ANÁLISIS DE INDICADORES AMBIENTALES ASOCIADOS AL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CÁSCARA DE NARANJA EN LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DESDE RESIDUOS SÓLIDOS, HUELLA DE CARBONO Y VALORIZACIÓN DE BIOMASA

HEIDER ANDRÉS RODRÍGUEZ URIBE

HAROLD ANTONIO NÚÑEZ TORRADO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR – SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2026

ANÁLISIS DE INDICADORES AMBIENTALES ASOCIADOS AL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CÁSCARA DE NARANJA EN LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DESDE RESIDUOS SÓLIDOS, HUELLA DE CARBONO Y VALORIZACIÓN DE BIOMASA

HEIDER ANDRÉS RODRÍGUEZ URIBE

HAROLD ANTONIO NÚÑEZ TORRADO

DIRECTORA

ESP. IRINA SUÁREZ CHACÓN

CO- DIRECTOR

MAGISTER EMIR QUINTERO SOLANO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Agroindustrial

Línea de investigación

Desarrollo y aplicación de nuevos materiales y productos para la industria con criterios de sostenibilidad

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR – SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2026

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado de **Heider Andres Rodríguez Uribe Y Harold Antonio Núñez Torrado**, titulado **"ANÁLISIS DE INDICADORES AMBIENTALES ASOCIADOS AL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CÁSCARA DE NARANJA EN LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DESDE RESIDUOS SÓLIDOS, HUELLA DE CARBONO Y VALORIZACIÓN DE BIOMASA"**, ha sido aprobado por los jurados, quienes no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

EVALUADOR 1

EVALUADOR 2

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Harold Antonio Núñez Torrado

Dedico este trabajo de grado a Dios, por acompañarme en cada paso de este camino, darme la fortaleza para enfrentar los momentos difíciles y brindarme la oportunidad de culminar una etapa tan significativa en mi vida.

A mis padres y a mi familia, por ser mi mayor apoyo, por sus consejos, su comprensión y por impulsarme a continuar incluso cuando el camino parecía difícil. Este logro también les pertenece, porque detrás de cada avance están su esfuerzo, sus enseñanzas y la confianza que siempre han depositado en mí.

A todas las personas que me han acompañado durante mi formación académica, que me han brindado palabras de ánimo y que, con sus enseñanzas y experiencias, han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

Dedico este logro a mi esfuerzo y perseverancia, porque cada dificultad superada me ha dejado una enseñanza y me ha permitido comprender que los sueños se alcanzan con disciplina, compromiso y fe. Que este sea el comienzo de nuevas oportunidades y metas por cumplir.

Heider Andrés Rodríguez Uribe

Dedico este trabajo de grado, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia para superar cada dificultad y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mi familia, especialmente, por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante durante todo mi proceso de formación. Gracias por creer en mí, motivarme a seguir adelante y enseñarme que, con esfuerzo y dedicación, es posible alcanzar las metas propuestas.

También me dedico este logro a mí mismo, por no rendirme ante los obstáculos, por cada esfuerzo realizado y por mantener la determinación de continuar creciendo personal y profesionalmente.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, han contribuido a mi formación y me han inspirado a construir un futuro mejor. Este logro representa el resultado de la perseverancia, el aprendizaje y la esperanza de seguir cumpliendo mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios por darme la fortaleza, la paciencia y la sabiduría para superar los desafíos que se presentaron durante mi formación profesional y permitirme culminar satisfactoriamente este trabajo de grado.

A mi familia, le doy gracias por su apoyo, comprensión y motivación constante. Su confianza y acompañamiento han sido fundamentales para continuar adelante, afrontar las dificultades y alcanzar este objetivo tan importante en mi vida.

Expreso mi especial agradecimiento a nuestra directora de trabajo de grado, Irina Suárez Chacón, por su orientación, disposición y aportes académicos, que fueron de gran importancia para la elaboración y el fortalecimiento de esta investigación.

Asimismo, agradezco a la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica, y a los docentes del programa de Ingeniería Agroindustrial por contribuir a mi formación mediante sus enseñanzas y experiencias, que hoy hacen parte de mi crecimiento académico y profesional.

Por último, agradezco a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto de investigación sobre el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja y sus indicadores ambientales. Este logro representa la culminación de una etapa llena de aprendizajes y reafirma mi compromiso con el desarrollo de alternativas agroindustriales que promuevan el aprovechamiento responsable de los recursos y la sostenibilidad ambiental.

Tabla de contenido

DEDICATORIA 4
AGRADECIMIENTOS 6
GLOSARIO 11
RESUMEN 15
ABSTRACT 16
INTRODUCCIÓN 17
1.1 Objetivos 19
1.1.1 Objetivo general 19
1.1.2 Objetivos específicos 19
1.2 Marco conceptual 19
1.3 Marco teórico 21
1.3.1 Economía circular y bioeconomía 21
1.3.2 Residuos agroindustriales y biomasa cítrica 21
1.3.3 Valorización y biorrefinería de cáscara de naranja 21
1.3.4 Huella de carbono, residuos sólidos y análisis de ciclo de vida 22
1.4 Marco legal y normativo 22
1.5 Antecedentes de la investigación (estado del arte) 24
2. DISEÑO METODOLÓGICO 26
2.1 Tipo, enfoque, alcance y diseño de investigación 26
2.2 Población y muestra documental 26
2.3 Estrategia de búsqueda bibliográfica 26
2.4 Criterios de inclusión y exclusión 28
2.5 Procedimiento de selección documental mediante PRISMA 2020 29

2.6 Extracción, organización y comparación de indicadores ambientales 31
2.7 Procedimiento metodológico por objetivo específico 33
2.8 Instrumentos de recolección y análisis de datos 34
2.9 Operacionalización de variables y categorías 35
2.10 Consideraciones éticas y uso de herramientas digitales 35
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 36
3.1 Caracterización bibliométrica y documental de la revisión 36
3.2 Resultados del objetivo 1: rutas tecnológicas de valorización 37
3.3 Resultados del objetivo 2: comparación técnica de indicadores ambientales 41
3.4 Resultados del objetivo 3: aportes ambientales de las rutas de valorización 47
3.5 Resultados del objetivo 4: lineamientos estratégicos 49
4. CONCLUSIONES 52
5. REFERENCIAS 54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1Marco conceptual de categorías centrales.....20
Tabla 2 Marco legal y normativo relacionado con la investigación. 23
Tabla 3 Estrategia de búsqueda bibliográfica empleada. 27
Tabla 4 Criterios de inclusión y exclusión. 28
Tabla 5 Registro del flujo PRISMA 2020. 29
Tabla 6 Matriz de extracción y comparación de indicadores ambientales 32
Tabla 7 Procedimiento metodológico por objetivo específico. 33
Tabla 8 Instrumentos de recolección y tratamiento de datos. 34
Tabla 9 Operacionalización de variables y categorías de análisis. 35
Tabla 10 Distribución descriptiva de documentos incluidos en la revisión. 36
Tabla 11 Estudios base y aportes de las principales rutas de valorización 38
Tabla 12 Valores, unidades y condiciones reportadas para indicadores ambientales. 42
Tabla 13 Comparación técnica de rutas según indicadores ambientales. 45
Tabla 14 Implicaciones de los resultados para el contexto colombiano. 46
Tabla 15 Aportes ambientales identificados por ruta de valorización. 48
Tabla 16 Lineamientos estratégicos para el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja. 49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Flujo de selección documental según PRISMA 2020 31
Figura 2 Distribución de fuentes incluidas en la revisión 37
Figura 3 Frecuencia relativa de rutas tecnológicas identificadas 38
Figura 4 Modelo de biorrefinería en cascada para el aprovechamiento de la cáscara de naranja. 40
Figura 5 Indicadores ambientales más recurrentes en la revisión. 42
Figura 6 Comparación entre gestión lineal y economía circular en el manejo de la cáscara de naranja. 47

GLOSARIO

Adsorbentes: Productos derivados de residuos vegetales tratados que pueden utilizarse para eliminar contaminantes del agua. Los adsorbentes están compuestos por moléculas que se adhieren a una superficie sólida.

Albedo: La parte interna, blanca y esponjosa de la cáscara de naranja, que tiene un alto contenido de pectina y celulosa, además de otros componentes de utilidad industrial.

Evaluación del ciclo de vida (ACV): Metodología destinada a evaluar los posibles efectos ambientales de un producto, proceso o servicio, dentro de los límites del sistema objeto de análisis.

Aprovechamiento integral: Estrategia para utilizar las diferentes fracciones de una materia prima o residuo mediante procesos complementarios o secuenciales, con el fin de reducir las pérdidas e incrementar el valor agregado.

Biocarbón: Material carbonoso obtenido de la transformación termoquímica de la biomasa en condiciones de oxígeno limitado. El biocarbón puede utilizarse como enmienda del suelo y/o material adsorbente, dependiendo de sus propiedades.

Bioetanol: Alcohol obtenido mediante la fermentación de azúcares presentes en materias primas de origen vegetal o en sus derivados. El bioetanol puede utilizarse como biocombustible.

Biogás: Materia en estado gaseoso obtenida de la degradación anaerobia de la materia orgánica, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono.

Biomasa residual: Materia orgánica de origen biológico que permanece después de procesos agrícolas, industriales y domésticos.

Biorrefinería: Sistema integrado para refinar, transformar y procesar biomasa, con el fin de obtener bioproductos, biomateriales, productos químicos y bioenergía.

Cáscara de naranja: Parte externa del fruto, constituida por el flavedo y el albedo. Es una fuente de sustancias valiosas (fibra, carbohidratos, aceites esenciales y pectina), lo que permite su inclusión en diversos tipos de valorización.

Compostaje: Es un proceso biológico controlado mediante el cual los microorganismos descomponen residuos orgánicos en presencia de oxígeno, dando como resultado un material estable que mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo.

Dióxido de carbono equivalente (CO_2-eq): Unidad de medida que permite expresar de manera similar los gases de efecto invernadero de distinta naturaleza, teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global.

Digestión anaerobia: Degradación microbiológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, durante la cual se produce biogás, junto con un residuo conocido como digestato.

Economía circular: Economía en la que se busca preservar el valor de los recursos y eliminar los residuos mediante la gestión eficiente de los canales de producción y consumo.

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): Liberación de gases a la atmósfera que contribuyen al cambio climático.

Flavedo: Parte externa y coloreada de la cáscara de naranja, que alberga glándulas que contienen aceites esenciales, principalmente limoneno.

Huella de carbono: Indica la cantidad de gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera por una actividad determinada.

Indicadores ambientales: Variables (cuantitativas o cualitativas) utilizadas para evaluar y comparar el desempeño ambiental, por ejemplo, el uso de energía, las emisiones de contaminantes o los residuos generados.

