

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Estado del arte de la aplicación de herramientas de optimización en base al análisis de ciclo de vida en la producción de cítricos y derivados

Estado da arte da aplicação de ferramentas de otimização com base na avaliação do ciclo de vida na produção de frutos e subprodutos de citrino

State of the art of the application of optimization tools based on life cycle assessment in the production of citrus fruits and by-products

Maria Emilia Iñigo Martínez^{1,2*} 
Alejandro Pablo Arena^{1,3} 

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina

² Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina

³ Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina

* minigo@eeaoc.org.ar

Resumen

Actualmente, existe un crecimiento en la demanda mundial de productos cítricos y derivados, cuyas exigencias contemplen normativas de calidad ambiental. En este sentido, la huella ambiental de producto obtenida a partir de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) y su combinación con técnicas de optimización proporciona una herramienta para identificar opciones de mejora en el proceso y fijar estándares de calidad. No obstante, existen escasos estudios que apliquen la combinación de ambas metodologías. Este estudio se plantea con el objetivo de encontrar coincidencias, diferencias y lagunas en artículos científicos existentes acerca de la metodología de ACV y su aplicación en la optimización de la producción de cítricos y derivados. Por lo tanto, se realizó una revisión y selección del material científico según publicaciones que utilizaban la metodología de ACV, técnicas de optimización y la combinación de ambas metodologías. Los estudios, se evaluaron según los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044, productos considerados y función objetivo en el caso de los estudios de optimización. En los resultados, se pudo observar una ausencia de estas contribuciones científicas para el sector agroindustrial cítrica de la Argentina, algunos artículos no siguen ningún lineamiento sobre requerimientos de reglas de producto (ISO 14025) y las variaciones metodológicas, generan diferentes resultados lo que dificulta la comparación entre los estudios que aplican el ACV, por lo que se cree necesario que los trabajos posteriores sigan una determinada línea metodológica que permita su comparación y a su vez incrementar las investigaciones de la aplicación de esta herramienta combinada con técnicas de optimización a la agroindustria cítrica en la Argentina.

Palabras clave: Huella ambiental. Producción de citrus y derivados. Optimización de procesos.

Recibido: 04 junio 2018

Aceptado: 24 abril 2019

Publicado: 03 junio 2020

Copyright: © 2020 Iñigo Martínez y Arena. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo una licencia [Creative Commons Atribución \(CC BY\)](#), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones, siempre que se acredite la fuente original.

Financiación: Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino.

Publicado por:



Resumo

Atualmente, há um crescimento na demanda global por produtos cítricos e derivados, cujos requisitos incluem regulamentos de qualidade ambiental. Nesse sentido, a pegada ambiental do produto obtida a partir da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) e sua combinação com técnicas de otimização fornece uma ferramenta para identificar opções de melhoria no processo e definir os padrões de qualidade. No entanto, existem poucos estudos que aplicam a combinação de ambas as metodologias. O objetivo deste estudo é encontrar coincidências, diferenças e lacunas em artigos científicos existentes sobre a metodologia de ACV e sua aplicação para otimizar a produção de frutas cítricas e derivados. Para tanto, foi realizada uma revisão e seleção do material científico de acordo com as publicações que utilizaram a metodologia ACV, as técnicas de otimização e a combinação das duas metodologias. Em seguida, foram avaliados de acordo com as diretrizes da ISO 14040 e 14044, considerados produtos e função objetivo no caso de estudos de otimização. Nos resultados, observou-se a ausência dessas contribuições científicas para o setor agroindustrial cítrico na Argentina, alguns artigos não seguiram nenhuma diretriz sobre os requisitos das normas do produto (ISO 14025) e as variações metodológicas, geraram resultados diferentes, o que dificulta a comparação entre os estudos que aplicam a ACV, portanto, considera-se necessário que os trabalhos subsequentes sigam uma certa linha metodológica que permita sua comparação e, por sua vez, aumente a investigação da aplicação dessa ferramenta combinada com técnicas de otimização à agroindústria cítrica na Argentina.

Palavras-chave: Pegada ambiental. Produção de cítrico e derivados. Otimização de processos.

Abstract

Currently, there is a growth in world demand for citrus products and by-products, whose requirements include environmental quality regulations. In this sense, the Environmental Product Footprint obtained from the methodology of life cycle assessment (LCA) and its combination with optimization techniques provides a tool to identify improvement options in the process and set quality standards. However, there are few studies that apply the combination of both methodologies. The goal of this study to find coincidences, differences and gaps in scientific articles about the LCA application in optimizing the production of citrus and its derivatives. Therefore, a review and selection of the scientific material was carried out according to publications that used the LCA methodology, optimization techniques and the combination of both methodologies. The studies were evaluated according to the guidelines of ISO 14040 and 14044, the considered products and the objective function in the case of optimization studies. In the results, we could observe a lack of these scientific contributions for the citrus industry of Argentina, some articles did not follow any guidelines about the rules of the product requirements (ISO 14025), and the methodological variations, generate different results that do not allow for comparisons between studies that apply the LCA, so it is necessary to follow a certain methodological line in the future, that allows the comparison and increase the research about the application of the LCA tool combined with optimization techniques applied to citrus agroindustry in Argentina.

Keywords: Environmental footprint. Citrus fruits and by-products production. Process optimization.

1. INTRODUCCIÓN

La agroindustria citrícola, en especial el cultivo de limón, fue seleccionado entre los cinco principales agroexportadores de la Argentina, definiéndose entre los criterios de selección, la pertenencia a una economía regional, con generación de mano de obra, incorporación de valor agregado e insumo integrante de otras cadenas de suministro (Basso, Pascale Medina y De Obschatko 2013).

En la actualidad, es creciente la demanda mundial de productos cítricos agrícolas e industrializados que cumplan con parámetros de calidad e inocuidad, como también exigencias sobre las características de su proceso productivo en todas sus etapas desde una perspectiva ambiental. En este sentido, existen convenciones internacionales que fijan pautas y/o estándares de calidad para dichos productos, como lo es la huella ambiental (Komives y Jackson 2014). La clave principal es determinar el desempeño ambiental de las diversas actividades productivas que involucren la producción de cítricos dentro de estándares que satisfagan no solo criterios internacionales de sostenibilidad sino condiciones convenientes para las políticas de producción nacional argentina.

Estos regímenes se comenzaron a implementar, ya que hace algunos años se descubrió, que el sector agroalimentario es el que más contribuye al impacto ambiental por agotamiento de recursos, degradación de tierras y emisiones a los distintos ecosistemas. En especial, por el gran consumo de agua dulce para riego, y la producción y uso de fertilizantes, que contribuye al calentamiento global a partir de emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones al agua por lixiviación de nitratos y potasio (Beccali et al. 2010).

Por lo tanto, estimar la huella ambiental de producto permite obtener una medida del comportamiento ambiental o perfil ambiental en todo su ciclo de vida. Es decir que, es un indicador multicriterio que abarca una importante cantidad de categorías de impacto ambiental y además puede utilizarse como criterio de admisión o rechazo de productos que ingresan al mercado exterior.

Para obtener la huella ambiental se utiliza el análisis de ciclo de vida (ACV), una metodología que se encuentra estandarizada en las series ISO 14040 y 14044, donde se establece una estructura de trabajo para la determinación de perfiles ambientales. El ACV se basa en la identificación, cuantificación y caracterización de los impactos ambientales asociados a las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, lo que permite obtener un diagnóstico, que sirve de guía para la toma de medidas con el fin de conservar los recursos energéticos y materias primas, mitigar la cantidad de residuos originados a partir del producto, plantear un manejo sustentable de los mismos y conocer las consecuencias ambientales en relación al uso de un producto o servicio (Romero Rodríguez 2003).

Entre los años 2005 y 2019 las investigaciones en fruticultura han estado en constante crecimiento, muchas de ellas se han referido a la aplicación del ACV en la producción de cítricos como fruta fresca (Coltro et al. 2009; De Luca et al. 2014; Lo Giudice et al. 2013; Nicolò et al. 2017; Pergola et al. 2013; Ribal et al. 2017; Sanjuan et al. 2005) y también en la caracterización de huellas ambientales como la huella de carbono (Yan et al. 2016) mientras que otros se han enfocado en determinar mejoras en el desempeño ambiental de la producción de derivados cítricos

como jugo, cáscara y aceites (Beccali et al. 2010; Dwivedi, Spreen y Goodrich-Schneider 2012; Knudsen et al. 2011).

Los países involucrados en dichas publicaciones fueron Italia, Estados Unidos, España, Brasil y China. A pesar de que Argentina concentra una gran producción e industrialización de cítricos, no existen publicaciones referidas a la aplicación del ACV en este sector.

Por otro lado, el ACV puede ser acoplado también con técnicas de optimización multiobjetivo lo que proporciona una poderosa herramienta para identificar opciones de mejora en el diseño y operación de procesos. Este enfoque ha ganado interés en los últimos años (Gebreslassie et al. 2010; Guillén-Gosálbez y Grossmann 2009; Mele et al. 2011) y constituye una herramienta de toma de decisiones potencialmente poderosa para identificar opciones sostenibles para el futuro (Azapagic 1999; 1999; Azapagic y Clift 1999b).

No obstante, se han encontrado escasos estudios que combinen el ACV con técnicas de optimización como método para generar mejoras de procesos de producción frutícola y una gran ausencia de contribuciones científicas relacionadas con su aplicación a la industria cítrica en Argentina.

