

Revisión de la literatura para la identificación de las metodologías de estimación de la
huella de carbono en cadenas de suministro

Lizeth Nathalia Pinzón Flórez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera industrial

Director

Juan Felipe Reyes Rodríguez

PhD. Management

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías físico-mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedicado a mi madre Soraida Flórez Meléndez y a mi padre Jorge Eliécer Pinzón Rojas.

Agradecimientos

Agradecimientos a mi profesor y director de proyecto Juan Felipe Reyes Rodríguez por su acompañamiento durante todo este proceso. A la familia Carrillo Blanco por su apoyo, a Jhoan Steven por ser mi compañero de vida. Y, especialmente, a mi madre por su amor incondicional y a mi padre por sus incansables esfuerzos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Definición del proyecto.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo general.....	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3 Resultados obtenidos	19
2. Marco de referencia	19
2.1 Marco teórico.....	20
2.1.1. Cadena de suministro y gestión de la cadena de suministro.....	20
2.1.2 Huella de carbono: estimación y mitigación.....	21
2.1.3. Revisión sistemática de literatura	23
2.2 Marco de antecedentes.....	24
2.2.1 Trabajos de grado.....	24
2.2.2 Revisiones de literatura previas sobre el tema.....	25
3. Marco metodológico	27
3.1 Revisión sistemática de la literatura	28
3.1.1 Planeación de la revisión	28
3.1.1.1 Inmersión preliminar.....	28
3.1.1.2 Planteamiento de la pregunta de investigación.....	29
3.1.1.3 Implementación de un protocolo de revisión.....	29

3.1.2 Ejecución de la revisión	29
3.1.2.1 Definición de la investigación.	29
3.1.2.2 Selección de los artículos más relevantes.	29
3.1.2.3 Extracción, seguimiento y síntesis de los datos.	30
3.1.3 Consolidación de la revisión	30
4. Revisión de la literatura	30
4.1 Análisis bibliométrico de la literatura científica.....	31
4.1.1 Análisis de palabras clave.....	31
4.1.2 Ecuación de búsqueda.....	32
4.1.3 Publicaciones por año	35
4.1.4 Producción científica por país.....	36
4.1.5 Publicaciones por revista	37
4.2 Análisis bibliométrico de la literatura gris.....	38
4.2.1 Publicaciones por año	39
4.2.2 Producción científica por país.....	40
4.2.3 Publicaciones por revista	40
5. Revisión de la literatura sobre la identificación de las metodologías de estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro.....	41
5.1. Revisión de la literatura científica	42
5.1.1 Evaluación del Ciclo de Vida - ECV	53
5.1.2 Normativas ISO	62
5.1.3 Modelos híbridos	70
5.1.4 GHG Protocol – Protocolo GEI.....	77

5.2 Revisión de la literatura gris	77
5.3 Análisis y consolidación	83
5.3.1 Contexto nacional	87
5.3.2 Marco regulatorio Colombia.....	88
5.3.2.1 Políticas y acuerdos nacionales.....	88
5.3.2.2 Organismos reguladores.....	88
5.3.2.3 Legislación.....	88
5.3.2.4 Aplicación y cumplimiento.....	88
5.4 Propuesta metodológica para la estimación de la huella de Carbono.	90
5.4.1 Hoja de ruta para la estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro.	92
5.4.1.1 Identificar los límites organizativos y operativos.	93
5.4.1.2 Recolección de datos.....	97
5.4.1.3 Determinación de los factores de emisión.	98
5.4.1.4 Cálculo de las emisiones de GEI.	99
5.4.1.5 Verificación y validación.....	99
5.4.1.6 Metas de reducción.	100
5.4.1.7 Mejora continua en las estrategias de gestión.....	100
6. Conclusiones	102
7. Recomendaciones	105
Referencias Bibliográficas	106