Limoneno: Terpeno presente en el aceite esencial de las cáscaras de naranja. Tiene usos industriales, pero puede ser tóxico en ciertos niveles.

Metano (CH_4): Gas de efecto invernadero producido, entre otros procesos, durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Puede capturarse y utilizarse para obtener energía en un entorno controlado.

Pectina: Polisacárido presente en las paredes celulares de diversos tejidos vegetales, especialmente en las cáscaras de naranja. Se utiliza por sus propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes.

Pretratamiento de la biomasa: Conjunto de operaciones destinadas a mejorar la eficiencia de un proceso mediante la alteración de la materia prima, por ejemplo, para extraer mejor los compuestos o hacer que las sustancias estén más disponibles para una reacción.

PRISMA 2020: guía internacional para informar de manera transparente las revisiones sistemáticas. Incluye un diagrama de flujo para registrar la identificación, selección, exclusión e inclusión de las fuentes.

Residuo agroindustrial: material secundario generado durante la producción o el procesamiento de materias primas agrícolas, cuyo uso está determinado por su composición y las tecnologías disponibles, y por las formas de transformarlo.

Valorización de biomasa: materiales residuales orgánicos se transforman o se utilizan para producir materiales o para obtener productos y/o energía, y para recuperar su valor.

Valorización en cascada: estrategia de utilización que tiene como objetivo recuperar los componentes con el valor más alto en primera instancia, y las fracciones restantes para otros procesos de producción, energéticos o agronómicos.

RESUMEN

La generación de residuos orgánicos a partir del procesamiento de cítricos crea problemas ambientales, pero también brinda una oportunidad para crear sistemas más sostenibles dentro del sector agroindustrial. El objetivo de esta investigación fue analizar indicadores ambientales del uso integrado de la cáscara de naranja en el agronegocio colombiano, y evaluar la gestión de residuos sólidos, la huella de carbono y la valorización de la biomasa. Se realizó una revisión documental y analítica basada en una revisión sistemática de la literatura científica, y se siguió PRISMA 2020. Primero, se identificaron 385 registros y, después de los procesos de selección, se analizaron 50 documentos. El uso de la cáscara de naranja forma parte de la economía circular; por lo tanto, esta investigación proporciona indicadores ambientales para verificar la viabilidad y el potencial de utilizar este bioresiduo en Colombia. Finalmente, se identificaron siete rutas principales de valorización: aceites esenciales, pectina, bioetanol, biogás, compost, alimento para animales y materiales adsorbentes. Estos bioprocesos dependen de varios factores como el pretratamiento y los procesos, y los sistemas y límites que los integran. Se identificó la biorrefinería en cascada como un enfoque que permite integrar diferentes rutas de valorización de la biomasa.

Palabras clave: Biorrefinería; valorización de biomasa; huella de carbono; economía circular; cáscara de naranja.

ABSTRACT

Treatment of organic wastes generated from citrus processing is an important environmental concern, and provides the opportunity to develop more sustainable agro-industrial production systems. This research aimed to assess environmental indicators associated with the integrated use of orange peel in the Colombian agro-industrial sector, primarily dealing with the management of solid wastes, carbon footprint, and biomass valorization. A systematic literature review was conducted using the PRISMA 2020 protocol. Initially, 385 records were identified, and 50 were selected for the final analysis. Seven main valorization pathways were determined: extraction of essential oils and pectin, bioethanol, biogas, composting, feed, and adsorbent materials. Environmental indicators related to the alternatives assessed in the research varied according to the conditions of the systems studied, the processes and the type of energy used, the constraints and limits of the system, and the operating conditions. Additionally, integrated Cascade biorefining was identified as a promising approach to recover various useful substances from orange peel biomass. Ultimately, the completion of the valorization of orange peel biomass is not only possible, but could enhance the circular economy in the Colombian agro-industrial sector.

Keywords: Biorefinery: biomass valorization; carbon footprint; circular economy; orange peel.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria colombiana genera corrientes orgánicas que, si no se separan y aprovechan de forma técnica, terminan asociadas a pérdidas de materiales, costos de manejo y presión sobre los sistemas de disposición final. En ese escenario, la cáscara de naranja es una biomasa residual de interés por su disponibilidad, por el peso del sector citrícola en el abastecimiento frutícola nacional y por la presencia de compuestos con potencial de recuperación, como aceites esenciales, pectina, carbohidratos fermentables y fibra (Zema et al., 2018; Rafiq et al., 2018; Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2024; Asohofrucol, 2024).

La literatura reconoce que los residuos de cítricos son más que residuos. Es posible extraer limoneno, recuperar la pectina, producir bioetanol a través de digestión anaerobia, compostaje y alimento para animales, y producir materiales adsorbentes. Sin embargo, cada vía tiene sus propios requisitos técnicos y algunas pueden no proporcionar un rendimiento ambiental óptimo.

Si se gestiona esta biomasa mediante un esquema lineal, se generan residuos, se acumulan y, en última instancia, se entierran. Disponer de residuos de esa manera reduce la oportunidad de recuperar valor y puede dar lugar a olores y lixiviados derivados de la descomposición de materia orgánica. La valorización de excedentes orgánicos puede ser incluso más compleja que la gestión de pérdidas de alimentos. La literatura sobre residuos de alimentos señala que puede ser necesario abordar tanto la pérdida como el excedente de alimentos para lograr mejoras duraderas en la sostenibilidad del sistema alimentario (Mirabella et al., 2014; Caldeira et al., 2020; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2019; United Nations Environment Programme [UNEP], 2021; World Bank, 2018).

La economía circular se centra en mantener los materiales dentro de los ciclos productivos durante el mayor tiempo posible. Desde esta perspectiva, comparar rutas, medir la reducción de residuos, evaluar las emisiones y reconocer las limitaciones de cada tecnología deben ser considerados en la agroindustria. Dentro de una economía circular, el uso de residuos no garantiza que habrá una mejora en el medio ambiente si el proceso es intensivo en energía, agua o reactivos (Geissdoerfer et al., 2017; Ghisellini et al., 2016; Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018; Morseletto, 2020).

En el caso de Colombia, la Estrategia Nacional de Economía Circular y el Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la Biomasa Residual, destacan que el uso estratégico de la biomasa puede fomentar una producción sostenible. Este marco institucional se complementa con la política de crecimiento sostenible y con análisis sobre gobernanza de la economía circular, aspectos relevantes para ubicar la cáscara de naranja dentro de una discusión agroindustrial sobre cierre de ciclos, innovación tecnológica y reducción de impactos asociados a la disposición final (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019, 2022; Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2021; Vera-Acevedo & Raufflet, 2022).

Este trabajo no realiza una medición directa del impacto ambiental de las rutas de aprovechamiento. Su alcance consiste en analizar indicadores ambientales reportados en la literatura científica y técnica, con énfasis en residuos sólidos, huella de carbono, metano, valorización de biomasa y recuperación de productos. A partir de ello, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿en qué medida el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja puede contribuir a la mitigación ambiental en la agroindustria colombiana, según los indicadores reportados en la literatura reciente?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Analizar los indicadores ambientales asociados al aprovechamiento integral de la cáscara de naranja en la agroindustria colombiana, mediante una revisión bibliográfica centrada en residuos sólidos, huella de carbono y valorización de biomasa.

1.1.2 Objetivos específicos

Identificar las principales rutas tecnológicas para la valorización de la cáscara de naranja documentadas en la literatura científica reciente.

Comparar los indicadores ambientales reportados para distintas rutas de valorización de la biomasa cítrica.

Establecer los aportes ambientales del aprovechamiento integral de la cáscara de naranja en términos de reducción de residuos sólidos, mitigación de emisiones y recuperación de biomasa.

Formular lineamientos estratégicos para la integración de la cáscara de naranja en la agroindustria colombiana, con base en la evidencia científica y el marco normativo ambiental vigente.

1.2 Marco conceptual

El marco conceptual delimita las categorías centrales del estudio y evita confundir conceptos técnicos, metodológicos y normativos. En una revisión documental, esta delimitación es necesaria porque la comparación de indicadores depende de que las rutas, las unidades de análisis y los criterios ambientales se entiendan de manera uniforme (Geissdoerfer et al., 2017; ISO, 2006a, 2006b).

Tabla 1Marco conceptual de categorías centrales

Concepto	Definición operativa	Función en el análisis
Cáscara de naranja	Fracción residual del consumo o procesamiento de naranja, compuesta principalmente por flavedo y albedo; contiene aceites esenciales, pectina, fibra y carbohidratos fermentables.	Unidad principal de análisis y biomasa residual objeto de valorización.
Residuo agroindustrial	Material secundario generado durante producción, transformación, comercialización o consumo de materias primas agrícolas.	Ubica la cáscara dentro de la problemática de gestión de residuos orgánicos.
Valorización	Proceso mediante el cual un residuo se reincorpora al ciclo productivo como producto, insumo, energía o material.	Permite clasificar las rutas tecnológicas revisadas.
Aprovechamiento integral	Uso secuencial o complementario de varias fracciones de la biomasa para reducir remanentes sin valor.	Sustenta el enfoque de biorrefinería y valorización en cascada.
Economía circular	Modelo que busca reducir residuos, prolongar el valor de los materiales y cerrar ciclos productivos.	Marco de interpretación de los aportes ambientales y estratégicos.
Biomasa residual	Fracción orgánica de origen biológico generada como subproducto con potencial de transformación.	Vincula la cáscara con bioeconomía, energía y materiales.
Huella de carbono	Indicador que expresa emisiones de gases de efecto invernadero en dióxido de carbono equivalente.	Permite comparar escenarios de manejo y aprovechamiento.

Biorrefinería	Sistema integrado que transforma biomasa en bioproductos, biomateriales y bioenergía.	Modelo para ordenar la valorización en cascada.
Análisis de ciclo de vida	Metodología para evaluar impactos ambientales de un sistema desde extracción hasta disposición.	Referente para interpretar estudios comparativos y límites de sistema.

Nota. Elaboración propia a partir de Geissdoerfer et al. (2017), ISO (2006a, 2006b), Sharma et al. (2022) y Zema et al. (2018).

1.3 Marco teórico

1.3.1 Economía circular y bioeconomía

La economía circular plantea una transición desde el modelo de extracción, consumo y descarte hacia esquemas donde los materiales se mantienen en uso, se recuperan y se reincorporan a cadenas productivas. En residuos agroindustriales, este enfoque se relaciona con la bioeconomía porque permite tratar la biomasa como materia prima secundaria para obtener energía, materiales, alimentos o compuestos de valor, siempre bajo criterios de sostenibilidad y uso eficiente de recursos biológicos renovables (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Bugge et al., 2016; Stahel, 2016; FAO, 2023).