Por lo anteriormente expuesto, este estudio se plantea con el objetivo de encontrar coincidencias, diferencias y lagunas en los artículos científicos más recientes acerca de la metodología de análisis de ciclo de vida y su aplicación en la optimización de producción de cítricos y derivados.

1.1. Proceso de producción de citrus y derivados

El proceso productivo de citrus y derivados más representativo utilizado en el norte de la Argentina se esquematiza en la Fig. 1.

La producción primaria de fruta fresca consiste en la plantación, aplicación de agroquímicos, poda y desmalezado, lo que implica a su vez, el uso de maquinarias, combustible y mano de obra.

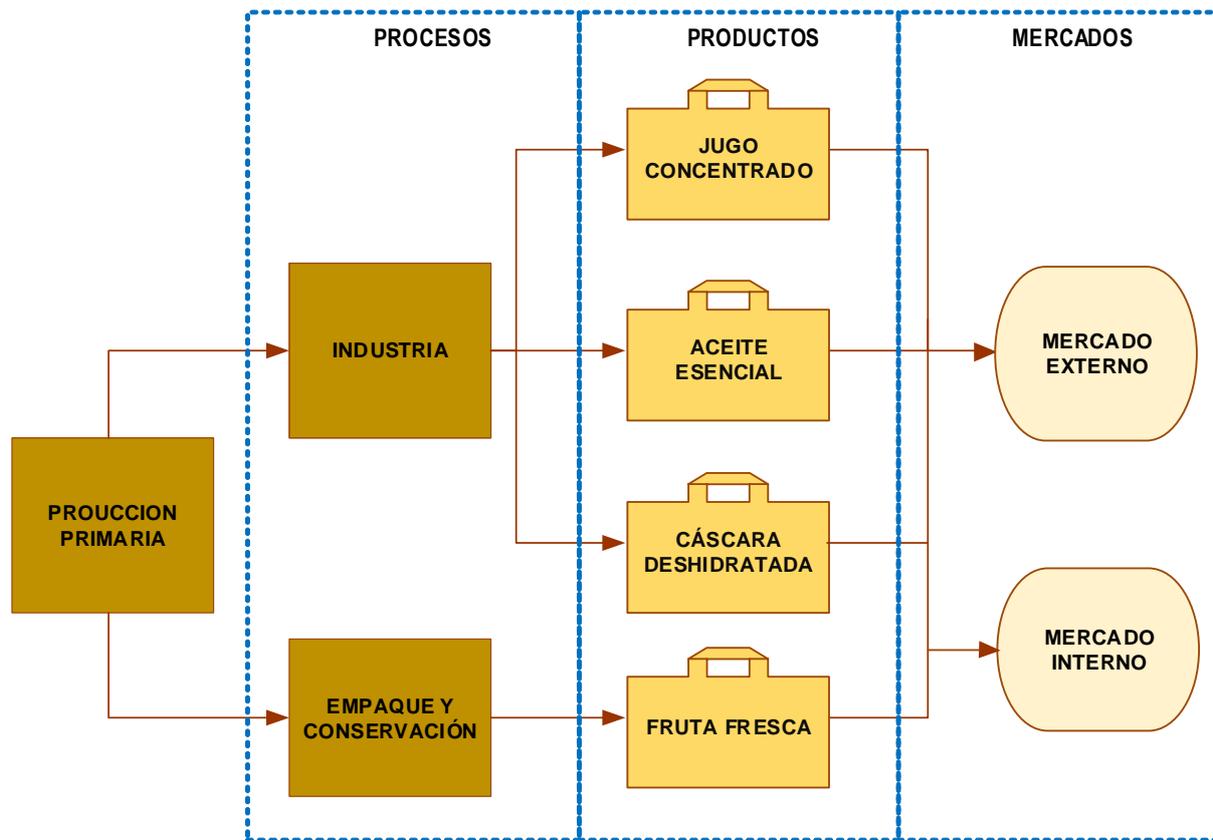
A continuación, la primera etapa se subdivide en dos etapas posteriores que abarcan la industrialización de fruta y empaque directo para comercialización y consumo.

Más del 70% de la producción de cítricos de la Argentina se destina a la industria, para la elaboración de jugo concentrado, cáscara deshidratada y aceite esencial.

La industrialización de los cítricos consta de tres etapas:

- a) Extracción de aceite de fruta fresca;
- b) Extracción de jugo de fruta fresca;
- c) Lavado y secado de cáscara.

Figura 1. Diagrama del proceso productivo de cítricos y derivados.



Luego de la clasificación de la fruta, se realiza la extracción de aceites en mesas extractoras, mediante punciones de la superficie de la fruta y posterior rociado con agua, para evitar pérdidas de aceite a la atmosfera, la emulsión obtenida se separa en dos fases, en donde la fase liviana es concentrada en máquinas pulidoras y refinadoras, para obtener un aceite de mayor calidad y la fase pesada se trata como efluente. A continuación, se realiza la extracción del jugo de las frutas raspadas, separándolo de pulpa, semillas y cáscara, para luego ser concentrado y pasteurizado. Por último, las cáscaras y semillas obtenidas en la etapa de extracción son lavadas en el sector de lavado y finalmente se secan en secadores hasta obtener una humedad final, muy baja. (Díaz et al. 2017).

2. METODOLOGÍA DE ANALISIS

2.1. Búsqueda bibliográfica

La búsqueda de material científico se llevó a cabo mediante una revisión de diferentes artículos académicos.

2.2. Estrategia

Se realizó la búsqueda del material académico mediante los siguientes buscadores y bases de datos: Google Scholar (Google [sin fecha]), Science Direct (Elsevier [sin fecha]) y Springer Link (Springer Nature [sin fecha]).

Se determinaron tres niveles de búsqueda del material, que se relacionan entre sí como se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Diagramas de Venn de los tópicos de información encontrados.



- a) Primera etapa de búsqueda (conjuntos)
- Publicaciones referidas a la aplicación de técnicas de optimización en los procesos productivos y cadena de suministro de frutas y derivados.

- Publicaciones referidas a la aplicación de la metodología de ACV, en cadenas de suministro de frutas y derivados.
 - Publicaciones referidas a los avances en sustentabilidad de cadenas de suministro de cítricos.
- b) Segunda etapa búsqueda (intersecciones)
- Publicaciones referidas a la optimización de la cadena de suministro de cítricos y derivados.
 - Publicaciones de la aplicación de ACV de cadena de suministro de cítricos y derivados cítricos.
 - Publicaciones sobre la optimización de la cadena de suministro de frutas y derivados en base al ACV.
- c) Tercera etapa de búsqueda (intersección de las intersecciones)
- Publicaciones referidas a la optimización de la cadena de suministro cítrica en base al ACV.

Como estrategia de búsqueda se utilizaron palabras claves previamente seleccionadas: *life cycle assessment y optimization y green supply chain y citrus o citrus industry o citrus supply chain o citrus process o fruit supply chain*, realizando una búsqueda sistemática, en todas sus combinaciones posibles, en los campos: “título”, “resumen” y “palabras clave” para todos los años hasta 2019 y *journals* como medio de publicación, entre ellos los más utilizados fueron: *Environmental management, Journal of cleaner production, The International Journal of Life Cycle Assessment, Computers and Chemical Engineering, Computer Science y Environmental Science*, existiendo una amplia variedad de revistas y editoriales, para los documentos encontrados. Se analizaron, además, referencias bibliográficas de los artículos encontrados para ampliar la búsqueda de información sobre la temática.

2.3. Criterios de selección

Para seleccionar la bibliografía adecuada se revisaron primero los *abstracts*, de manera de identificar el tipo de información contenida en cada uno de ellos, que se refieran al ACV y su aplicación en la optimización de producción de cítricos y derivados.

Se seleccionaron publicaciones sobre la producción de limones y naranjas frescos, y también aquellas que se referían a la producción de algunos de sus derivados como jugo, aceites, cáscaras y residuos cítricos.

A partir de la búsqueda inicial se seleccionaron aproximadamente 70 estudios, correspondientes al total de las etapas de búsqueda. Se excluyeron de la selección aquellos artículos y documentos publicados en revistas que carezcan de índices de impacto.

En la primera etapa (A), un 48% de los estudios corresponde a la *aplicación de la metodología de ACV, en cadenas de suministro de frutas y derivados*, 38% a *avances en sustentabilidad de cadenas de suministro de cítricos* y un 15% a la *aplicación de técnicas de optimización en los procesos productivos y cadena de suministro de frutas y derivados*.

En la segunda etapa (B) se encontraron un 74% de estudios referidos a *Aplicación de ACV de cadenas de suministro de cítricos y derivados cítricos*, un 26% correspondiente a *Optimización de la cadena de suministro de cítricos* y no se encontraron artículos de *Optimización de la cadena de suministro de frutas y derivados en base al ACV*.

En la tercera etapa (C) de búsqueda no se encontraron artículos referidos a la *Optimización de la cadena de suministro cítrica en base al ACV*.

2.4. Evaluación de datos

Se consideraron para el análisis, los artículos relativos a las etapas B y C de búsqueda, que hacen referencia a productos cítricos y derivados, y también un breve análisis de la aplicación de optimización de procesos productivos en base al ACV.

Las publicaciones se han evaluado principalmente según la metodología estandarizada que expone la ISO 14040 (2006a) y 14044 (2006b). Estos lineamientos no se enfocan en un proceso o producto en particular, sino que describen el método de manera genérica.