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Cumplimiento de objetivos	15
Tabla 2 Identificación de palabras clave.....	32
Tabla 3 Estructuración de la ecuación de búsqueda en Scopus	32
Tabla 4 Criterios de inclusión y exclusión.....	33
Tabla 5 Ecuación de búsqueda en Scopus refinada	34
Tabla 6 Producción científica por revista	37
Tabla 7 Fuente de los documentos de la literatura gris.....	40
Tabla 8 Antecedentes de revisiones de literatura relacionadas.....	44
Tabla 9 Principales metodologías para la estimación de la huella de carbono	47
Tabla 10 Consolidación según el enfoque y sector de aplicación para las ECV	60
Tabla 11 Consolidación por enfoque y sector de aplicación para las normas ISO.....	68
Tabla 12 Consolidación por enfoque y sector de aplicación en los modelos híbridos	76
Tabla 13 Consolidación por enfoque y sector de aplicación en la literatura gris.	82
Tabla 14 Consolidación de metodologías huella C.....	85
Tabla 15 Propuesta metodológica según el nivel de análisis	90
Tabla 16 Alcances de las emisiones de GEI	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Composición del marco de referencia	19
Figura 2 Metodología de la investigación.....	27
Figura 3 Análisis de la relación de palabras clave de los autores	31
Figura 4 Producción científica por año	36
Figura 5 Producción científica por país	36
Figura 6 Documentos de la literatura gris por año.....	39
Figura 7 Publicaciones por país literatura gris.....	40
Figura 8 Marco conceptual del blockchain y las cadenas de suministro bajas en carbono	51
Figura 9 Metodologías para el cálculo de la huella de carbono según el enfoque.....	52
Figura 10 Relación entre la escala de la huella de carbono y el enfoque de cálculo	52
Figura 11 Resumen estándares ISO	62
Figura 12 Categorías de emisiones ISO 14064-1:2019	63
Figura 13 Enfoques para la estimación de la huella de Carbono.....	84
Figura 15 Resumen de la normatividad en Colombia sobre emisiones de GEI.....	89
Figura 16 Factores para la toma de decisiones	91
Figura 17 Hoja de ruta para la medición de la huella de carbono.....	92
Figura 18 Representación gráfica enfoques Cradle-to-grave y Cradle-to-gate	93
Figura 19 Categorías de emisiones de Alcance 3 según el GHG Protocol.....	96

Lista de Apéndices

Apéndice A Tabla de literatura científica

Apéndice B Tabla de literatura gris

Apéndice C Artículo de carácter publicable

Resumen

Título: Revisión de la literatura para la identificación de las metodologías de estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro *

Autor: Lizeth Nathalia Pinzon Florez **

Palabras Clave: Huella de carbono, Cadena de suministro, método de evaluación.

Descripción: La preocupación global por el cambio climático ha generado una presión en las compañías para que tomen acciones, tales como evaluar y reducir su impacto ambiental, especialmente en las cadenas de suministro. La huella de carbono que mide las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a un producto o servicio durante su ciclo de vida, se ha convertido en un indicador crucial en este contexto. Esta revisión se enfoca en realizar una revisión exhaustiva de las metodologías utilizadas para estimar la huella de carbono en cadenas de suministro. El objetivo de esta investigación es analizar y comparar las metodologías disponibles para evaluar la huella de carbono en cadenas de suministro, enfatizando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones. Proporciona una visión panorámica de las metodologías de estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro, permitiendo a los investigadores, profesionales y tomadores de decisiones comprender mejor las opciones disponibles y seleccionar la metodología más adecuada según sus objetivos y recursos. De igual manera, se destaca la importancia de abordar los desafíos actuales en la medición precisa de la huella de carbono y se sugieren posibles direcciones para futuras investigaciones en este campo crucial para la sostenibilidad ambiental y empresarial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Juan Felipe Reyes Rodríguez PhD. Management.

Abstract

Title Literature review for the identification of carbon footprint estimation methodologies in supply chains *

Author: Lizeth Nathalia Pinzon Florez **

Key Words: Carbon footprint, Supply chain, Assessment method.

Description: Global concern about climate change has prompted organizations to assess and reduce their environmental impact, especially in supply chains. The carbon footprint, as a measure of the greenhouse gas emissions associated with a product or service throughout its life cycle, has become a crucial indicator in this context. This review focuses on a comprehensive review of the methodologies used to estimate the carbon footprint in supply chains.

The main goal of this research is to analyze and compare the various methodologies available for carbon footprint assessment in supply chains, with emphasis on their advantages, limitations, and applications. Provides an overview of supply chain carbon footprint estimation methodologies, enabling researchers, practitioners, and decision makers to better understand the available options and select the most appropriate methodology according to their objectives and resources. It also highlights the importance of addressing current challenges in accurate carbon footprint measurement and suggests directions for future research in this crucial field for environmental and business sustainability.

*

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director: Juan Felipe Reyes Rodríguez PhD. Management.

Introducción

El control de las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro sigue siendo una preocupación importante para el cambio climático. Las emisiones se deben a la generación masiva de materias primas y productos, y al transporte de productos y servicios. La reducción de estas emisiones, así como con otras de gases de efecto invernadero, es uno de los mayores retos para las organizaciones hoy. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), “las emisiones de CO₂ por la combustión de energía y procesos industriales representaron el 89% del total de emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía en 2022” (IEA, 2023, p.12).