1.3.2 Residuos agroindustriales y biomasa cítrica

Los residuos agroindustriales conservan componentes útiles aunque hayan perdido su función inicial. En el caso de los residuos cítricos, la cáscara y las fracciones asociadas pueden representar una proporción importante del fruto procesado, por lo que su disposición sin aprovechamiento implica pérdida de recursos y mayores cargas de manejo. Esta situación coincide con revisiones sobre residuos de la industria alimentaria, donde se insiste en recuperar compuestos útiles antes de enviar la biomasa a disposición final (Mirabella et al., 2014; Rafiq et al., 2018; Mahato et al., 2019; Zema et al., 2018).

1.3.3 Valorización y biorrefinería de cáscara de naranja

La valorización de la cáscara de naranja puede orientarse a productos de alto valor, como limoneno y pectina, o a rutas de tratamiento y energía, como bioetanol, biogás,

compostaje, alimentación animal y materiales funcionales. El modelo de biorrefinería organiza estas alternativas para recuperar primero los compuestos de mayor valor y aprovechar posteriormente las fracciones remanentes, de manera similar a otras propuestas de recuperación de residuos de naranja como materia prima para nuevos productos (Rezzadori et al., 2012; Pourbafrani et al., 2010; Panwar et al., 2021; Vaez et al., 2021; Arango-Manrique et al., 2024).

1.3.4 Huella de carbono, residuos sólidos y análisis de ciclo de vida

La huella de carbono y el análisis de ciclo de vida permiten comparar alternativas de manejo bajo un enfoque de sistema. Esta comparación exige revisar límites, unidades funcionales, consumo energético, transporte, reactivos y destino final. Por ello, los valores reportados por diferentes estudios deben interpretarse con cautela cuando sus condiciones metodológicas no son equivalentes y cuando se relacionan con emisiones de gases de efecto invernadero expresadas como dióxido de carbono equivalente (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b; Caldeira et al., 2020; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023; Teigiserova et al., 2022).

1.4 Marco legal y normativo

El soporte normativo se organizó separando normas nacionales, políticas públicas, referentes internacionales y estándares técnicos. Esta división permite reconocer que el aprovechamiento de la cáscara de naranja no depende solo de la tecnología, sino también de lineamientos sobre gestión ambiental, residuos, cambio climático, economía circular y evaluación ambiental. Para el contexto colombiano se consideran la Ley 99 de 1993, la Ley 1931 de 2018 y el Decreto 1076 de 2015, mientras que a nivel internacional se toman como referentes la Agenda 2030, la Directiva (UE) 2018/851 sobre residuos y las normas ISO 14040 e ISO 14044 (Congreso de la República de Colombia, 1993, 2018; Presidencia de la República de Colombia, 2015; United Nations, 2015; European Parliament and Council of the European Union, 2018; ISO, 2006a, 2006b).

Tabla 2 Marco legal y normativo relacionado con la investigación.

Nivel	Norma, política o referente	Aporte al estudio
Nacional	Ley 99 de 1993	Establece bases de la gestión ambiental colombiana y organización institucional del sector ambiente.
Nacional	Decreto 1076 de 2015	Compila la regulación del sector ambiente y sirve como marco general para gestión de recursos y residuos.
Nacional	Ley 1931 de 2018	Relaciona la gestión del cambio climático con acciones de mitigación y seguimiento de emisiones.
Política pública	Estrategia Nacional de Economía Circular (2019)	Promueve cierre de ciclos, innovación tecnológica y nuevos modelos de negocio.
Política pública	Plan de Acción para la Gestión Sostenible de Biomasa Residual (2022)	Reconoce la biomasa residual como flujo estratégico para aprovechamiento y sostenibilidad.
Internacional	Agenda 2030 de Naciones Unidas	Relaciona producción y consumo responsables con reducción de residuos y aprovechamiento de recursos.
Internacional	Directiva (UE) 2018/851 sobre residuos	Aporta referentes sobre jerarquía de residuos, prevención, reutilización y valorización.
Técnico	ISO 14040 e ISO 14044	Orientan análisis de ciclo de vida y comparación ambiental de alternativas tecnológicas.

Nota. Elaboración propia a partir de Congreso de la República de Colombia (1993, 2018), Presidencia de la República de Colombia (2015), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

(2019, 2022), United Nations (2015), European Parliament and Council of the European Union (2018) e ISO (2006a, 2006b).

1.5 Antecedentes de la investigación (estado del arte)

La investigación sobre residuos cítricos ha pasado de describir opciones de uso aisladas a estudiar esquemas integrados de valorización y evaluación ambiental. En los trabajos recientes se observa mayor interés por biorrefinerías, análisis de ciclo de vida, recuperación de compuestos de alto valor, aplicaciones de materiales funcionales y comparación entre escenarios de manejo (Sharma et al., 2022; Suri et al., 2021, 2022; AlZahabi et al., 2025; Cinardi et al., 2025).

En otro lugar, el enfoque no está en demostrar que la cáscara pueda usarse para producir pectina, limoneno o biogás. La pregunta es ahora cómo minimizar el impacto ambiental utilizando estas vías (Manakas et al., 2025; Teigiserova et al., 2022). Dependiendo de los límites del sistema, de la fuente de energía y del consumo de reactivos, la interpretación final del impacto ambiental puede cambiar (Manakas et al., 2025; Teigiserova et al., 2022).

En bioenergía, Pourbafrani et al. (2010), Boluda-Aguilar y López-Gómez (2013), Calabrò et al. (2016) y Wikandari et al. (2015) muestran que la biomasa cítrica puede generar bioenergía, pero requiere varios pretratamientos. Condiciones como el limoneno y la acidez no representan detalles menores; afectan significativamente la estabilidad de las fermentaciones y de las digestiones anaerobias (Ruiz & Flotats, 2014; Martín et al., 2010).

En Colombia el enfoque está en la economía circular, la valorización de biomasa residual y residuos orgánicos. Se ha presentado un caso aplicado en pequeñas industrias de jugos cítricos por Ortiz-Sanchez et al. (2020). Otros estudios fortalecen la discusión en las áreas de diseño y sostenibilidad de biorefinerías, así como otros temas relacionados (Arango-Manrique et al., 2024; Ortiz-Sanchez et al., 2024). Sin embargo, para la implementación, los estudios citados destacan la falta de capacidades de gobernanza e integración

institucional y la escasez de datos locales como los mayores desafíos para implementar la Estrategia de Economía Circular en Colombia (Vera-Acevedo & Raufflet, 2022).

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Tipo, enfoque, alcance y diseño de investigación

La investigación es documental, de alcance descriptivo-analítico y diseño no experimental. Se apoya en una revisión sistemática de literatura porque organiza y compara información reportada por otros estudios, sin manipular variables ni realizar mediciones de campo. El enfoque es mixto documental: cualitativo para interpretar rutas, limitaciones y lineamientos; y cuantitativo para organizar valores, rangos y unidades reportadas en los indicadores ambientales (Page et al., 2021; ISO, 2006a, 2006b).

2.2 Población y muestra documental

La población documental estuvo formada por 385 registros recuperados en bases académicas y fuentes institucionales. Después de eliminar duplicados, revisar títulos y resúmenes, evaluar textos completos y aplicar criterios de inclusión, la muestra final quedó conformada por 50 documentos. Esta muestra incluye artículos científicos, revisiones, normas técnicas, informes institucionales y reportes internacionales relacionados con residuos cítricos, cáscara de naranja, economía circular, biorrefinería, huella de carbono y residuos sólidos (Page et al., 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019, 2022).

2.3 Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda se desarrolló mediante ecuaciones en español e inglés, usando operadores booleanos y filtros por año, tipo de documento e idioma. Los conteos se incluyeron en el cuerpo metodológico para que el lector pueda verificar el origen de la muestra sin depender de anexos extensos.

Tabla 3 Estrategia de búsqueda bibliográfica empleada.

Base/fuente	Ecuación o términos	Filtros	Registros identificados	Preseleccionados	Incluidos
Scopus	orange peel OR citrus waste AND circular economy AND carbon footprint	2018-2025; artículos y revisiones; inglés/español	72	18	10
ScienceDirect	orange peel waste AND valorization AND biorefinery	2018-2025; research/review articles	64	16	9
SpringerLink	orange peel AND biogas OR pectin OR bioethanol	2018-2025; environmental/engineering	48	12	6
MDPI	citrus waste valorisation AND environmental sustainability	2018-2025; texto completo	38	10	5
SciELO/Redalyc	residuos cítricos OR cáscara de naranja AND economía circular	2018-2025; español/portugués	27	8	4
Google Scholar	cáscara de naranja huella de carbono valorización de residuos	2018-2025; primeras páginas; pertinencia temática	120	24	10

Fuentes oficiales	economía circular Colombia; biomasa residual; residuos sólidos cítricos	MinAmbiente, DANE, FAO, IPCC, ISO, ONU	16	7	6

Nota. Los conteos corresponden al proceso documental utilizado para conformar la muestra final de 50 fuentes.

2.4 Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión y exclusión funcionaron como filtros de contenido. PRISMA, en cambio, se usó como procedimiento de trazabilidad para documentar cuántos registros pasaron por cada fase. Esta diferencia es importante porque los criterios indican qué se acepta o descarta, mientras que PRISMA muestra cómo se realizó la depuración (Page et al., 2021).

Tabla 4 Criterios de inclusión y exclusión.

Criterio	Inclusión	Exclusión
Tema	Cáscara de naranja, residuos cítricos, economía circular, biorrefinería, huella de carbono y residuos sólidos.	Fuentes sin relación directa con residuos cítricos o biomasa orgánica.
Tipo de fuente	Artículos científicos, revisiones, normas, informes oficiales y documentos técnicos.	Blogs, páginas comerciales o documentos sin respaldo académico o institucional.
Periodo	Principalmente 2018-2025, con fuentes clásicas metodológicas o conceptuales justificadas.	Documentos obsoletos sin relevancia conceptual o metodológica.

Acceso	Texto completo o información bibliográfica verificable.	Documentos sin acceso suficiente para evaluar metodología o resultados.
Pertinencia	Fuentes que aportan a rutas tecnológicas, indicadores, aportes ambientales o lineamientos.	Fuentes generales sin datos, indicadores o relación con los objetivos.

Nota. Elaboración propia.

2.5 Procedimiento de selección documental mediante PRISMA 2020

La selección se desarrolló en cinco fases: identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión. En la primera fase se recuperaron registros en bases de datos y fuentes oficiales. Luego se eliminaron duplicados por coincidencia de título, autores, DOI o año. En el cribado se revisaron títulos y resúmenes. En la elegibilidad se analizaron textos completos. Finalmente, se incluyeron los documentos que aportaban información directa a los objetivos (Page et al., 2021).