Se tuvieron en cuenta: tipo de estudio, año, zona geográfica, objetivos, producto considerado, fuente de datos, unidad funcional, asignación de cargas ambientales, categorías de impacto, metodología de análisis de impacto y aplicación de análisis de sensibilidad. También, se analizó si se realizaban análisis de costo de ciclo de vida (*Life Cycle Costing* O LCC), si se exponían los datos de inventarios, si se realizaban balances energéticos y por último si los procesos contaban con disposición final de residuos.

Finalmente, se analizaron artículos de optimización de la producción de cítricos y artículos referidos a optimización de procesos productivos en base al análisis de ciclo de vida en los cuales se evaluaron: producto considerado, función objetivo, restricciones y recomendaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción de cítricos y derivados

Se analizaron 15 artículos representativos relacionados con casos de estudio de frutas cítricas y derivados, pertenecientes a diferentes zonas geográficas, entre ellas: Italia, Estados Unidos, España, Brasil y China. A pesar, de que la mayor producción de fruta cítrica fresca a nivel mundial

se concentra en los países de China y Brasil, la gran mayoría de las publicaciones referidas a cítricos, analizadas en este artículo, pertenecen a Italia y Estados Unidos.

Los documentos revisados fueron publicados entre los años 2005 y 2019, existiendo un incremento de publicaciones en el año 2013, sobre casos de estudio de cítricos.

Continuando con el análisis basado en los lineamientos de la norma ISO 14040 (2006a) y 14044 (2006b), todos los estudios definieron objetivo y alcance en su procedimiento, con la posterior recolección de datos y armado de inventario respectivos. A su vez, un 80% de los trabajos expusieron los datos de inventario en el documento.

Por otro lado, se puede observar que los estudios tenían algunos objetivos en común como la determinación de un perfil ambiental en la producción de frutas, evaluar los impactos ambientales de los diferentes productos, como así también evaluar la sostenibilidad y la ecoeficiencia tanto de los productos como de los procesos. Además, algunos autores establecieron, objetivos más específicos, como por ejemplo: realizar propuestas de mejoras en base a la evaluación realizada con la metodología de ACV, describir un marco de referencia para realizar ajustes de las aplicaciones del ACV en la producción de frutas, cuantificar costos económicos de estrategias de gestión ambiental (Negro et al. 2017), desarrollar una línea base de gases de efecto invernadero en la producción de cítricos (Dwivedi, Spreen y Goodrich-Schneider 2012), caracterizar productores de citrus (Coltro et al. 2009), identificar los hotspots ambientales en la cadena de productos y comparar los impactos ambientales de la producción orgánica vs la producción convencional (Knudsen et al. 2011).

La mayoría de los artículos no realiza análisis de sensibilidad de los resultados, ni tampoco se presentan alternativas de disposición de residuos o tratamientos de efluentes, entre los documentos citados en este trabajo.

3.1.1. Características principales de los estudios revisados

En la Tabla 1, se exponen las características más importantes de los artículos relacionados con casos de estudios aplicados a cítricos y derivados.

Tabla 1. Artículos de la aplicación del ACV a la producción de cítricos y derivados.

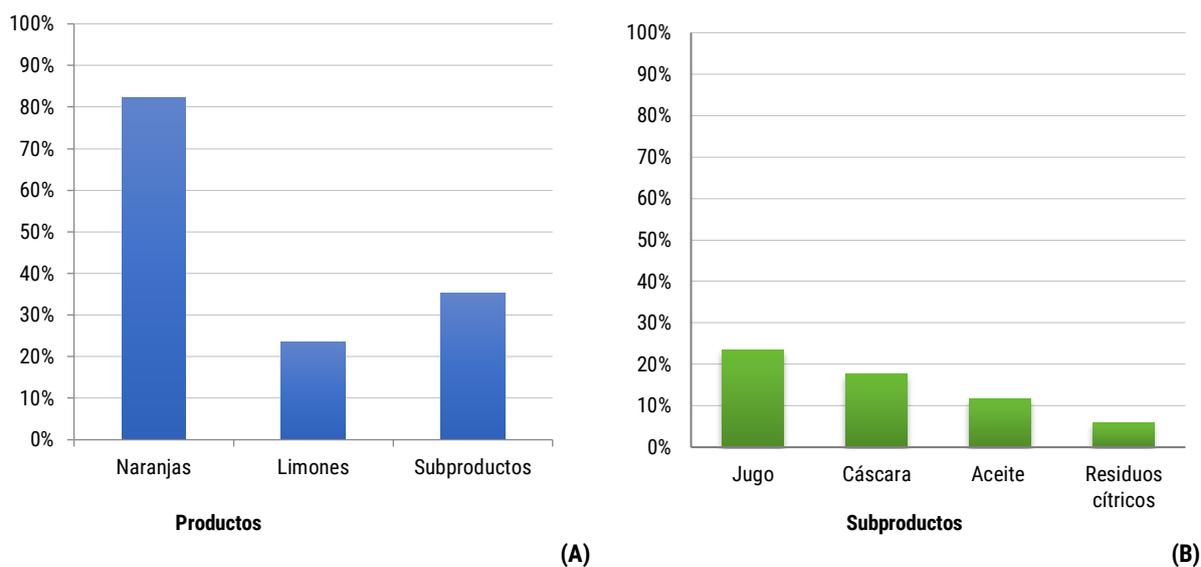
Referencia	País	Alcance	Producto considerado	Fuente de datos	Unidad funcional	Asignación de cargas	Metodología de Análisis de Impacto
(Sanjuan et al. 2005)	España	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios y Secundarios	Másica (kg)	-	CML, POCP, WMO y USES 2.0
(Beccali et al. 2009)	Italia	Cuna a la tumba	Naranjas, Limones y derivados (jugo, aceite y cáscara)	Primarios y secundarios	Másica (kg)	Másica y económica	IPCC 2001 (GWP100) y CML 2 2000
(Coltro et al. 2009)	Brasil	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios	Másica (kg)	-	- (El trabajo considera solo hasta el LCI)
(Ribal et al. 2009)	España	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios y Secundarios	Másica (kg)	Másica	CML 2001
(Beccali et al. 2010) *	Italia	Cuna a la puerta	Naranjas, Limones y derivados (jugo, aceite y cáscara)	Primarios y secundarios	Másica (kg)	Másica y económica	IPCC 2001 (GWP100) y CML 2 2001
(Knudsen et al. 2011)	Brasil	Cuna a la puerta	Naranjas y jugo de naranjas	Primarios y Estadísticos	Másica (kg) Volumétrica (L)	(Económica para análisis de sensibilidad de residuos de naranja)	IPCC 2007, IMPACT 2002+ y EDIP 1997
(Dwivedi, Spreen y Goodrich-Schneider 2012)	EEUU	Cuna al minorista	Jugo de naranjas	Secundarios	Volumétrica (L)	-	TRACI database
(Lo Giudice et al. 2013)	Italia	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios	Másica (Kg)	-	IMPACT 2002
(Pergola et al. 2013)	Italia	Cuna a la puerta	Naranjas y limones	Primarios	Másica (kg) Superficie (ha)	-	CML 2001
(Pourbafrani et al. 2013)	Canadá	Cuna a la puerta	Productos derivados de residuos cítricos	Primarios y Secundarios	Energética (MJ)	Económica y energética	IPCC 2006
(De Luca et al. 2014)	Italia	Cuna a la puerta	Naranjas y limones	Primarios y Secundarios	Superficie (ha)	-	Eco indicador 99 y ReCiPe method
(Yan et al. 2016)	China	Cuna al minorista	Naranjas	Primarios	Másica (kg)	-	PAS 2050 -1
(Ribal et al. 2017)	España	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios	Superficie (ha) Másica (kg)	-	CML 2001 y USE tox
(Negro et al. 2017)	Italia	-	Cáscara de Naranjas	Primarios y Secundarios	Másica (Kg)	-	IPCC 2007, EUTREND method, ECO tox model y CML 2002
(Nicolò et al. 2017)	Italia	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios y estimados	Másica (kg)	-	EPD 2008 method
(Nicolò et al. 2018)	Irán	Cuna a la puerta	Naranjas	Primarios	Superficie (ha)	-	CML 2001 y USE tox
(Ribal et al. 2019)	España	Cuna al centro de distribución	Naranjas	Primarios y secundarios	Másica (kg)	Económica	PAS 2050 -1

Nota: * Análisis de sensibilidad y escenarios de mejora de Beccali et al. (2009).

Los gráficos de las Figura 3 muestran el porcentaje de estudios que se refieren a los diferentes productos analizados en abscisas. Los documentos están vinculados a la producción de limones, naranjas y sus derivados (Fig. 3A).

Los autores que apuntaron a realizar la aplicación del ACV a la producción y uso de derivados a partir de limones y naranjas (Fig. 3B), se refirieron a: jugo, aceites, cáscara deshidratada y residuos cítricos.

Figura 3. A) Productos analizados; **B)** Derivados cítricos de los productos analizados.



Entre los productos analizados existe menor proporción de trabajos científicos referidos a la producción de limón. Se puede observar que los artículos académicos evaluaron en mayor medida la producción de jugo de naranjas, como derivado cítrico. Por otro lado, un porcentaje pequeño estudió también la producción de aceites esenciales, cáscara deshidratada y los residuos cítricos como subproductos de la agroindustria cítrica.