Las cadenas de suministro cada vez se vuelven más globales y complejas, y esto hace que sea más complicado rastrear y medir las emisiones de CO₂. Sin embargo, hay un creciente reconocimiento de la necesidad de abordar las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro y muchas empresas están tomando decisiones para minimizar su balance de carbono. Algunas estrategias de las organizaciones incluyen la implementación de fuentes de energía renovable en sus cadenas de suministro o la implementación programas para mitigar la cantidad de emisiones producidas en el transporte y la producción. También existen iniciativas y programas que buscan mejorar la transparencia y la trazabilidad en las cadenas de suministro, lo que puede contribuir a identificar y abordar las diversas fuentes de emisiones de CO₂.

Una investigación del Foro Económico Mundial expone como abordar las emisiones en el contexto del cambio climático y desarrolla un análisis de las principales cadenas de suministro de diferentes sectores que representan alrededor del 50% del total de emisiones globales de GEI (World Economic Forum, 2021, p.12).

De manera general, la temática abordada en la investigación ha sido el resultado de diferentes estudios e investigaciones que consideran su relevancia desde diferentes enfoques. Estos estudios han establecido un marco para comprender las emisiones y su papel en las cadenas de suministro. En el ámbito empresarial, se han realizado gran variedad de estudios sobre las consecuencias de la huella de carbono en la cadena de suministro, así como su relación con la sostenibilidad la rentabilidad de las empresas. La huella de carbono ha sido objeto de análisis desde diversas perspectivas, incluyendo su impacto en el calentamiento global y el bienestar del planeta desde una visión ambiental y el bienestar y la calidad de vida de las personas desde un punto de vista social.

Con la amplitud y complejidad de esta temática, este proceso de investigación busca aportar nuevas perspectivas y soluciones sobre las metodologías de análisis y estimación de la huella de carbono aplicables en las cadenas de suministro.

Unos estudios relevantes alrededor de esta temática están, por ejemplo, el de Ghosh et al. En 2020, es una publicación que mediante una revisión de la literatura muestra la gestión de la huella de carbono y su importancia para la sostenibilidad de la cadena de suministro y también expone relevancia de la conceptualización y del enfoque estratégico de las herramientas y políticas involucradas (Ghosh et al., 2020).

Otros autores proponen una investigación desde el enfoque de sostenibilidad y proponen un modelo sistemático detallado de estimación de huella de carbono por medio de la cadena de suministro sostenible y ciclo de vida del producto (He et al., 2019).

En general, estos estudios y otros similares son cruciales para entender cómo cuantificar las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro e identificar estrategias de reducción de emisiones en la industria y sectores relacionados.

Por consiguiente, este proyecto de investigación tiene como fin realizar un análisis de las características de las diferentes herramientas y métodos existentes que conduzcan a una metodología aplicable en las cadenas de suministro que minimice la incertidumbre en los cálculos y que a su vez sean un insumo para que las organizaciones puedan determinar los puntos más críticos de los procesos y establezcan un antes y un después ante los planes, programas o sistemas de reducción que se implementen para afrontar esta problemática.

Este documento se estructura por secciones, así: revisión de la literatura partiendo de un análisis bibliométrico y un análisis documental preliminar, generalidades del proyecto identificando el problema, estableciendo objetivos y resultados esperados, marco de referencia mediante el que se inmersa en el marco teórico y de antecedentes; después se presenta la estrategia de trabajo para la revisión sistemática de la literatura seguida por su desarrollo, un capítulo dedicado al análisis y la consolidación de la información y final mente las conclusiones, las recomendaciones y las referencias bibliográficas.

Tabla 1 Cumplimiento de objetivos

Cumplimiento de objetivos

Objetivo específico	Cumplimiento
Realizar una revisión de la literatura científica sobre estudios de medición de carbono en cadenas de suministro.	Capítulo 5, Sección 5.1
Realizar una revisión de la literatura gris sobre estudios de medición de carbono en cadenas de suministro.	Capítulo 5, Sección 5.2
Analizar y consolidar la información obtenida a partir de las revisiones.	Capítulo 5, Sección 5.3
Caracterizar una metodología propuesta para la estimación de la huella de carbono con base en los hallazgos.	Capítulo 5, Sección 5.4
Elaborar un artículo científico donde se documenten los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.	APÉNDICE C

Nota: Esta tabla muestra el capítulo donde se da el cumplimiento de cada objetivo específico.