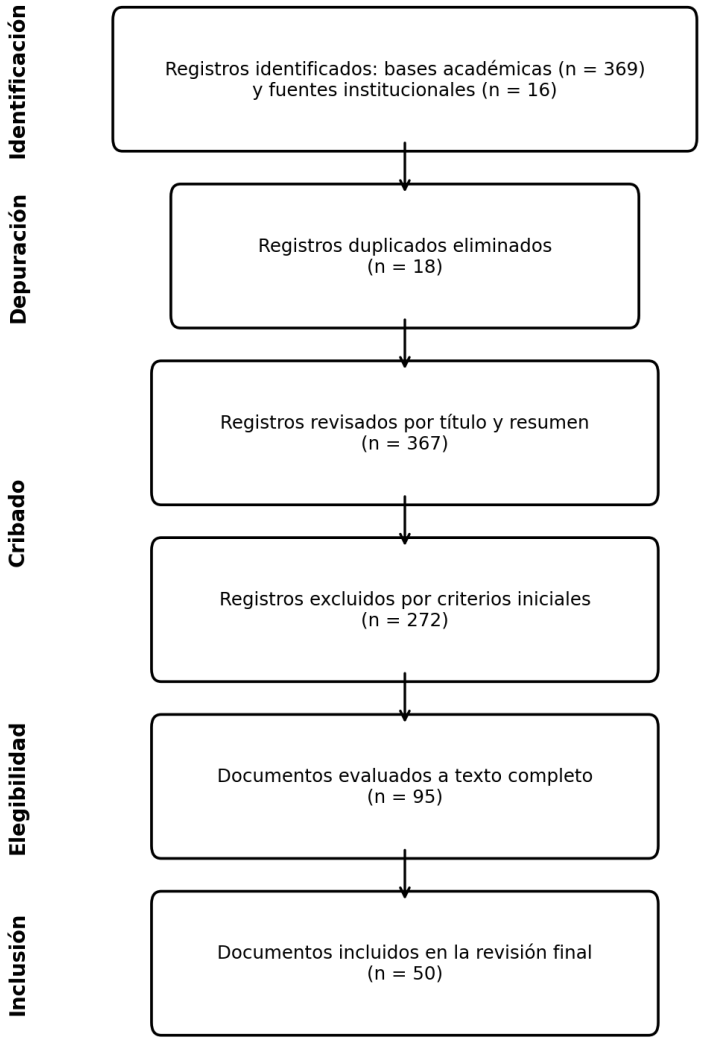
Tabla 5 Registro del flujo PRISMA 2020.

Fase	Actividad	Cantidad	Observación
Identificación	Registros identificados en bases de datos académicas	n = 369	Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, SciELO, Redalyc y Google Scholar.
Identificación	Registros identificados en fuentes institucionales	n = 16	MinAmbiente, DANE, FAO, IPCC, ISO, DNP y ONU.
Depuración	Registros duplicados eliminados	n = 18	Coincidencias por título, DOI, autores o año.
Cribado	Registros revisados por título y resumen	n = 367	Pertinencia temática y relación con objetivos.

Cribado	Registros excluidos por criterios iniciales	n = 272	Sin relación directa, sin enfoque ambiental, sin indicadores o fuente no confiable.
Elegibilidad	Documentos evaluados a texto completo	n = 95	Revisión de metodología, resultados e indicadores.
Elegibilidad	Documentos excluidos después de texto completo	n = 45	Sin datos útiles, sin acceso completo o baja pertinencia.
Inclusión	Documentos incluidos en la revisión final	n = 50	Fuentes utilizadas en la síntesis de resultados y referencias finales.

Nota. Elaboración propia con base en Page et al. (2021).

Figura 1 Flujo de selección documental según PRISMA 2020



Nota. Elaboración propia con base en Page et al. (2021).

2.6 Extracción, organización y comparación de indicadores ambientales

La extracción de indicadores se realizó en una matriz específica. En cada estudio se registró la ruta tecnológica, el indicador reportado, el valor numérico cuando estaba

disponible, la unidad de medida, la condición de evaluación, la escala del ensayo y el límite metodológico. Cuando el estudio no entregaba un valor comparable, se clasificó como evidencia cualitativa y no se mezcló con los resultados cuantitativos (ISO, 2006a, 2006b; Cinardi et al., 2025).

La comparación se hizo en tres niveles. Primero, se agruparon indicadores de la misma naturaleza, como CO_2-eq, CH_4, rendimiento de extracción, producción energética o desviación de residuos. Segundo, se revisó si las unidades eran equivalentes. Tercero, se interpretaron las diferencias metodológicas, especialmente el límite del sistema, la fuente de energía, la presencia de pretratamientos y el tipo de biomasa evaluada (Manakas et al., 2025; Teigiserova et al., 2022).

Tabla 6 Matriz de extracción y comparación de indicadores ambientales

Campo extraído	Descripción	Uso en el análisis
Ruta tecnológica	Limoneno, pectina, bioetanol, biogás, compostaje, alimentación animal, adsorbentes o biorrefinería.	Permite comparar alternativas de aprovechamiento.
Indicador ambiental	CO_2-eq, CH_4, residuos sólidos, rendimiento, valorización de biomasa o sustitución de insumos.	Define qué dimensión ambiental se analiza.
Valor o rango	Dato numérico reportado por el estudio, cuando existe.	Soporta comparación técnica entre rutas.
Unidad	kg CO_2-eq, m^3 CH_4, L de etanol, kg de pectina, %, g/g, mL H_2/g VS.	Evita comparar magnitudes incompatibles.
Condición de evaluación	Temperatura, tiempo, pretratamiento, escala, tipo de proceso, fuente energética o límite de sistema.	Explica por qué dos valores pueden diferir.

Aplicabilidad a Colombia	Lectura técnica sobre infraestructura, escala, datos requeridos y viabilidad territorial.	Conecta la evidencia con el contexto agroindustrial colombiano.

Nota. Elaboración propia a partir de ISO (2006a, 2006b), Page et al. (2021), Cinardi et al. (2025) y Manakas et al. (2025).

2.7 Procedimiento metodológico por objetivo específico

El procedimiento se organizó por objetivo para mostrar con claridad cómo se pasó de la búsqueda documental al análisis de resultados. Esta organización evita que la metodología quede como una descripción general y permite verificar qué técnica se aplicó para cada resultado.

Tabla 7 Procedimiento metodológico por objetivo específico.

Objetivo	Procedimiento aplicado	Producto obtenido
Objetivo 1	Se revisaron títulos, resúmenes y resultados de los 50 documentos; se clasificaron las rutas según proceso, producto, ventaja, limitación y frecuencia documental.	Tabla de rutas, figura de frecuencia y análisis de valorización en cascada.
Objetivo 2	Se extrajeron indicadores ambientales con valor, unidad, condición y fuente; se separaron resultados cuantitativos, rangos y evidencia cualitativa; luego se compararon según equivalencia metodológica.	Tabla de valores reportados, comparación técnica por ruta y análisis de diferencias metodológicas.
Objetivo 3	Se agruparon los aportes ambientales en reducción de residuos, mitigación de emisiones, sustitución de insumos, recuperación de valor y economía circular.	Tabla de aportes ambientales e interpretación frente a gestión lineal y circular.

Objetivo 4	Se triangularon resultados técnicos, indicadores, barreras y marco normativo; cada lineamiento se vinculó con actor, acción, indicador y soporte bibliográfico.	Tabla de lineamientos estratégicos aplicables a la agroindustria colombiana.

Nota. Elaboración propia.

2.8 Instrumentos de recolección y análisis de datos

Tabla 8 Instrumentos de recolección y tratamiento de datos.

Instrumento	Información recolectada	Ubicación en el documento	Uso analítico
Matriz de búsqueda bibliográfica	Base de datos, ecuación, filtros y conteos.	Tabla 3.	Demuestra trazabilidad de búsqueda.
Criterios de inclusión y exclusión	Condiciones de aceptación y descarte.	Tabla 4.	Justifica depuración documental.
Registro PRISMA	Identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión.	Tabla 5 y Figura 1.	Evidencia transparencia del proceso.
Matriz documental	Autor, año, ruta, hallazgo, limitación y aporte.	Tablas 10 y 11.	Soporta resultados del objetivo 1.
Matriz de indicadores ambientales	Ruta, indicador, valor, unidad, condición y fuente.	Tablas 12 y 13.	Soporta resultados del objetivo 2.
Matriz normativa y técnica	Norma, política, criterio técnico, actor e indicador.	Tablas 2 y 16.	Soporta la formulación de lineamientos.

Nota. Elaboración propia.

2.9 Operacionalización de variables y categorías

Tabla 9 Operacionalización de variables y categorías de análisis.

Objetivo	Categoría	Indicadores	Técnica de análisis
Objetivo 1	Rutas tecnológicas	Tipo de proceso, producto obtenido, ventajas, limitaciones y frecuencia documental.	Clasificación documental y análisis comparativo.
Objetivo 2	Indicadores ambientales	CO_2-eq, CH_4, residuos sólidos, tasa de valorización, rendimiento, producción energética y sustitución de insumos.	Tabulación, comparación por unidad y discusión narrativa.
Objetivo 3	Aportes ambientales	Reducción de disposición final, mitigación de emisiones, recuperación de valor y circularidad.	Análisis de contenido e integración de evidencia.
Objetivo 4	Lineamientos estratégicos	Acción, actor responsable, indicador de seguimiento y soporte normativo.	Síntesis normativa y técnica.

Nota. Elaboración propia.

2.10 Consideraciones éticas y uso de herramientas digitales

El estudio se clasifica como investigación sin riesgo, pues se fundamenta en fuentes secundarias de acceso académico e institucional. No se trabajó con sujetos humanos, animales ni comunidades. Se respetó la propiedad intelectual mediante citación y referencias en APA 7. Las herramientas digitales se usaron para organizar información, revisar estilo y apoyar la edición; el análisis se construyó a partir de lectura crítica, contraste de fuentes y validación bibliográfica.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados se presentan por objetivo específico. Las matrices de búsqueda, selección, extracción y comparación se integraron en el cuerpo del documento mediante tablas, figuras y análisis narrativo. Esta decisión permite que el lector identifique la fuente de cada resultado y relacione los hallazgos con los procedimientos metodológicos descritos.