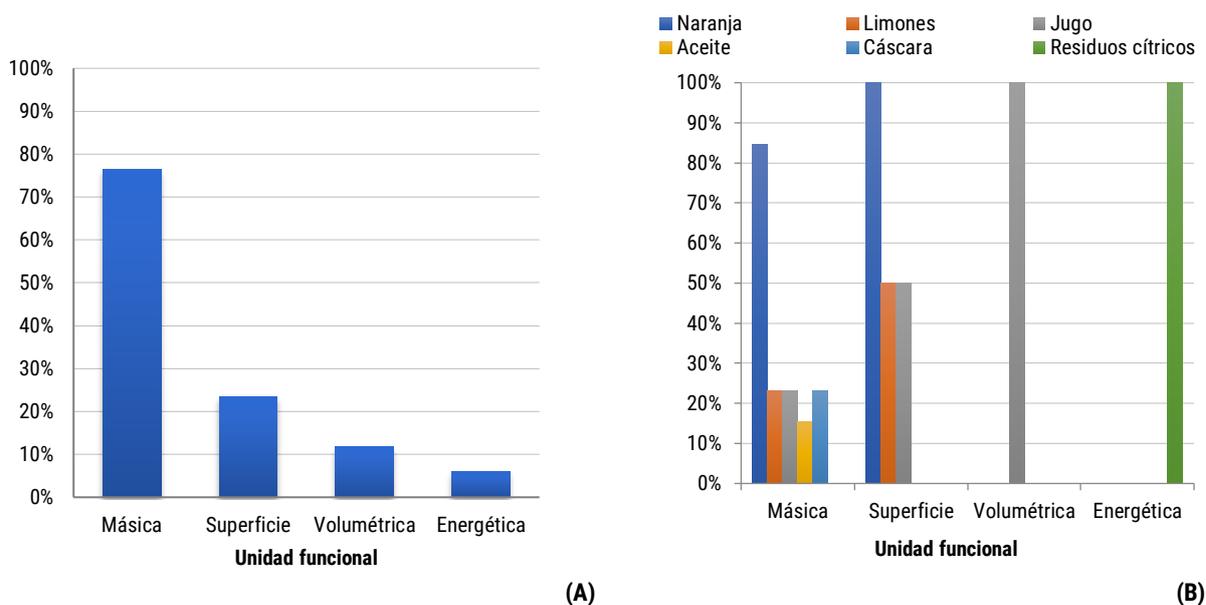
3.1.2. Unidad funcional

Se analizaron las unidades funcionales utilizadas en los trabajos, de lo que se pudo observar que un 76% de ellos adoptaron unidades funcionales (UF) másicas (Fig. 4A), en kg de producto, ya sea cítricos o sus productos derivados.

También, se realizó una comparación entre las UF adoptadas según el producto considerado (Fig. 4B). Se pudo observar, que para la producción de naranjas, limones y jugo cítrico existe una variación en las UF adoptadas y en muchos casos, se utilizaron, más de una UF.

Por otro lado, según los resultados del análisis de sensibilidad de Beccali et al. (2010) en general la UF elegida para el aceite generaba siempre un mayor impacto que la UF del jugo natural.

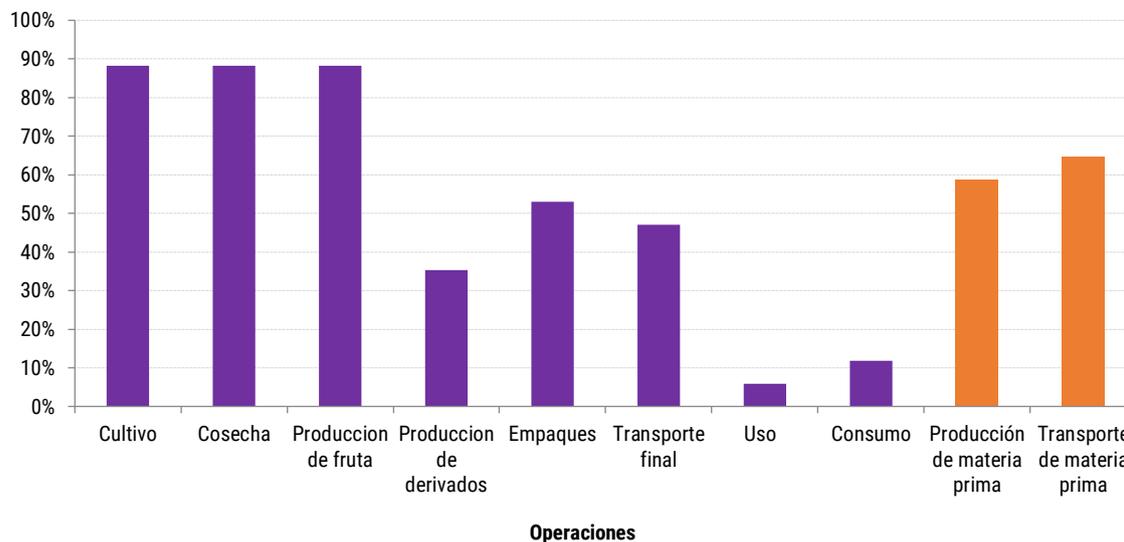
Figura 4. A) Unidades funcionales; B) Unidades funcionales por producto.



3.1.3. Alcance de los estudios

Se definieron diferentes límites de los sistemas adoptados en cada caso. La mayor parte de los trabajos, se realizaron de la “cuna a la puerta”.

Figura 5. Operaciones unitarias del proceso de producción de cítricos y derivados.



El mayor porcentaje de los estudios (Fig. 5), comenzó el análisis desde la etapa de cultivo y culminó en el proceso de empaque de fruta fresca después de la cosecha o hasta el empaque de productos derivados a la salida de la fábrica. Sin embargo, existen más estudios cuyo sistema abarcó la producción de fruta que la producción de derivados. Se consideró solo un proceso de empaque, teniendo en cuenta allí, todos los estudios que incorporaban esta operación unitaria en su sistema, es decir, empaque de fruta fresca y empaque de productos derivados.

Muchos estudios tuvieron en cuenta la producción de materia prima y transporte, en cada paso, sobre todo en las fincas, donde algunos autores consideraron la producción de agroquímicos, maquinaria agrícola, electricidad, etc. mientras que otros, delimitaron su sistema solo a partir del uso y aplicación de estos insumos.

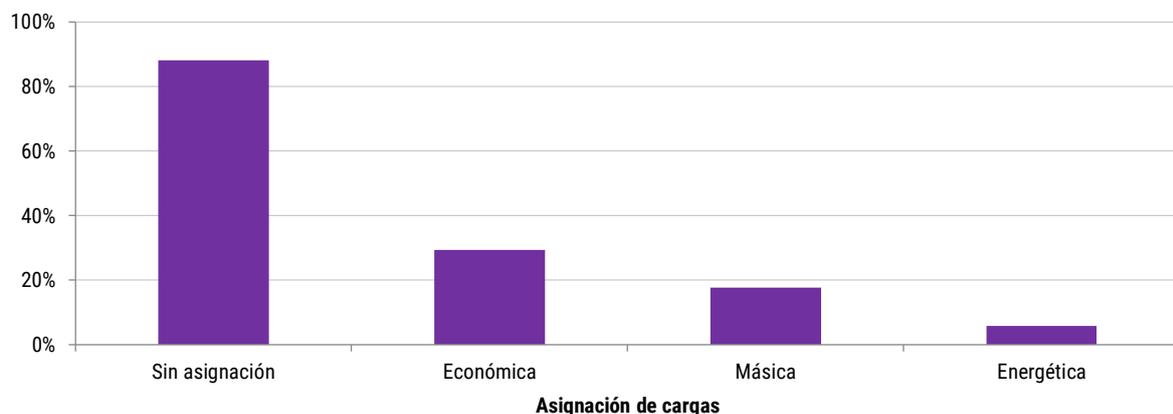
También se tuvo en cuenta la etapa de transporte y distribución final, tanto de fruta fresca como derivados, a los minoristas y finalmente las etapas de uso y consumo de los productos finales.

Cerutti et al. (2014) destacaron la importancia de considerar la etapa de vivero dentro del análisis y evaluar sistemas perennes de diferente manera que los cultivos anuales, ya que, si se considera solo el período productivo, los impactos ambientales del producto final se subestiman considerablemente.

3.1.4. Proceso de asignación de cargas ambientales

Como se puede ver en la Figura 6, un 88% de los autores no utilizaron procedimientos de asignación de cargas, la mayoría coincide con aquellos que sólo tomaron el sistema hasta la producción de cítricos. Por otro lado, en un 29% de los artículos se eligió realizar asignación económica y un 18% una asignación másica, que se debe a aquellos autores que analizaron el sistema desde la producción de cítricos hasta la puerta de la fábrica, en la producción de derivados. Sólo uno de los artículos revisados utiliza una asignación energética.

Figura 6. Asignación de cargas adoptadas.