1. Definición del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

En años anteriores se ha desarrollado la investigación en torno al creciente reto que afronta la humanidad: las consecuencias ambientales de las emisiones que se generan día a día. El calentamiento global es inevitablemente impulsado dados los efectos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), tal evidencia ha hecho indispensable la investigación y el desarrollo de mecanismos en torno a una dinámica productiva menos destructiva y más responsable. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, “El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases de efecto invernadero que más contribuye al cambio climático”(IPCC, 2014).

La medición de las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro es crucial por diversas razones. En primer lugar, es esencial para entender la huella de carbono de cualquier organización o producto, lo que permite a las empresas asociar las fuentes de las emisiones y tomar acciones para minimizarlas. Una vez que las empresas comprenden su huella de carbono, pueden implementar cambios en las fuentes de energía renovable, mejorar la eficacia energética o adoptar prácticas de producción más sostenibles. Además, la medición de las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro ayuda a las empresas a ser más transparentes sobre su impacto ambiental, lo que contribuye a resaltar la imagen y la confianza en la marca de cualquier organización. Asimismo, en muchos países existen regulaciones y estándares que requieren que las empresas midan y reporten sus emisiones de CO₂.

Disminuir la huella de carbono es un indicador fundamental en distintos ámbitos como el económico, social, comercial, político y ambiental. Lo planteado está en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) donde se contempla la acción por el clima, la energía

asequible y no contaminante, la producción y consumo responsable, la salud, el bienestar y la vida de los ecosistemas.

Actualmente países industrializados como Estados Unidos y la Unión Europea lideran la implementación de iniciativas enfocadas en considerar las emisiones generadas durante el ciclo de vida de los productos que ingresan y se generan en sus territorios.

La accesibilidad a herramientas, la conciencia y el compromiso colectivos por parte de las empresas y los consumidores para adoptar prácticas sostenibles y reducir su impacto ambiental es clave para tomar acciones frente a este problema.

El problema de las liberaciones de CO₂ a la atmósfera en las cadenas de suministro es complicado que necesita una acción integrada por múltiples actores, incluyendo organizaciones, gobierno y consumidores, para lo cual es necesario adoptar prácticas sostenibles y mitigar el impacto ambiental en la cadena de suministro para garantizar un futuro sostenible para el planeta y para las generaciones próximas. Dada la amplitud del tema la investigación desarrollada tiende a considerar diferentes perspectivas para abordar la problemática, gran parte de los aportes son el fruto de experiencias o casos aplicados a productos o sistemas específicos, también se consideran análisis integrales que buscan explicar y clasificar los factores de emisión y los límites de los sistemas, otro enfoque importante es el análisis y comparación de las metodologías existentes y estándares propuestos.

En este panorama, la revisión realizada permite identificar las emisiones de gases de efecto invernadero como un tema susceptible a la mejora dada la rapidez en la evolución productiva y tecnológica, donde lo más ideal es aproximarse a un sistema que asocie los diferentes actores en la cadena de valor y cuantifique las emisiones partiendo de una unidad base aplicable a distintos sectores para un análisis más verás completo. Además, el planteamiento de una evaluación de

emisiones de CO₂ puede variar dependiendo de su propósito, por lo que la investigación busca establecer un enfoque integral de las dimensiones económicas, políticas, legales y sociales aplicables para diseñar una propuesta metodológica considerando los factores, alcances y límites que se puedan analizar para diseñar un insumo accesible y verás para tomar decisiones.

Considerando lo anterior esta investigación busca realizar una revisión de la literatura para reconocer, comparar y analizar metodologías existentes, analizando estudios y procesos relacionados a nivel global, con esta investigación se pretende explorar los enfoques y métodos actuales, reconociendo las tendencias futuras en torno a la temática. El conocimiento obtenido representa un insumo que permita ahondar en la consideración y definición de elementos que constituyan metodologías aplicables a nivel nacional y regional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar una revisión de la literatura que permita identificar las metodologías existentes utilizadas en estudios de estimación y medición de la huella de carbono.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura científica sobre estudios de medición de carbono en cadenas de suministro.
- Realizar una revisión de la literatura gris sobre estudios de medición de carbono en cadenas de suministro.
- Analizar y consolidar la información obtenida a partir de las revisiones.
- Caracterizar una metodología propuesta para la estimación de la huella de carbono con base en los hallazgos.

- Elaborar un artículo científico donde se documenten los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.