3.1 Caracterización bibliométrica y documental de la revisión

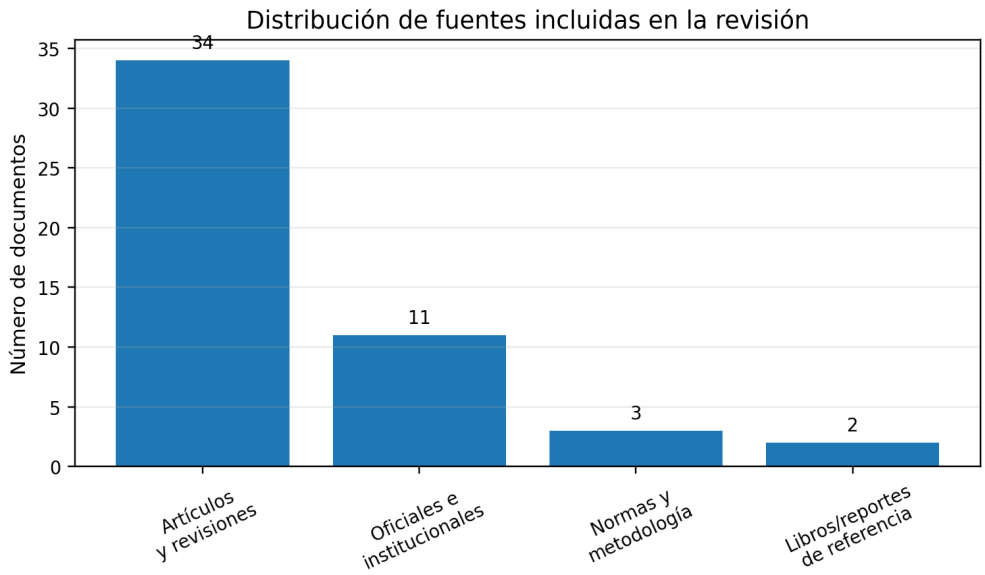
El corpus final estuvo conformado por 50 documentos. Predominaron los artículos científicos y revisiones, con 34 registros, seguidos por documentos oficiales e institucionales. Esta composición fue adecuada para una revisión bibliográfica porque permitió combinar evidencia técnica sobre rutas de valorización con política pública y referentes metodológicos (Page et al., 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Tabla 10 Distribución descriptiva de documentos incluidos en la revisión.

Tipo de fuente	Cantidad	Porcentaje aproximado	Uso en el documento
Artículos científicos y revisiones	34	68 %	Marco teórico, estado del arte y resultados por objetivos.
Documentos oficiales e institucionales	11	22 %	Marco legal, política pública y lineamientos estratégicos.
Normas técnicas y documentos metodológicos	3	6 %	Análisis de ciclo de vida, metodología y PRISMA.
Libros o reportes de referencia	2	4 %	Soporte conceptual y ambiental.

Nota. Elaboración propia a partir de la matriz documental integrada.

Figura 2 Distribución de fuentes incluidas en la revisión



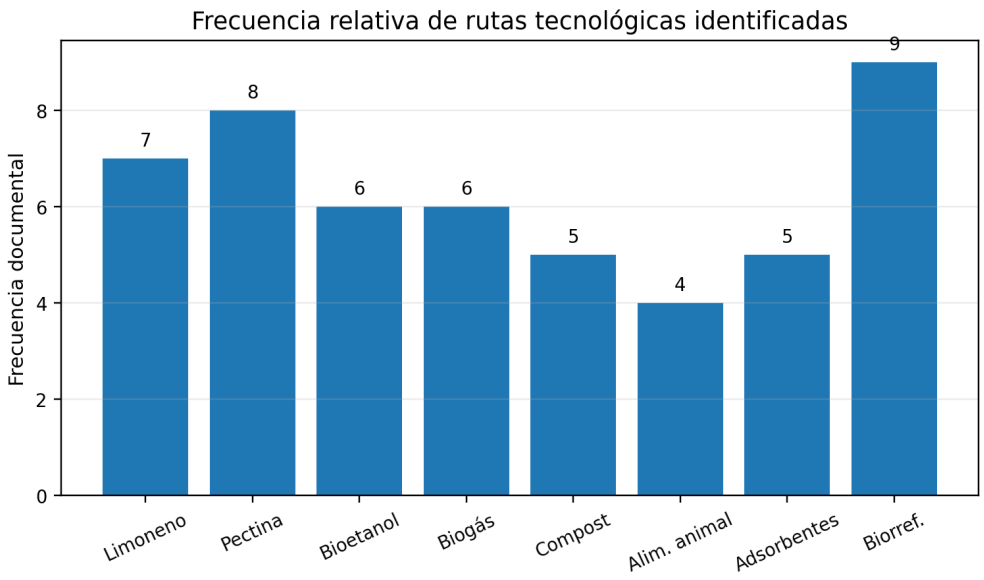
Nota. Elaboración propia a partir de la matriz documental integrada.

Los descriptores más frecuentes fueron cáscara de naranja, residuos cítricos, biorrefinería, economía circular, análisis de ciclo de vida, limoneno, pectina, bioetanol y biogás. Esta concentración temática muestra que la literatura actual se mueve entre dos intereses: recuperar compuestos de valor y demostrar, con indicadores, si esa recuperación reduce impactos frente a la disposición final (Sharma et al., 2022; Cinardi et al., 2025).

3.2 Resultados del objetivo 1: rutas tecnológicas de valorización

Se identificaron siete rutas principales de valorización: extracción de aceites esenciales, obtención de pectina, producción de bioetanol, digestión anaerobia para biogás, compostaje, alimentación animal y materiales adsorbentes o biochar. Además, la biorrefinería en cascada aparece como un esquema integrador, porque combina varias rutas en una secuencia de aprovechamiento (Pourbafrani et al., 2010; Vaez et al., 2021; Sharma et al., 2022).

Figura 3 Frecuencia relativa de rutas tecnológicas identificadas



Nota. Elaboración propia a partir de la matriz documental integrada. La frecuencia representa recurrencia temática en los documentos revisados, no un metaanálisis estadístico.

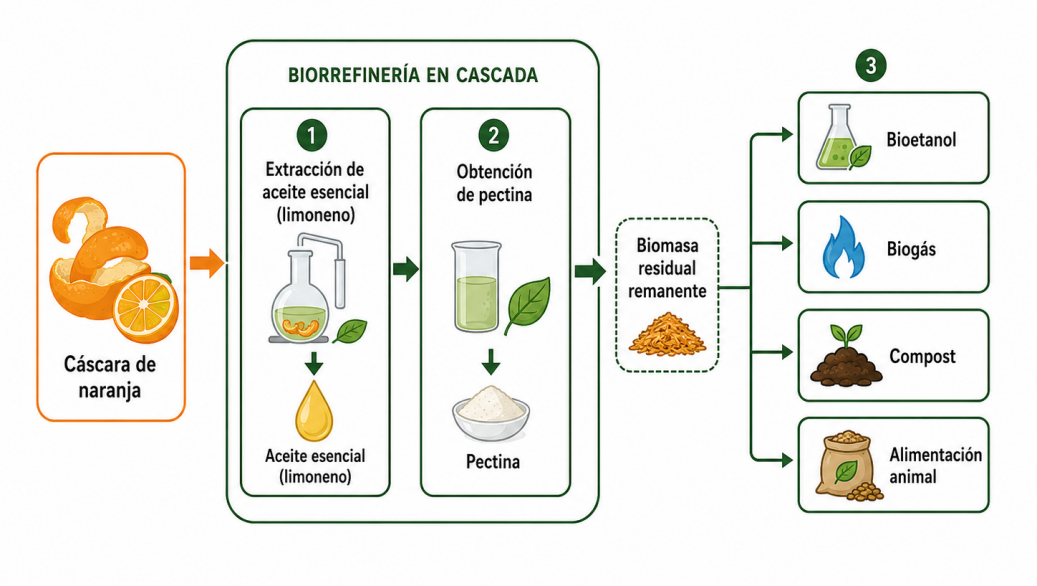
Tabla 11 Estudios base y aportes de las principales rutas de valorización

Ruta	Autores base	Hallazgos principales	Limitaciones reportadas	Aporte al objetivo
Aceite esencial / limoneno	Rafiq et al. (2018); Zema et al. (2018)	Recupera fracciones aromáticas de alto valor presentes en el flavedo.	Requiere equipos de extracción y control energético; el limoneno puede inhibir procesos biológicos.	Identifica una ruta química de alto valor.
Pectina	Dávila et al. (2015); Vaez et al. (2021)	La cáscara es fuente relevante de pectina para usos alimentarios e industriales.	Puede requerir agua, energía, ácidos o reactivos; su sostenibilidad depende del proceso.	Evidencia valorización material de componentes estructurales.

Bioetanol	Boluda-Aguilar & López-Gómez (2013); Pourbafrani et al. (2010)	Los azúcares y fracciones lignocelulósicas pueden transformarse en biocombustible.	Necesita pretratamientos y control de inhibidores.	Relaciona biomasa cítrica con valorización energética.
Biogás	Martín et al. (2010); Ruiz & Flotats (2014); Wikandari et al. (2015)	La digestión anaerobia puede recuperar energía y reducir descomposición no controlada.	La acidez y aceites esenciales pueden inhibir el proceso.	Soporta mitigación de metano y recuperación energética.
Compostaje	Caldeira et al. (2020); Teigiserova et al. (2020); Zema et al. (2018)	Estabiliza materia orgánica y desvía residuos de disposición final.	Tiene menor valor agregado y requiere control de humedad, aireación y acidez.	Alternativa viable donde hay menor infraestructura.
Alim. animal	Tripodo et al. (2004); Panwar et al. (2021)	Reincorpora biomasa fibrosa y energética al sistema productivo.	Exige control sanitario, secado y estabilidad del material.	Amplía posibilidades de uso agropecuario.
Adsorbentes / biochar	Mahato et al. (2019); AlZahabi et al. (2025)	Genera materiales para remoción de contaminantes o aplicaciones ambientales.	Requiere activación, tratamiento o conversión termoquímica.	Conecta residuos cítricos con materiales funcionales.
Biorrefinería en cascada	Arango-Manrique et al. (2024); Vaez et al. (2021); Sharma et al. (2022)	Integra rutas de alto valor y aprovecha fracciones remanentes.	Demanda inversión, diseño técnico y suministro constante.	Es el enfoque más integral para el aprovechamiento.

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión documental.

Figura 4 Modelo de biorrefinería en cascada para el aprovechamiento de la cáscara de naranja.



Nota. Elaboración propia con base en Zema et al. (2018), Sharma et al. (2022) y Vaez et al. (2021).

La extracción de aceite esencial se ubica como una etapa inicial porque recupera limoneno antes de enviar la biomasa a procesos biológicos. Esta decisión tiene sentido técnico: el limoneno tiene valor comercial, pero también puede actuar como inhibidor en digestión anaerobia o fermentación, por lo que retirarlo puede mejorar procesos posteriores (Zema et al., 2018; Ruiz & Flotats, 2014; Rafiq et al., 2018).

La pectina representa una ruta de valorización material de mayor valor que el compostaje o la alimentación animal. Su recuperación debe analizarse junto con el uso de agua, energía y reactivos, porque el rendimiento no es el único criterio ambiental. Los procesos de alto rendimiento pueden no ser lo suficientemente ecológicamente eficientes si requieren una gran cantidad de insumos (Dávila et al., 2015; Vaez et al., 2021).