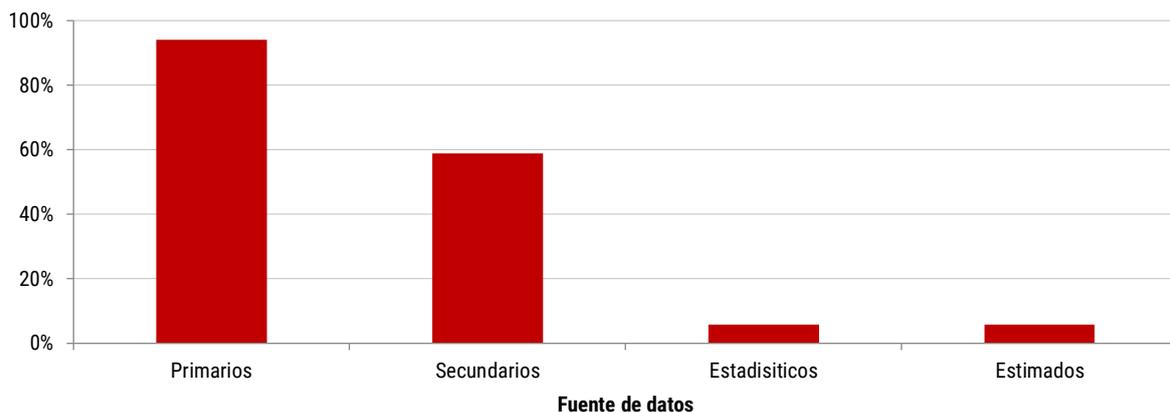


En todos los casos, el resultado final depende del método de asignación elegido (Beccali et al. 2010). En general, se recomienda evitar las asignaciones entre grados de productos, pero existe una diversificación de la oferta para diferentes tipos de productos que provienen de la misma finca, en donde parte de la fruta es destinada al mercado de productos frescos y otra parte al procesamiento industrial, para la obtención de derivados (Cerutti et al. 2014).

3.1.5. Proceso de asignación de cargas ambientales

El mayor porcentaje de datos se obtuvo mediante entrevistas a proveedores en el sector industrialización y consultas a expertos en las fincas citrícolas. Los datos secundarios se extrajeron de trabajos científicos y bases de datos (Fig. 7).

Figura 7. Fuentes de datos.



Se carece de datos sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de las fincas, y datos del ciclo de vida completo (Pergola et al. 2013). Además, la calidad de los datos se vio afectada por la incertidumbre (Beccali et al. 2010).

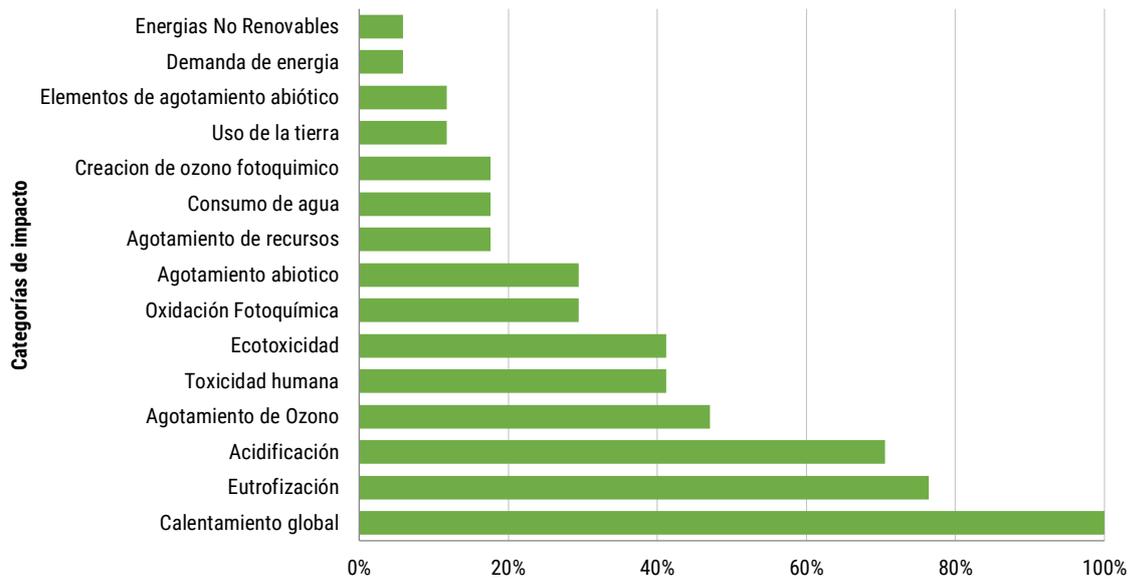
Se realizaron análisis de sensibilidad en unos pocos estudios. Algunos concluyeron que el análisis de sensibilidad confirmó la solidez de los resultados, pero también destacaron que se necesitan esfuerzos adicionales para recopilar mejores datos de inventario sobre algunas tecnologías (Negro et al. 2017).

Por otro lado, algunos autores argumentaron que no pudieron realizar un análisis de sensibilidad debido a la falta de un modelo que explique la relación entre algunos parámetros como, por ejemplo, el uso de fertilizantes y la productividad de la naranja en las fincas en el caso de Dwivedi et al. (2012).

3.1.6. Categorías de impacto

Las categorías de impacto más analizadas fueron las de calentamiento global, eutrofización y acidificación (Fig. 8). Estas dos últimas están más relacionadas con el uso de fertilizantes en la etapa de campo. Se puede observar que existe un bajo porcentaje de artículos que analizaron las categorías de “uso de la tierra” y “consumo de agua”, lo que se debería tener en cuenta en próximos estudios.

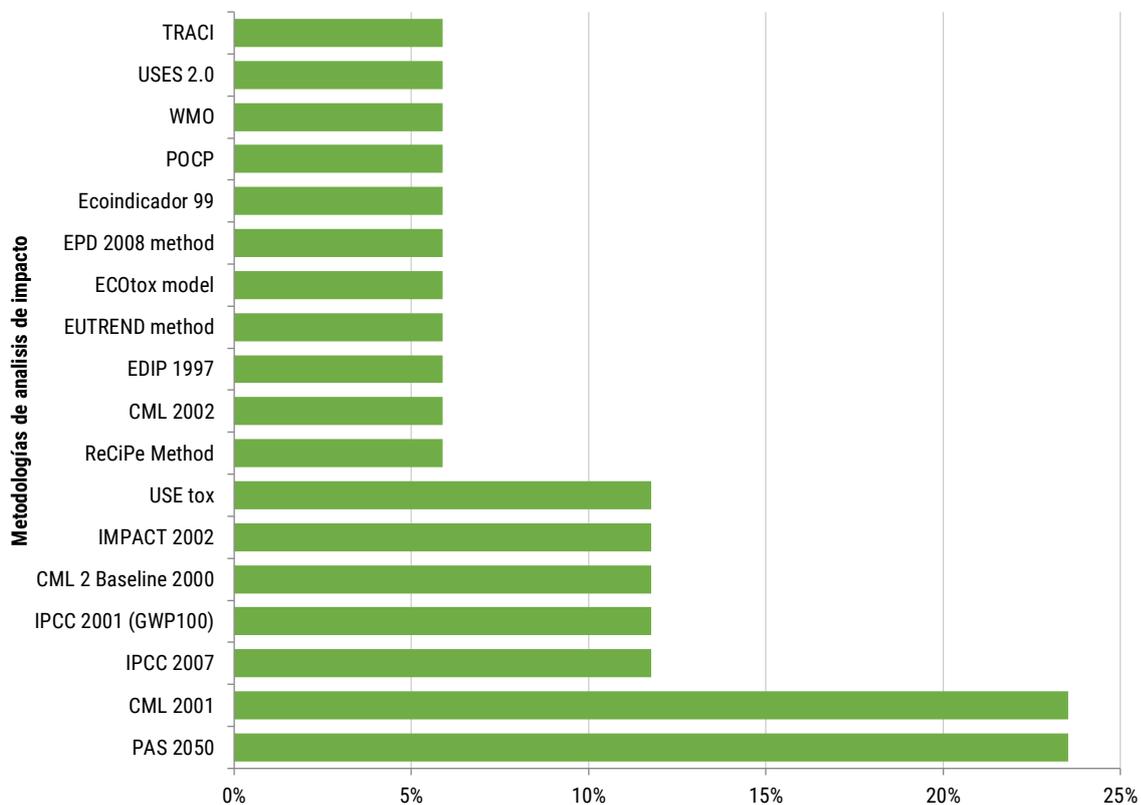
Figura 8. Categorías de impacto más analizadas.



3.1.7. Metodologías de análisis de impacto

Se utilizaron diferentes metodologías de análisis (Fig. 8), según las categorías de impacto estudiadas, obteniéndose diferentes resultados en cada caso. Las más empleadas fueron PAS 2050, CML 2001 e IPCC (2007 y 2001).

Figura 9. Metodologías de análisis de impacto adoptadas en los estudios.



Se realizaron comparaciones entre estudios de diferentes países para un mismo cultivo en Dwivedi et al. (2012) y entre diferentes cultivos para un mismo país y una misma categoría de impacto en Yan et al. (2016). Se recomienda validar los resultados y realizar comparaciones utilizando recomendaciones de EPDs (Cerutti et al. 2014), como se realizó en el trabajo de Nicolò et al. (2017).

Por otro lado, se combinaron diferentes metodologías para dar un mejor resultado de ecoeficiencia, por ejemplo, la sistematización del ACV junto con el Análisis Envoltante de Datos (AED) generó una metodología útil para determinar escenarios productivos agrarios más eco-eficientes (Ribal et al. 2009).

Por último, el análisis integrado de la aplicación de métodos LCA y LCC a cultivos perennes mejora la interpretación de los resultados de la evaluación de impacto desde el punto de vista ambiental y económico (De Luca et al. 2014).

3.2. Optimización de la cadena de suministro de cítricos y derivados

Las técnicas de optimización se aplican a diversos problemas de decisión, para determinar una solución que sea elegida como la mejor opción entre un conjunto de alternativas, bajo ciertos criterios (Ehrgott 2005).

