. & Paolotti, L. (2022). Agricultural Co-Product Management: An LCA Perspective on the Use of Safflower Oilcake from Bio-Oil production in Umbria Region, Italy. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1). <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0003>
- Peña, I. J., Apud, B., Garolera, P. L., Salas, H., Mele, F. D. & Nishihara Hun, A. L. (2015). Preliminary environmental study of the citrus industry of Tucuman (Argentina) based on the Life Cycle Assessment [Conferencia]. *International Conference on Life Cycle Assessment*, Lima, Perú. <https://www.eaac.gov.ar/wp-content/uploads/2018/11/36-4-15.pdf>

- Pérez, Á. J. y Dumar, K. J. (2011). *Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera y etanol* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Archivo digital. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/142298.pdf>
- Pérez-López, P., Jeffryes, C., Agathos, S. N., Feijoo, G., Rorrer, G. & Moreira, M. T. (2016). Environmental life cycle optimization of essential terpene oils produced by the macroalga *Ochtodes secundiramea*. *Science of the Total Environment*, 542, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.045>
- Petruzzi, D. (2022, 16 de febrero). *Essential Oils Market Worldwide - Statistics & Facts*. <https://www.statista.com/topics/5174/essential-oils/#dossierKeyfigures>
- Poeschl, M., Ward, S. & Owende, P. (2012). Environmental impacts of biogas deployment - Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production*, 24, 184-201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.030>
- Pretot, S., Collet, F. & Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>
- Quintana, A., Alba, J., del Rey, R. & Guillén-Guillamón, I. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. *Journal of Cleaner Production*, 185, 408-420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042>
- Rangel, J., Ortiz, O. & Villamizar, R. (2013). Life cycle management in agricultural products: case study on cocoa cultivation in Norte de Santander. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 4(2), 6-22.
- Restrepo, Á. & Bazzo, E. (2015). Biomass: Technical and Environmental Alternative in the Thermoelectric Generation Process. *Ingeniería Y Universidad*, 19(1), 67-86. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.btea>
- Sales, H., Figueiredo, F., Vaz, M. C. & Nunes, J. (2022). Assessing the environmental sustainability of Portuguese olive growing particles from a life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131692>
- Salomone, R., Cappelletti, G. M., Ioppolo, G., Mistretta, M., Nicoletti, G., Notarnicola, B., Olivieri, G., Pattara, C., Russo, C. & Scimia, E. (2010). Italian experiences in Life Cycle Assessment of olive oil: a survey and critical review. En B. Notarnicola, E. Settanni, G. Tassielli y P. Giungato. (Eds.). *VII International conference on life cycle assessment in the agri-food sector*. Universidad de Bari.
- Spinelli, D., Jez, S., Pogni, R. & Basosi, R. (2013). Environmental and life cycle analysis of a biodiesel production line from sunflower in the Province of Siena (Italy). *Energy Policy*, 59, 492-506. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.009>
- Stashenko, E. E. (2009). *Aceites esenciales*. Universidad Industrial de Santander.
- Strano, A., Falcone, G., Nicoló, B. F., Stillitano, T., De Luca, A. I., Nesci, F. S. & Gulisano, G. (2017). Eco-profiles and economic performances of a high-value fruit crop in southern Italy: a case study of bergamot (*Citrus bergamia Risso*). *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(9-10), 1124-1145. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1357064>
- Wiloso, E. I., Heijungs, R. & de Snoo, G. R. (2012). LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5295-5308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.035>
- Yang, M. & Rosentrater, K. A. (2019). Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Pressure Sensitive Bio-Adhesive Production. *Energies*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/en12234502>
- Zhang, C. & Rosentrater, K. A. (2019). Estimating Economic and Environmental Impacts of Red-Wine-Making Processes in the USA. *Fermentation*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/fermentation5030077>
- Zucaro, A., Forte, A. & Fierro, A. (2018). Life cycle assessment of wheat straw lignocellulosic bio-ethanol fuel in a local biorefinery prospective. *Journal of Cleaner Production*, 194, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.130>

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/6149/> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/6149/6118> (pdf)