Las rutas de bioetanol y biogás utilizan azúcares y materia orgánica residual para producir energía. El bioetanol tiene claras ventajas, pero existen pretreatments y condiciones de operación que deben estar estrictamente controlados y, como tal, la integración de

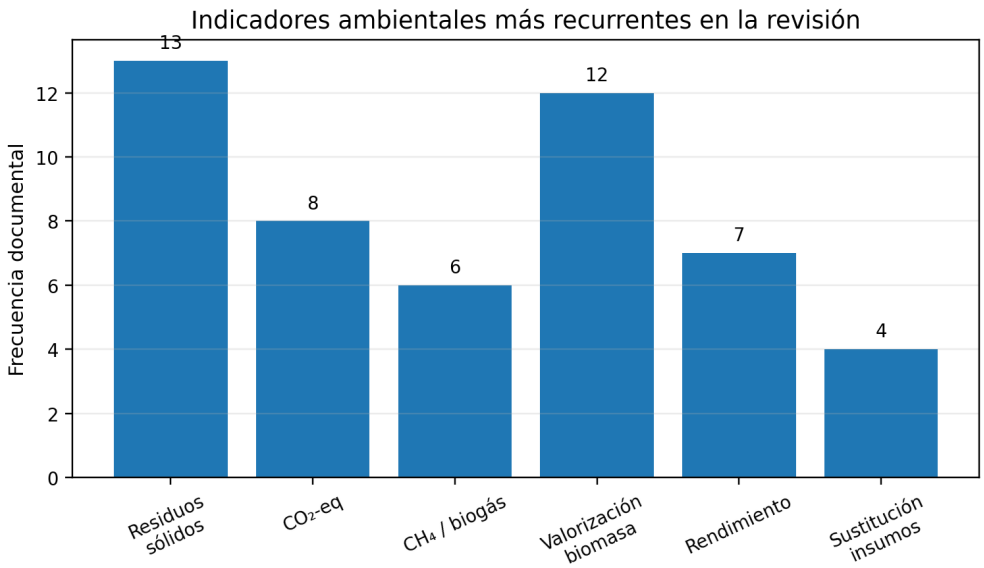
biorefinería es un enfoque mejor (Pourbafrani et al., 2010; Boluda-Aguilar & López-Gómez, 2013; Calabrò et al., 2016; Wikandari et al., 2015; Sharma et al., 2022).

El compostaje y la alimentación animal tienen menores niveles de complejidad técnica. Agregan menos valor, sin embargo, pueden aplicarse donde no exista capacidad tecnológica para la extracción, fermentación o digestión anaerobia. Su relevancia para Colombia radica en su potencial para actuar como un paso temprano en la reducción de residuos (Tripodo et al., 2004; Panwar et al., 2021; Caldeira et al., 2020) mientras se instalan tecnologías más complejas para la gestión de residuos.

3.3 Resultados del objetivo 2: comparación técnica de indicadores ambientales

La comparación del segundo objetivo no se limitó a nombrar indicadores; incorporó valores, unidades y condiciones de evaluación reportadas en estudios clave. La lectura muestra que los indicadores más comunes son reducción de residuos sólidos, CO_2-eq, CH_4, rendimiento de extracción, producción de bioenergía y valorización de biomasa (ISO, 2006a, 2006b; Manakas et al., 2025).

Figura 5 Indicadores ambientales más recurrentes en la revisión.



Nota. Elaboración propia a partir de la matriz de indicadores integrada.

Tabla 12 Valores, unidades y condiciones reportadas para indicadores ambientales.

Ruta o enfoque	Fuente	Indicador y valor reportado	Condición de evaluación	Lectura técnica
Residuos cítricos procesados	Rafiq et al. (2018); Mahato et al. (2019)	Fracción residual: 40-60 % del fruto o 44 % como subproducto de procesamiento.	Residuos de procesamiento de cítricos y naranja para jugo.	Confirma que la cáscara representa una corriente significativa de biomasa.
Biorrefinería integrada	Pourbafrani et al. (2010)	39,64 L de etanol; 45 m³ de metano; 8,9 L de limoneno; 38,8 kg de pectina por tonelada de residuo cítrico fresco con 20 % de materia seca.	Hidrólisis ácida diluida; mejor rendimiento de azúcares de 0,41 g/g de residuos secos.	Una misma tonelada puede generar varios productos si se integra el proceso.

Biorrefinería sin enzimas	Vaez et al. (2021)	24,7 % de pectina de cáscara; 244 kg de pectina; 26,5 L de etanol; 36 m^3 de metano por tonelada de residuo de naranja.	Tratamiento a 94 °C durante 60 min; aprovechamiento de cáscara y pulpa.	La pectina domina el valor material; la bioenergía queda como uso complementario.
Digestión anaerobia	Wikandari et al. (2015)	Producción de metano: 0,061 a 0,217 m^3 CH_4/kg VS.	Lixiviación de limoneno a 20 °C durante 10 min antes de digestión.	El pretratamiento triplicó la producción de metano y confirma la importancia de remover inhibidores.
Biorref. y electricidad	Teigiserova et al. (2022)	Cambio climático: 4388, 2404 y 594 kg CO_2-eq por tonelada de residuo de cáscara de naranja.	Escenarios con mezcla eléctrica actual, renovable y eólica.	La fuente de electricidad cambia fuertemente la huella de carbono.
Caso colombiano	Ortiz-Sanchez et al. (2020)	Escala de procesamiento: 200 t/mes y 16.666 kg/día.	Pequeña industria de jugo de naranja localizada cerca de Manizales, Colombia.	La escala real condiciona la selección tecnológica.
Hidrógeno y VFA	Ortiz-Sanchez et al. (2024)	142,88 ± 2,90 mL H_2/g VS y 13,10 ± 0,65 g VFA/L.	Residuo tras extracción de aceite esencial por hidrodestilación a ISR 0,6.	La extracción previa de aceites puede mejorar la valorización biotecnológica posterior.
ACV de manejo	Negro et al. (2017)	Diez escenarios comparados mediante categorías de ACV.	Evaluación consecuencial de alternativas de gestión de cáscara de naranja.	Los resultados dependen del límite de sistema y de las cargas evitadas.

Nota. Elaboración propia a partir de la matriz de indicadores ambientales integrada. Los valores se presentan solo cuando fueron reportados por los estudios revisados; no se mezclan unidades que no son equivalentes.

La Tabla 12 permite ver que los estudios no reportan los indicadores de la misma manera. Algunos entregan productos por tonelada de residuo fresco, otros expresan rendimientos en porcentaje, y otros usan unidades de análisis de ciclo de vida. Esta diferencia impide

sumar los resultados en una única escala, pero sí permite comparar tendencias y condiciones de operación (Pourbafrani et al., 2010; Vaez et al., 2021; Teigiserova et al., 2022).

La biorrefinería integrada muestra el mayor potencial de aprovechamiento porque genera varios productos desde la misma biomasa. Pourbafrani et al. (2010) reportaron etanol, metano, limoneno y pectina por tonelada de residuo cítrico, mientras que Vaez et al. (2021) encontraron rendimientos altos de pectina y producción complementaria de bioenergía. Estos datos sugieren que la cáscara no debería destinarse directamente a compostaje cuando existe capacidad técnica para recuperar compuestos de mayor valor.

La digestión anaerobia tiene un comportamiento más sensible a las condiciones del proceso. Wikaandari et al. (2015) encontraron que la lixiviación de limoneno aumentó la producción de biogás de 0.061 a 0.217 m^3 CH_4/kg VS. Calabrò et al. (2016) reportaron la producción de biometano a partir de residuos de naranja ensilados. Esto indica que el sustrato es utilizable, sin embargo depende de un acondicionamiento previo. El caso con Colombia es relevante, porque sugiere que, sin controlar el efecto inhibitorio de los aceites esenciales, pueden ocurrir resultados bajos al instalar biodigestores sin tratamiento previo.

Con respecto a la huella de carbono, la comparación más clara es en los estudios que la evaluaron mediante Evaluación del Ciclo de Vida. Teigiserova et al. (2022) reportaron que el escenario con la mezcla eléctrica actual tenía una carga climática mayor que los escenarios con electricidad renovable o eólica. Esto sugiere que el desempeño ambiental de una biorefinería no depende únicamente del uso de residuos. La carga también depende de la energía e insumos requeridos para su transformación.

Tabla 13 Comparación técnica de rutas según indicadores ambientales.

Ruta	Fortaleza ambiental	Limitación metodológica	Comparabilidad	Implicación para Colombia
Limoneno	Recupera compuesto de alto valor y puede reducir inhibidores en procesos posteriores.	Los estudios reportan masa o volumen recuperado, pero no siempre incluyen consumo energético.	Media: depende del método de extracción.	Útil como primera etapa si existe escala suficiente y equipo de extracción.
Pectina	Genera un producto industrial de mayor valor agregado.	Los rendimientos varían por temperatura, tiempo, solvente y estado de la biomasa.	Media: comparar solo con condiciones similares.	Prometedora para articulación universidad-empresa, pero requiere control de calidad.
Bioetanol	Aprovecha azúcares fermentables y puede reemplazar combustibles fósiles en parte.	Requiere hidrólisis, fermentación y control de inhibidores; no siempre se reporta balance energético.	Media-baja: unidades y escalas varían.	Viable en proyectos piloto, pero difícil sin infraestructura de fermentación.
Biogás	Reduce descomposición no controlada y recupera energía.	Muy sensible a limoneno, pH, carga orgánica y pretratamiento.	Media: comparable cuando se expresa en m^3 CH_4/kg VS.	Aplicable en escalas pequeñas o medianas si se controla el pretratamiento.
Compostaje	Desvía residuos de disposición final y produce enmienda orgánica.	Pocos estudios cuantifican huella de carbono completa del proceso.	Baja-media: se compara mejor por toneladas desviadas.	Ruta inicial viable para territorios sin alta tecnología.

Biorrefinería	Integra recuperación de alto valor y uso de remanentes.	Requiere límites de sistema claros; puede aumentar impactos por energía.	Alta si usa ACV con unidad funcional común.	Alternativa estratégica, pero demanda inversión, datos locales y suministro constante.

Nota. La información adicional se basa en Pourbafrani et al. (2010), Váez et al. (2021), Wikandari et al. (2015), Teigiserova et al. (2022), Manakas et al. (2025) y Cinardi et al. (2025).

La ruta más favorable no está necesariamente definida por el producto. Una evaluación ambiental debe demostrar la reducción en la disposición final, las emisiones y la recuperación de valor sin desplazar impactos a otra parte del sistema. Los estudios de Análisis de Ciclo de Vida son más útiles para políticas y decisiones de inversión que aquellos que reportan rendimientos de extracción (ISO, 2006a, 2006b, Negro et al., 2017).