En los procesos industriales, se utiliza la optimización para satisfacer una dada cantidad de problemáticas, cuya solución consiste tradicionalmente en maximizar o minimizar una sola función objetivo, que refleja un compromiso entre todos los objetivos propuestos (Ngatchou, Zarei y El-Sharkawi 2005). Las metodologías que se utilizan son modelos matemáticos que involucran una cierta cantidad de variables continuas o no, interrelacionadas en los procesos de producción.

Los balances de masa y energía, y las ecuaciones de diseño, conforman las restricciones dentro del modelo matemático (Pieragostini, Mussati y Aguirre 2012). Si el conjunto de variables enteras está vacío y las restricciones y funciones objetivo son lineales, entonces representan un problema de Programación Lineal (LP); Si el conjunto de variables enteras es no vacío y las funciones y restricciones objetivas son no lineales, se trata de una programación no lineal mixta entera (MINLP). Por último, la programación lineal de enteros mixtos (MILP) incorpora solo números enteros y variables lineales (Azapagic y Clift 1999a).

Abordar la incertidumbre de los parámetros en los modelos de optimización es importante en la planificación de producción y logística agroalimentaria, utilizando enfoques de optimización robustos y estocásticos (Rocco y Morabito 2016).

En esta sección, la búsqueda de artículos se realizó utilizando las palabras clave: “*optimization*” y “*citrus*” o “*citrus supply chain*”, para los campos “título”, “resumen” y “palabras clave”, en

todas las combinaciones posibles, para cualquier año hasta 2019 y *journals* como medio de publicación. Se consideraron estudios de programación matemática aplicada al proceso y cadena de suministro de cítricos y derivados. Estos estudios pertenecen a los países de Irán, Brasil, y Pakistán.

Dentro de las funciones objetivo adoptadas por los autores, la mayoría (72%) fueron de carácter económico apuntando a minimizar el costo del producto o maximizar el beneficio por venta. Mientras que aquellas de carácter ambiental (28%) apuntaron a minimizar los impactos ambientales y las emisiones.

Las técnicas de optimización aplicadas en algunos casos fueron del tipo LP, y en otros MILP, con variables de decisión como: producción, inventario, área cultivada, distribución de productos, demanda y almacenamiento. Se utilizaron modelos robustos considerando la incertidumbre de los parámetros (Munhoz y Morabito 2013) y se sugirió extender el modelo usando programación robusta, estocástica y modelado difuso (Roghanian y Cheraghalipour 2019).

3.3. Optimización de la cadena de suministro cítrica en base al ACV

En los últimos años existió una tendencia a mejorar los procesos según criterios económicos y ambientales, debido a la gran variación de la demanda, los costos unitarios de producción y problemáticas propias de los procesos productivos, sumado a las exigencias de las legislaciones medioambientales presentes.

En este escenario, el ACV se muestra como una herramienta capaz de detectar los problemas de diseño desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, esta metodología no puede generar soluciones o alternativas de mejora a las problemáticas identificadas (Gebreslassie et al. 2009).

Es por ello que combinando el ACV con herramientas de optimización se pueden evaluar las soluciones propuestas desde el punto de vista medioambiental.

Con este criterio, se realizaron búsquedas de artículos académicos que utilizan la combinación de estas metodologías. Las palabras clave aplicadas en las bases de datos fueron: "*life cycle assessment*" y "*optimization*" y "*citrus*" o "*citrus industry*" o "*citrus process*" o "*citrus supply chain*" o "*fruit supply chain*" en todas sus combinaciones posibles, en los campos de búsqueda de: título, resumen y palabras claves, publicados en todos los años hasta 2019, para artículos de revistas como medio de publicación. Mediante esta estrategia se encontraron escasos estudios orientados al sector productivo de frutas, pero sin resultados para la producción de cítricos y derivados, que integren ambas metodologías para mejorar el desempeño económico y ambiental, de dicho sector productivo.

3.4. Optimización de procesos en base al análisis de ciclo de vida

Mediante las palabras clave: "*life cycle assessment*" y "*optimization*", se encontraron artículos sobre técnicas de optimización de procesos basados en el ACV. Se seleccionaron algunos de ellos en base a la integridad y calidad de la información expuesta (Tabla 2):

- a) ¹ MO: *Multiobjective*
- b) ² MILP: *mixed-integer linear programming*
- c) ³ MINLP: *mixed-integer nonlinear programming*
- d) ⁴ LP: *Lineal Programming*

Tabla 2. Artículos que combinan el ACV con técnicas de optimización de procesos.

Referencia	Objetivo	Alcance	Producto/ Proceso considerado	Metodología de Análisis de Impacto	Modelo Matemático	Software para optimización
(Azapagic 1999; Azapagic y Clift 1999b; 1999a)	Minimizar Impactos ambientales y costos vs Maximizar la producción	Cuna a la puerta y Cuna a la tumba	Productos derivados del Boro y Desulfuración de gas	Metodología tomada de literatura (Heijungs et al, 1992)	¹ MO: ⁴ LP/ ² MILP/ Pareto	GAMS y XPRESS-MP
(Guillén-Gosálbez y Grossmann 2009)	Minimizar Impactos ambientales y costos	Cuna a la Puerta	Hidrodesalquilación de tolueno.	Eco-indicador 99.	¹ MO: ² MILP	GAMS
(Gebreslassie et al. 2009; 2010)	Minimizar Impacto ambiental y costo total anual	Cuna a la puerta y Cuna a la tumba	Sistema de enfriamiento y Ciclos de enfriamiento por absorción	Eco-indicador 99.	Programación no lineal (NLP) bi-criterio y ¹ MO: ³ MINLP	GAMS
(Grossmann y Guillén-Gosálbez 2010)	Minimizar Impactos ambientales y costos	Etapas de manufactura	Biocombustibles, Hidrogeno y químicos	Eco-indicador 99.	² MILP bi-criterio	GAMS
(Mele et al. 2011)	Maximizar el valor actual neto y minimizar el impacto ambiental.	Cuna a la Puerta	Caña de azúcar, azúcar, etanol+ Producción de etanol de caña	CML y Eco-indicador 99	² MILP	CPLEX/GAMS
(Azapagic et al. 2016)	Minimizar el potencial de calentamiento global y los costos del ciclo de vida	Cuna a la tumba	Tecnologías para generación de electricidad	Metodología tomada de literatura (Heijungs et al, 1992)	¹ MO: ² MILP	Web-HIPRE
(Zhao, Ercan y Tatari 2016)	Minimizar y optimizar el LCC, las emisiones de GEI, los costos e impactos de la contaminación del aire en conjunto.	Cuna a la tumba	Flota de camiones de reparto comercial en los Estados Unidos	Modelo GREET	¹ MO: ⁴ LP	-
(Li et al. 2018)	Maximizar el volumen y control de aguas de lluvia; minimizar el costo e impacto ambiental.	Cuna a la tumba	sistemas de recolección de agua de lluvia	CML 2001	¹ MO: Pareto	CPLEX/GAMS

A pesar de que no se encontraron estudios de este tipo para el sector cítrico, se analizaron los casos de estudio de la Tabla 2 que integran las metodologías optimización de procesos en base al ACV.

El alcance que tuvieron los trabajos analizados fue en un gran porcentaje de la ‘cuna a la tumba’ y de la ‘cuna a la puerta’.

Por otro lado, el método de evaluación de impacto más utilizado fue el de Eco-Indicador 99, teniendo en cuenta que muchos de los artículos fueron publicados hace varios años atrás, y dentro de las metodologías nuevas, se encuentra el método CML. Otro método utilizado actualmente es ReciPe, como en el estudio de Ostermayer et al. (2013) orientado a la renovación de edificios residenciales.

El enfoque más utilizado dentro de los artículos es la optimización multiobjetivo, que en el contexto del ACV y para la gestión del sistema medioambiental, ofrece un conjunto de alternativas para mejorar el sistema en lugar de una única solución óptima (Azapagic 1999). Los modelos matemáticos para formular estos problemas dependen de las variables involucradas, la mayoría de los trabajos analizados se formularon como MILP. En algunos casos, se aplicaron las soluciones de Pareto, tal es el caso de Mele et al. (2011) considerado como una herramienta valiosa para el problema de diseño y alternativas de proceso que conducen a mejoras ambientales.

Los objetivos más abordados en los estudios fueron: minimizar impactos ambientales, minimizar costos y maximizar la producción, simultáneamente.

Al igual que se concluyó en el trabajo de Pieragostini et al. (2012), se pudo observar que en muchos de los artículos se formuló una única función de impacto ambiental, que resultó de la agregación de las categorías de impacto ambientales, constituyendo la función objetivo ambiental. Sin embargo, un esquema alternativo, al enfoque de optimización multiobjetivo, se vio reflejado en el interés sobre la formulación de una única función objetivo de carácter económico, y el uso combinado de softwares de costo del ciclo de vida (CCV) y softwares de ACV.

Finalmente, los autores utilizaron diversos paquetes de software para la etapa de resolución del problema de optimización entre los cuales se destacó GAMS (Rosenthal 2007).