Para Colombia, la evidencia sugiere un enfoque incremental. Los territorios con menor desarrollo infraestructural podrían iniciar la reducción de residuos mediante procesos como compostaje, alimentación animal y digestión anaerobia. En cambio, la recuperación de pectina, limoneno y biorrefinería requiere caracterización de la biomasa, continuidad de suministro, inversión y alianzas con centros de investigación (Ortiz-Sanchez et al., 2020; DANE, 2024; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Tabla 14 Implicaciones de los resultados para el contexto colombiano.

Hallazgo técnico	Riesgo si se aplica sin ajuste	Recomendación para Colombia
La cáscara puede representar una fracción alta del procesamiento cítrico.	Diseñar tecnologías sin conocer volúmenes reales puede generar sobredimensionamiento.	Levantar inventarios locales de generación por empresa, municipio o cadena productiva.
La pectina y el limoneno ofrecen mayor valor agregado.	Priorizar compostaje directo puede perder compuestos recuperables.	Evaluar extracción previa cuando exista escala y capacidad técnica.
El limoneno puede inhibir digestión anaerobia.	Biodigestores sin pretratamiento pueden tener baja producción de metano.	Incluir etapa de extracción, lixiviación o control de inhibidores.

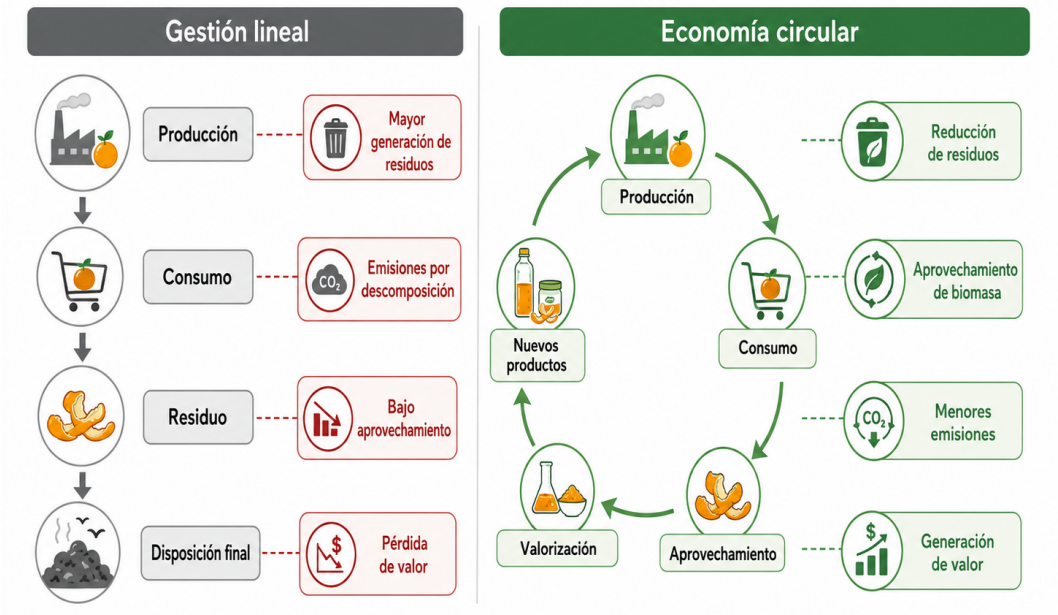
La huella de carbono depende de la electricidad y los insumos.	Una tecnología circular puede aumentar impactos por alto consumo energético.	Realizar ACV o balance ambiental antes de escalar proyectos.
Las rutas simples pueden ser útiles en territorios con poca infraestructura.	Esperar solo biorrefinerías avanzadas puede retrasar acciones de manejo.	Implementar estrategias escalonadas: separación, compostaje, biogás y luego extracción.

Nota. Elaboración propia a partir de Ortiz-Sanchez et al. (2020), Teigiserova et al. (2022), Vaez et al. (2021), Wikandari et al. (2015) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022).

3.4 Resultados del objetivo 3: aportes ambientales de las rutas de valorización

Los aportes ambientales se agruparon en reducción de residuos enviados a disposición final, mitigación de emisiones, sustitución de materias primas, recuperación de valor y fortalecimiento de economía circular. Estos aportes no se asumieron como automáticos; se interpretaron con base en el tipo de indicador reportado, el proceso evaluado y las condiciones metodológicas de cada estudio (Aguilar-Hernández et al., 2021; Cinardi et al., 2025).

Figura 6 Comparación entre gestión lineal y economía circular en el manejo de la cáscara de naranja.



Nota. Elaboración propia con base en Aguilar-Hernández et al. (2021), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) y World Bank (2018).

Tabla 15 Aportes ambientales identificados por ruta de valorización.

Aporte ambiental	Rutas relacionadas	Evidencia sintetizada	Condición para su aplicación
Reducción de residuos sólidos	Compostaje, alimentación animal, biorrefinería y digestión anaerobia.	Las rutas desvían biomasa de disposición final y la reincorporan al sistema productivo.	Separación en fuente, acopio y caracterización del residuo.
Mitigación de emisiones	Digestión anaerobia, compostaje controlado y biorrefinería.	Disminuyen la descomposición no controlada y pueden recuperar energía.	Control de acidez, humedad, limoneno y condiciones operativas.
Sustitución de materias primas	Pectina, limoneno, alimentación animal y materiales funcionales.	Los productos obtenidos pueden reemplazar insumos convencionales.	Calidad del producto, evaluación de mercado y requisitos sanitarios.
Recuperación de valor económico y material	Extracción de compuestos, pectina, biorrefinería y biochar.	Aumenta el valor agregado del residuo y diversifica usos industriales.	Infraestructura, escala y continuidad del suministro.
Fortalecimiento de economía circular	Todas las rutas integradas, especialmente biorrefinería.	Transforma la cáscara en materia prima secundaria y promueve cierre de ciclos.	Articulación academia-empresa-Estado y trazabilidad de datos.

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión documental.

La economía circular modifica la lectura del residuo. En la gestión lineal, la cáscara se interpreta como un material que se descarta; en la gestión circular, se convierte en entrada para nuevos procesos. Sin embargo, este cambio solo tiene valor ambiental cuando se mide con indicadores y se evita trasladar impactos a otras etapas, como consumo energético excesivo o uso intensivo de reactivos (Aguilar-Hernández et al., 2021; Teigiserova et al., 2022).

La biorrefinería en cascada representa el aporte más integral porque ordena el aprovechamiento de mayor a menor valor. Primero se recuperan compuestos como limoneno y pectina; después se utilizan remanentes para energía, compost o alimentación animal. Esta secuencia disminuye la pérdida de valor y permite tratar la biomasa como un recurso múltiple en lugar de desecho homogéneo (Vaez et al., 2021; Arango-Manrique et al., 2024).

En contextos con menor capacidad técnica, el compostaje controlado, la alimentación animal y la digestión anaerobia a pequeña escala pueden funcionar como alternativas transitorias. Pueden complementar una biorefinería en la reducción de la eliminación final (Tripodo et al., 2004; World Bank, 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

3.5 Resultados del objetivo 4: lineamientos estratégicos

Las pautas se desarrollaron integrando los resultados de tres tipos de información: los resultados técnicos de las rutas, los indicadores ambientales y el marco legal y regulatorio. Cada una de las pautas presenta una acción, un actor que debe realizar la acción, un indicador a vigilar para evaluar si se ha llevado a cabo la acción y los instrumentos legales y/o regulatorios que sustentan la inclusión de la pausa. Esta estructura ayuda a evitar que las recomendaciones permanezcan de forma general (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019, 2022; ISO, 2006a, 2006b).

Tabla 16 Lineamientos estratégicos para el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja.

Lineamiento	Criterio de formulación	Acción recomendada	Actor responsable	Indicador de seguimiento	Soporte

Valorización en cascada	Priorizar rutas que recuperan mayor valor antes de tratamientos de menor complejidad.	Extraer limoneno y pectina antes de usos energéticos o compostaje, cuando la escala lo permita.	Empresas agroindustriales y centros de investigación.	Porcentaje de biomasa aprovechada en varias etapas.	Sharma et al. (2022); Vaez et al. (2021).
Caracterización de residuos	No seleccionar tecnología sin datos de cantidad y calidad de biomasa.	Medir volumen, humedad, composición, estacionalidad y ubicación de generación.	Productores, transformadores y universidades.	Número de caracterizaciones realizadas por año.	Zema et al. (2018); Asohofrucol (2024).
Medición de indicadores ambientales	Toda afirmación de sostenibilidad debe sostenerse en métricas verificables.	Aplicar CO_2-eq, CH_4, reducción de residuos, rendimiento y tasa de valorización.	Empresas y autoridades ambientales.	Reportes de indicadores ambientales.	Aguilar-Hernández et al. (2021); ISO (2006a, 2006b).
Articulación institucional	La valorización requiere capacidades que superan a un solo actor.	Crear alianzas academia-empresa-Estado para proyectos piloto y transferencia tecnológica.	Universidades, empresas, MinAmbiente y entes territoriales.	Número de proyectos o convenios activos.	MinAmbiente (2019, 2022).
Tecnologías según capacidad territorial	No todos los territorios pueden iniciar con biorrefinerías avanzadas.	Iniciar con compostaje, digestión anaerobia o alimentación animal controlada donde no exista infraestructura avanzada.	Municipios, asociaciones y agroindustrias.	Toneladas de residuos desviadas de disposición final.	World Bank (2018); FAO (2019).
Trazabilidad de datos	Sin datos comparables no se puede evaluar impacto ni decidir escalamiento.	Registrar generación, aprovechamiento, producto obtenido, destino final e indicadores anuales.	Empresas y municipios.	Matriz de datos actualizada y reportes anuales.	Page et al. (2021); ISO (2006a, 2006b).

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión documental y normativa.

La primera sugerencia, la valoración en cascada, se basa en la información de que la cáscara puede generar productos de mayor valor antes de su conversión en energía o material para compost. Esta ruta requiere una inversión y escala considerables y, por lo tanto, no debería proponerse de forma uniforme para todos los casos. Su aplicación debe basarse en la disponibilidad de la biomasa, la capacidad tecnológica y organizativa y la demanda de los productos recuperados (Vaez et al., 2021; Arango-Manrique et al., 2024).