3.5. Análisis y recomendaciones finales

Según los artículos seleccionados que utilizaron la metodología de ACV aplicada a la producción de citrus, se puede observar que:

- a) Se encontraron más estudios relacionados con la producción de naranja y derivados de naranja, en especial jugo, como producto en estudio. Por lo tanto, se considera importante evaluar la producción de limón y sus derivados, así como también otras clases de frutas cítricas.
- b) La unidad funcional más adoptada en general por los autores, fue la unidad másica. Existe una gran variación de la UF para el jugo cítrico y para la producción de

naranja. Por otro lado, para la producción de limón, se adoptó, en mayor porcentaje, la UF másica y de superficie. Además, existe una variación de unidades funcionales adoptadas para un mismo producto, lo que genera diferencias en los resultados de los impactos ambientales y dificulta la comparación entre estudios.

- c) El alcance de los trabajos fue en su gran mayoría de la cuna a la puerta, pero los sistemas analizados varían sus límites entre los que consideran solo la producción de las frutas en las fincas y los que consideran la producción de derivados en fábrica. Muchos de ellos tuvieron en cuenta también, la producción y transporte de materia prima utilizada en todos los pasos, el proceso de empaque y el transporte final.
- d) Fue necesario realizar asignación de cargas, en los estudios cuyo sistema involucraba la producción de derivados cítricos, debido a la variedad de productos finales obtenidos. En la mayoría de los casos se realizaron asignaciones másicas y económicas.
- e) Las fuentes de datos, para la fase de construcción de inventarios, son en su mayoría primarios, obtenidos de entrevistas a los agricultores y secundarios, obtenidos de bibliografía. Se considera importante, incrementar la obtención de datos primarios, en el área agrícola e industrial y sobre la producción y transporte de las materias primas utilizadas, mediante encuestas y entrevistas, con un posterior análisis de sensibilidad de datos.
- f) En la mayoría de los estudios, se tuvieron en cuenta categorías impacto de calentamiento global, eutrofización y acidificación. Por otro lado, se analizaron en menor proporción, las categorías de consumo de agua y uso de la tierra, que se deberían tener cuenta a futuro, como también generar un perfil ambiental completo para la producción de cítricos y subproductos cítricos.
- g) Se pudo observar una heterogeneidad considerable sobre todo en las elecciones metodológicas, que fueron diversas en todos los artículos analizados. También, destacar la carencia de datos sobre el ciclo de vida completo, almacenamiento de carbono en campo y la falta de análisis de sensibilidad en los estudios.
- h) Finalmente, se recomienda realizar comparaciones utilizando las reglas de categoría de producto, considerar un año productivo para los límites temporales del sistema, estudiar el uso de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas entre los que generan mayores impactos ambientales y analizar técnicas orgánicas en el manejo de campo. También, estudiar el consumo de agua y alternativas sostenibles para su uso, analizar el proceso de empaque y transporte en la etapa final de la cadena, estudiar el consumo energético y proponer el uso de fuentes de energía renovables.

A partir del análisis de los trabajos que utilizaron la metodología de ACV como herramienta para la optimización de procesos se determina que:

- a) No se hallaron evidencias científicas sobre la aplicación de ambas metodologías, referidas a la producción de cítricos, principalmente a la producción de limón.
- b) Se pudo observar en la sección 3.4 que la tendencia de este tipo de estudios fue minimizar los impactos ambientales y los costos, mientras se maximiza la producción. Por lo tanto, la mayoría de los trabajos tuvieron un enfoque multiobjetivo, en donde se formularon diferentes tipos de modelos matemáticos para su resolución, muchos de ellos del tipo MILP.
- c) Se utilizaron diversos modelos para la etapa de evaluación de impacto (Eco-Indicador 99, ReciPe, IMPACT, CML, entre otros) y paquetes de software como la herramienta GAMS para la etapa de optimización.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo estuvo destinado a la búsqueda específica de publicaciones referidas a la cadena de suministro de cítricos y sus derivados, en donde se pudo comprobar que no hay evidencia científica del uso de las metodologías de ACV en conjunto con técnicas de optimización, para la Argentina y escasas contribuciones a nivel mundial en Sudamérica.

Por otro lado, existen variaciones metodológicas entre los estudios que aplicaron la metodología de ACV, lo que genera diferencias en los resultados de los impactos ambientales y dificulta su comparación. Además, se tomaron diferentes límites del sistema, ya que algunos estudios abarcan hasta la producción de fruta fresca en campo, mientras que otros se extendieron hasta la industrialización y consumo de derivados cítricos, esto influye también en la necesidad de realizar asignaciones de cargas ambientales en ambos casos. De igual modo, se considera necesario realizar un análisis de sensibilidad para disminuir las incertidumbres en los resultados, generadas por fuentes de datos primarias.

Respecto al uso de la metodología de ACV como herramienta para la optimización de procesos no se hallaron evidencias científicas referidas a la producción de cítricos, principalmente a la producción de limón y se pudo observar que la tendencia en los artículos que utilizan ambas metodologías es minimizar los impactos ambientales y los costos, mientras se maximiza la producción.

En este contexto, resulta necesario generar el perfil ambiental completo del sector agroindustrial cítrico para las condiciones naturales y políticas de producción en la Argentina, con el fin de determinar los puntos críticos en el proceso y emplearlos como criterio de optimización para mejorar la producción, siguiendo las recomendaciones propuestas en este trabajo. Además, disminuir las disparidades metodológicas entre los estudios de ACV aplicados a la industria cítrica a nivel mundial, utilizando reglas de categoría de producto en los estudios a futuro.

REFERENCIAS

- AZAPAGIC, A. y CLIFT, R., 1999a. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *Journal of Cleaner Production*, vol. 7, no. 2, pp. 135-143. DOI [10.1016/S0959-6526\(98\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00051-1).
- AZAPAGIC, A. y CLIFT, R., 1999b. The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 1509-1526. DOI [10.1016/S0098-1354\(99\)00308-7](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)00308-7).
- AZAPAGIC, Adisa, 1999. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, vol. 73, no. 1, pp. 1-21. DOI [10.1016/S1385-8947\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X).
- AZAPAGIC, Adisa, STAMFORD, Laurence, YOUDS, Lorraine y BARTECZKO-HIBBERT, Christian, 2016. Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs). *Computers & Chemical Engineering*, vol. 91, pp. 93-103. DOI [10.1016/j.compchemeng.2016.03.017](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.017).
- BASSO, L. R. C., PASCALE MEDINA, E. S. y DE OBSCHATKO, J. P. P., 2013. *Agricultura Inteligente: la iniciativa de la Argentina para la sustentabilidad en la producción de alimentos y energía* [en línea]. Buenos Aires, ARG: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. [Consulta: 29 abril 2020]. Disponible en: <http://repiica.iica.int/docs/B3218E/B3218E.PDF>.
- BECCALI, Marco, CELLURA, Maurizio, IUDICELLO, Maria y MISTRETTA, Marina, 2009. Resource Consumption and Environmental Impacts of the Agrofood Sector: Life Cycle Assessment of Italian Citrus-Based Products. *Environmental Management*, vol. 43, no. 4, pp. 707-724. DOI [10.1007/s00267-008-9251-y](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9251-y).
- BECCALI, Marco, CELLURA, Maurizio, IUDICELLO, Maria y MISTRETTA, Marina, 2010. Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 7, pp. 1415-1428. DOI [10.1016/j.jenvman.2010.02.028](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.028).
- CERUTTI, Alessandro K., BECCARO, Gabriele L., BRUUN, Sander, BOSCO, Simona, DONNO, Dario, NOTARNICOLA, Bruno y BOUNOUS, Giancarlo, 2014. Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. *Journal of Cleaner Production*, vol. 73, pp. 125-135. DOI [10.1016/j.jclepro.2013.09.017](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.017).
- COLTRO, Leda, MOURAD, Anna Lúcia, KLETECKE, Rojane M., MENDONÇA, Taíssa A. y GERMER, Sílvia P. M., 2009. Assessing the environmental profile of orange production in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 14, no. 7, pp. 656-664. DOI [10.1007/s11367-009-0097-1](https://doi.org/10.1007/s11367-009-0097-1).
- DE LUCA, Anna Irene, FALCONE, Giacomo, STILLITANO, Teodora, STRANO, Alfio y GULISANO, Giovanni, 2014. Sustainability assessment of quality-oriented citrus growing systems in Mediterranean area. *Quality - Access to Success*, vol. 15, no. 141, pp. 103-108.
- DÍAZ, Gisela Florencia del Valle, CRUZ, Marta Carolina, FEIJÓO, Enrique A., MÁRQUEZ, Fernando Ariel, CACHAROSKI, Walter Eduardo, RÍOS, Alejandro Gustavo de los y PAZ, Dora, 2017. Propuesta para la evaluación del procesamiento industrial del limón. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, vol. 93, no. 1, pp. 19-30.
- DWIVEDI, Puneet, SPREEN, Thomas y GOODRICH-SCHNEIDER, Renée, 2012. Global warming impact of Florida's Not-From-Concentrate (NFC) orange juice. *Agricultural Systems*, vol. 108, pp. 104-111. DOI [10.1016/j.agry.2012.01.006](https://doi.org/10.1016/j.agry.2012.01.006).
- EHRGOTT, Matthias, 2005. *Multicriteria Optimization* [en línea]. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin · Heidelberg. [Consulta: 29 abril 2020]. ISBN 978-3-540-27659-3. Disponible en: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=book&isbn=978-3-540-21398-7>.
- GEBRESLASSIE, Berhane H., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo, JIMÉNEZ, Laureano y BOER, Dieter, 2009. Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment. *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1712-1722. DOI [10.1016/j.apenergy.2008.11.019](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.019).

- GEBRESLASSIE, Berhane H., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo, JIMÉNEZ, Laureano y BOER, Dieter, 2010. A systematic tool for the minimization of the life cycle impact of solar assisted absorption cooling systems. *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3849-3862. DOI [10.1016/j.energy.2010.05.039](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.039).
- GROSSMANN, Ignacio E. y GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo, 2010. Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1365-1376. DOI [10.1016/j.compchemeng.2009.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012).
- GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo y GROSSMANN, Ignacio E., 2009. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 99-121. DOI [10.1002/aic.11662](https://doi.org/10.1002/aic.11662).
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 2006a. *ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations: Type III environmental declarations: Principles and procedures* [en línea]. Geneva, CH: ISO. [Consulta: 26 febrero 2020]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/38131.html>.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 2006b. *ISO 14040: 2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework* [en línea]. Geneva, CH: ISO. [Consulta: 11 febrero 2020]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 2006c. *ISO 14044:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines* [en línea]. Geneva, CH: ISO. [Consulta: 11 febrero 2020]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- KNUDSEN, Marie Trydeman, FONSECA DE ALMEIDA, Gustavo, LANGER, Vibeke, SANTIAGO DE ABREU, Lucimar y HALBERG, Niels, 2011. Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: a case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. *Organic Agriculture*, vol. 1, no. 3, pp. 167. DOI [10.1007/s13165-011-0014-3](https://doi.org/10.1007/s13165-011-0014-3).
- KOMIVES, Kristin y JACKSON, Amy, 2014. Introduction to Voluntary Sustainability Standard Systems. En: Carsten SCHMITZ-HOFFMANN, Michael SCHMIDT, Berthold HANSMANN y Dmitry PALEKHOV (eds.), *Voluntary Standard Systems* [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Natural Resource Management in Transition, pp. 3-19. [Consulta: 29 abril 2020]. ISBN 978-3-642-35715-2. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-35716-9_1.
- LI, Yi, HUANG, Youyi, YE, Quanliang, ZHANG, Wenlong, MENG, Fangang y ZHANG, Shanxue, 2018. Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems. *Journal of Hydrology*, vol. 558, pp. 659-666. DOI [10.1016/j.jhydrol.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.007).
- LO GIUDICE, Alessandro, MBOHWA, Charles, CLASADONTE, Maria Teresa y INGRAO, Carlo, 2013. Environmental assessment of the citrus fruit production in Sicily using LCA. *Environmental Science*, vol. 25, no. 2, pp. 202-212.
- MELE, Fernando D., KOSTIN, Andrew M., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo y JIMÉNEZ, Laureano, 2011. Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 9, pp. 4939-4958. DOI [10.1021/ie101400g](https://doi.org/10.1021/ie101400g).
- MUNHOZ, José Renato y MORABITO, Reinaldo, 2013. Uma abordagem de otimização robusta no planejamento agregado de produção na indústria cítrica. *Production*, vol. 23, no. 2, pp. 422-435. DOI [10.1590/S0103-65132012005000054](https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000054).
- NEGRO, Viviana, RUGGERI, Bernardo, FINO, Debora y TONINI, Davide, 2017. Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 148-158. DOI [10.1016/j.resconrec.2017.08.014](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014).
- NGATCHOU, P., ZAREI, A. y EL-SHARKAWI, A., 2005. Pareto Multi Objective Optimization. En: Arlington, VA, USA, *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 84-91. [Consulta: 29 abril 2020]. DOI [10.1109/ISAP.2005.1599245](https://doi.org/10.1109/ISAP.2005.1599245). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1599245>.

- NICOLÒ, Bruno Francesco, DE LUCA, Anna Irene, STILLITANO, Teodora, IOFRIDA, Nathalie, FALCONE, Giacomo y GULISANO, Giovanni, 2017. Environmental and Economic Sustainability Assessment of Navel Oranges from the Cultivation to the Packinghouse According to Environmental Product Declarations System. *Quality - Access to Success*, vol. 18, no. 158, pp. 108-112.
- NICOLÒ, Bruno Francesco, DE SALVO, Maria Cristina, RAMIREZ-SANZ, Clara, ESTRUCH, Vicente, SANJUAN, Neus, FALCONE, Giacomo y STRANO, Alfio, 2018. Life cycle assessment applied to different citrus farming systems in Spain and Italy. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 42, no. 10, pp. 1092-1105. DOI [10.1080/21683565.2018.1490942](https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1490942).
- OSTERMEYER, York, WALLBAUM, Holger y REUTER, Friedrich, 2013. Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 9, pp. 1762-1779. DOI [10.1007/s11367-013-0548-6](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0548-6).
- PERGOLA, M., D'AMICO, M., CELANO, G., PALESE, A. M., SCUDERI, A., DI VITA, G., PAPPALARDO, G. y INGLESE, P., 2013. Sustainability evaluation of Sicily's lemon and orange production: An energy, economic and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*, vol. 128, pp. 674-682. DOI [10.1016/j.jenvman.2013.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.007).
- PIERAGOSTINI, Carla, MUSSATI, Miguel C. y AGUIRRE, Pío, 2012. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, vol. 96, no. 1, pp. 43-54. DOI [10.1016/j.jenvman.2011.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.014).
- POURBAFRANI, Mohammad, MCKECHNIE, Jon, MACLEAN, Heather L. y SAVILLE, Bradley A., 2013. Life cycle greenhouse gas impacts of ethanol, biomethane and limonene production from citrus waste. *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 015007. DOI [10.1088/1748-9326/8/1/015007](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015007).
- RIBAL, Javier, ESTRUCH, Vicente, CLEMENTE, Gabriela, FENOLLOSA, M. Loreto y SANJUÁN, Neus, 2019. Assessing variability in carbon footprint throughout the food supply chain: a case study of Valencian oranges. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, no. 8, pp. 1515-1532. DOI [10.1007/s11367-018-01580-9](https://doi.org/10.1007/s11367-018-01580-9).
- RIBAL, Javier, RAMÍREZ-SANZ, Clara, ESTRUCH, Vicente, CLEMENTE, Gabriela y SANJUÁN, Neus, 2017. Organic versus conventional citrus. Impact assessment and variability analysis in the Comunitat Valenciana (Spain). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 4, pp. 571-586. DOI [10.1007/s11367-016-1048-2](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1048-2).
- RIBAL, Javier, SANJUAN, Neus, CLEMENTE, Gabriela, FENOLLOSA, M. Loreto, RIBAL, Javier, SANJUAN, Neus, CLEMENTE, Gabriela y FENOLLOSA, M. Loreto, 2009. Medición de la ecoeficiencia en procesos productivos en el sector agrario. Caso de estudio sobre producción de cítricos. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, vol. 9, no. 2, pp. 125-148. DOI [10.22004/AG.ECON.57290](https://doi.org/10.22004/AG.ECON.57290).
- ROCCO, Cleber Damião y MORABITO, Reinaldo, 2016. Production and logistics planning in the tomato processing industry: A conceptual scheme and mathematical model. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 127, pp. 763-774. DOI [10.1016/j.compag.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.002).
- ROGHANIAN, Emad y CHERAGHALIPOUR, Armin, 2019. Addressing a set of meta-heuristics to solve a multi-objective model for closed-loop citrus supply chain considering CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, pp. 118081. DOI [10.1016/j.jclepro.2019.118081](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118081).
- ROMERO RODRÍGUEZ, Blanca Iris, 2003. El análisis de ciclo de vida y la gestión ambiental. *Revista Tendencias Tecnológicas*, no. 3, pp. 91-97.
- ROSENTHAL, Richard E., 2007. *GAMS: A User's Guide* [en línea]. Washington, DC: GAMS Development Corporation. [Consulta: 29 abril 2020]. Disponible en: https://www.un.org/en/development/desa/policy/mdg_workshops/training_material/gams_users_guide.pdf.
- SANJUAN, N., UBEDA, L., CLEMENTE, G., MULET, A. y GIRONA, F., 2005. LCA of integrated orange production in the Comunidad Valenciana (Spain). *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, vol. 4, no. 2, pp. 163. DOI [10.1504/IJARGE.2005.007198](https://doi.org/10.1504/IJARGE.2005.007198).

SPRINGER NATURE, [sin fecha]. Providing corporate researchers with access to millions of scientific documents from journals, books, series, protocols, reference works and proceedings. *Springer Link* [en línea]. [Consulta: 15 abril 2020]. Disponible en: <https://rd.springer.com/>.

VITA, Giuseppe Di, STILLITANO, Teodora, FALCONE, Giacomo, DE LUCA, Annarosa, D'AMICO, M., STRANO, Alfio y GULISANO, Giovanni, 2018. Can sustainability match quality citrus fruit growing production? An energy and economic balance of agricultural management models for PGI Clementine of Calabria. *Quality - Access to Success*, vol. 15, no. 141, pp. 103-108.

YAN, Ming, CHENG, Kun, YUE, Qian, YAN, Yu, REES, Robert M. y PAN, Genxing, 2016. Farm and product carbon footprints of China's fruit production—life cycle inventory of representative orchards of five major fruits. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, no. 5, pp. 4681-4691. DOI [10.1007/s11356-015-5670-5](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5670-5).

ZHAO, Yang, ERCAN, Tolga y TATARI, Omer, 2016. Life cycle based multi-criteria optimization for optimal allocation of commercial delivery truck fleet in the United States. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 8, pp. 18-31. DOI [10.1016/j.spc.2016.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.04.003).