La caracterización de los desechos es el punto de partida para cualquier decisión. En ausencia de datos sobre generación, humedad y composición, y estacionalidad, y a menudo antes o en ausencia de un estudio de idoneidad, las tecnologías se eligen a menudo de forma arbitraria. Para Colombia, esta recomendación es crítica, ya que no existen inventarios regionales que conecten la producción cítrica, el procesamiento agroindustrial y la utilización local (Asohofrucol, 2024; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Medir indicadores debería formar parte de cualquier estrategia de aprovechamiento. Entre los indicadores propuestos se encuentran la cantidad de desechos desviados de la eliminación final; biomasa valorizada; CO_2-eq; CH_4 evitado; rendimiento; y sustitución de insumos. Así, se reduce el riesgo de representar una tecnología circular que, en realidad, no mejora la gestión tradicional de los desechos (Aguilar-Hernández et al., 2021; ISO, 2006a, 2006b).

4. CONCLUSIONES

La revisión muestra que la valorización de la cáscara de naranja es posible mediante rutas químicas, biotecnológicas, energéticas y agronómicas. De estas rutas, la vía más inclusiva es la biorefinera en cascada. Sin embargo, Pourbafrani et al. (2010), Vaez et al. (2021) y Sharma et al. (2022) señalan que el uso de la biorefinera en cascada está restringido a la industria, la escala y la disponibilidad continua de biomasa.

La comparación de indicadores mostró que algunos estudios no reportan indicadores de forma comparable. Algunos estudios reportan rendimientos de extracción, otros rendimientos de metano, productividades o resultados de análisis de ciclo de vida. Por esta razón, la evaluación ambiental debe considerar una variedad de aspectos, es decir, unidades, límites del sistema, condiciones ambientales y fuente de energía (ISO, 2006a, 2006b; Teigiserova et al., 2022; Manakas et al., 2025).

Los datos numéricos indican que tanto la biorefinera como otras rutas pueden producir etanol, metano y otros productos a partir de naranjas, pectina y hidrógeno y reducir la eliminación final. Sin embargo, el rendimiento depende del contexto y del pretratamiento (Wikandari et al., 2015; Teigiserova et al., 2022).

El progreso en la utilización integral de la cáscara de naranja por parte del gobierno colombiano debe ser gradual. En áreas con una infraestructura menos desarrollada, las primeras rutas podrían incluir compostaje, alimentación animal y digestión anaerobia controlada. En áreas con una infraestructura más desarrollada, la recuperación de pectina y limoneno, así como la biorefinería, podrían aportar un mayor valor.

El déficit local principal ha sido identificado como la disponibilidad de datos locales. La ausencia de inventarios locales de biomasa, caracterización físico-química, indicadores ambientales y evaluación del ciclo de vida seguiría dependiendo de una evaluación

externa de la utilización de la cáscara de naranja. Dado el contexto local, se da prioridad a la trazabilidad, la medición y la coordinación institucional para pasar de una revisión de la literatura a proyectos piloto localizados.

5. REFERENCIAS

Aguilar-Hernández, G. A., Sigüenza-Sánchez, C. P., Donati, F., Rodrigues, J. F. D., Tukker, A., & Aguilar-Hernández, I. (2021). The circular economy and its impact on carbon footprint: A systematic review. *Resources, Conservation and Recycling, 167, 105399.* https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105399

AlZahabi, S., Al-Bahry, S., Mahmoud, O., & Al-Wahaibi, Y. (2025). Valorization of citrus processing waste into high-performance bionanomaterials: Green synthesis, biomedicine and environmental remediation. *RSC Advances, 15, 32214-32242.* https://doi.org/10.1039/D5RA04307G

Arango-Manrique, S., Ortiz-Sanchez, M., Cardona Alzate, C. A., & Solarte-Toro, J. C. (2024). Conceptual design and economic optimization of different orange peel waste biorefineries. *Processes, 12(10), 2298.* https://doi.org/10.3390/pr12102298

Asohofrucol. (2024). *Plan citrícola 2024.* Asociación Hortifrutícola de Colombia. https://www.asohofrucol.com.co/img/archivosGeneralesFiles/3295Pcitricola2024.pdf

Boluda-Aguilar, M., & López-Gómez, A. (2013). Production of bioethanol by fermentation of lemon (Citrus limon L.) peel wastes pretreated with steam explosion. *Industrial Crops and Products, 41, 188-197.* https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.031

Bugge, M. M., Hansen, T., & Klitkou, A. (2016). What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability, 8(7), 691.* https://doi.org/10.3390/su8070691

Calabrò, P. S., Pontoni, L., Porqueddu, I., & Greco, R. (2016). Biomethane production tests on ensiled orange peel waste. *International Journal of Heat and Technology, 34(Special Issue 2), S130-S136.* https://doi.org/10.18280/ijht.34S210

Caldeira, C., De Laurentiis, V., Corrado, S., Van Holsteijn, F., & Sala, S. (2020). Quantification of food waste per product category and environmental impacts at different stages of the food supply chain. *Resources, Conservation and Recycling, 153, 104557.* https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104557

Cinardi, G., Lombardo, S., Pandino, G., & Mauromicale, G. (2025). Citrus waste valorisation processes from an environmental sustainability perspective: A scoping literature review of life cycle assessment studies. *AgriEngineering, 7(10), 335.* https://doi.org/10.3390/agriengineering7100335

Congreso de la República de Colombia. (1993, 22 de diciembre). Ley 99 de 1993. Diario Oficial No. 41.146.

Congreso de la República de Colombia. (2018, 27 de julio). Ley 1931 de 2018. Diario Oficial No. 50.667.

Dávila, J. A., Rosenberg, M., & Cardona, C. A. (2015). Techno-economic and environmental assessment of p-cymene and pectin production from orange peel. *Waste and Biomass Valorization, 6, 253-261.* https://doi.org/10.1007/s12649-014-9339-y

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2024). *Boletín técnico: Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario, componente abastecimiento de alimentos.* DANE. https://www.dane.gov.co

Departamento Nacional de Planeación. (2021). *CONPES 4023: Política para la reactivación, la repotenciación y el crecimiento sostenible e incluyente.* DNP. https://www.dnp.gov.co

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.* Ellen MacArthur Foundation.

European Parliament and Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste.* Official Journal of the European Union.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *The state of food and agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction.* FAO. https://doi.org/10.4060/CA6030EN

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Bioeconomy for sustainable food and agriculture.* FAO. https://doi.org/10.4060/cc5487en

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757-768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production, 114, 11-32.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report.* IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework.* ISO.

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines.* ISO.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling, 127, 221-232.* https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics, 143, 37-46.* https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041

Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., Cho, M. H., & Cho, S. (2019). Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of Advanced Research, 23, 61-82.* https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.12.007

Manakas, P., Agarwal, S., Moulogianni, C., & Chatzisymeon, E. (2025). Sustainability assessment of orange peel waste valorization technologies: A meta-analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery, 15, 6525-6543.* https://doi.org/10.1007/s13399-024-05626-x

Martín, M. A., Siles, J. A., Chica, A. F., & Martín, A. (2010). Biomethanization of orange peel waste. *Bioresource Technology, 101(23), 8993-8999.* https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.133

Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production, 65, 28-41.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Plan de acción para la gestión sostenible de la biomasa residual.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology, 24(4), 763-773.* https://doi.org/10.1111/jiec.12987

Negro, V., Mancini, G., Ruggeri, B., & Fino, D. (2017). Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resources, Conservation and Recycling, 127, 148-158.* https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014

Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2020). Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study. *Journal of Cleaner Production, 265, 121587.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121587

Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2024). Sustainability analysis of orange peel biorefineries. *Biomass and Bioenergy, 180, 106972.* https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106972

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372, n71.* https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Panwar, D., Panesar, P. S., & Chopra, H. K. (2021). Recent trends on the valorization strategies for the management of citrus by-products. *Food Reviews International, 37(1), 91-120.* https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1695834

Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technology, 101(11), 4246-4250.* https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077

Presidencia de la República de Colombia. (2015, 26 de mayo). Decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial No. 49.523.

Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., & Nayik, G. A. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 17(4), 351-358.* https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006

Rezzadori, K., Benedetti, S., & Amante, E. R. (2012). Proposals for the residues recovery: Orange waste as raw material for new products. *Food and Bioproducts Processing, 90(4), 606-614.* https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.06.002

Ruiz, B., & Flotats, X. (2014). Citrus essential oils and their influence on the anaerobic digestion process: An overview. *Waste Management, 34(11), 2063-2079.* https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.026

Sharma, K., Mahato, N., Cho, M. H., & Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches. *Nutrition, 34, 29-46.* https://doi.org/10.1016/j.nut.2016.09.006

Sharma, P., Gaur, V. K., Sirohi, R., Varjani, S., Kim, S. H., & Wong, J. W. C. (2022). Sustainable valorization of citrus peel waste: A review on ethanol bioproduction, bioproducts and biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150, 111514.* https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111514

Stahel, W. R. (2016). Circular economy. *Nature, 531(7595), 435-438.* https://doi.org/10.1038/531435a

Suri, S., Singh, A., & Nema, P. K. (2021). Recent advances in valorization of citrus fruits processing waste: A way forward towards environmental sustainability. *Food Science and Biotechnology, 30(13), 1601-1626.* https://doi.org/10.1007/s10068-021-00984-y

Suri, S., Singh, A., & Nema, P. K. (2022). Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook. *Applied Food Research, 2(1), 100050.* https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100050

Teigiserova, D. A., Hamelin, L., & Thomsen, M. (2020). Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss: Clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. *Science of the Total Environment, 706, 136033.* https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136033

Teigiserova, D. A., Hamelin, L., Tiruta-Barna, L., Ahmadi, A., & Thomsen, M. (2022). Circular bioeconomy: Life cycle assessment of scaled-up cascading production from orange peel waste under current and future electricity mixes. *Science of the Total Environment, 812, 152574.* https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152574

Tripodo, M. M., Lanuzza, F., Micali, G., Coppolino, R., & Nucita, F. (2004). Citrus waste recovery: A new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. *Bioresource Technology, 91(2), 111-115.* https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00140-3

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development.* United Nations. https://sdgs.un.org/2030agenda

United Nations Environment Programme. (2021). *Food Waste Index Report 2021.* UNEP. https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021

Vaez, S., Karimi, K., Mirmohamadsadeghi, S., & Jeihanipour, A. (2021). An optimal biorefinery development for pectin and biofuels production from orange wastes without enzyme consumption. *Process Safety and Environmental Protection, 152, 513-526.* https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.013

Vera-Acevedo, L. D., & Raufflet, E. (2022). Análisis de la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia a partir de dos modelos. *Cuadernos de Administración, 38(73), 27-45.*

Wikandari, R., Nguyen, H., Millati, R., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2015). Improvement of biogas production from orange peel waste by leaching of limonene. *BioMed Research International, 2015, 494182.* https://doi.org/10.1155/2015/494182

World Bank. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050.* World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S. M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Management, 80, 252-273.* https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.024