1.3 Resultados obtenidos

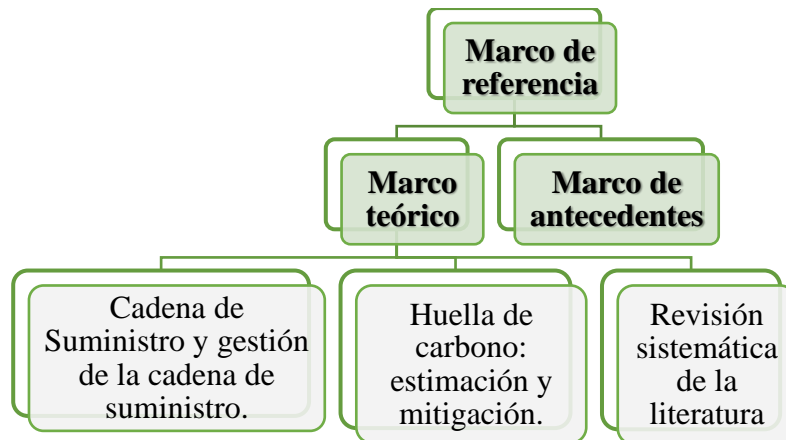
Se desarrolló un marco conceptual de investigación que conllevó a la estructuración de un artículo publicable que sintetiza los resultados obtenidos para revisar metodologías de estimación y medición de la huella de carbono en las cadenas de suministro.

2. Marco de referencia

El marco de referencia de la presente investigación y su composición se muestran en la figura a continuación.

Figura 1

Composición del marco de referencia



Nota: Creación propia.

2.1 Marco teórico

2.1.1. Cadena de suministro y gestión de la cadena de suministro

Planificación, coordinación y control de todas las etapas y recursos implicados en la cadena de suministro para asegurar una eficiente y efectiva operación.

La cadena de suministro se puede describir como el proceso de adquisición y producción de bienes y servicios que una organización utiliza, que abarca la planificación, adquisición, producción, entrega y servicio al cliente. Este concepto es esencial en la gestión empresarial, ya que permite a las organizaciones mejorar sus procesos y eficiencia. También, involucra a proveedores, fabricantes y distribuidores, además de la organización en sí misma.

La gestión de la cadena de suministro busca optimizar el flujo de bienes, información y capital a lo largo de toda la cadena, desde la materia prima hasta el consumidor final. “Su objetivo es aumentar el rendimiento y reducir los costos de inventario y operación”, tal como lo describe Eli Goldratt (2010).

La colaboración en la cadena de suministro requiere la cooperación y coordinación entre los diferentes eslabones, como proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas. Se ha demostrado que la colaboración puede enriquecer la eficiencia y la satisfacción del cliente al reducir costos, según destaca Li et al., (2006) destacan que “la colaboración puede mejorar la eficiencia y la eficacia de la cadena de suministro al reducir los costos y mejorar la satisfacción del cliente” (p.111).

La innovación en la cadena de suministro se relaciona con la aplicación de nuevas tecnologías y prácticas innovadoras en la cadena de suministro para mejorar la eficiencia, la calidad y la capacidad de respuesta. Autores como Chopra y Meindl (2016) destacan que la

innovación puede contribuir a que las empresas se diferencien de la competencia y a que mejore la satisfacción de los clientes.

La sostenibilidad en la cadena de suministro (SCS) se relaciona con la gestión de los efectos ambientales, económicos y sociales de la cadena de suministro para lograr un equilibrio entre el desarrollo y la protección de las regiones. Para conseguir la sostenibilidad en la cadena de suministro, se requiere un enfoque completo que cubra todo el ciclo de vida de los productos y servicios, desde la adquisición de materias primas hasta la eliminación adecuada de los residuos.

2.1.2 Huella de carbono: estimación y mitigación

La huella de carbono es un indicador ambiental que busca medir la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera por la actividad humana directa e indirecta, durante un tiempo específico. Esta huella es comúnmente expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) y tiene en cuenta la emisión de otros gases de efecto invernadero, además del dióxido de carbono, como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

La huella de carbono es una forma de estimar y comprender el impacto ambiental de nuestras acciones, incluyendo la generación de energía, el transporte, la alimentación y otros productos y servicios que se consumen a diario.

La estimación de la huella de carbono se puede hacer con diferentes metodologías, pero se puede dividir en tres enfoques: el enfoque de la huella de carbono en el ciclo de vida, el enfoque de la huella de carbono corporativa y el enfoque de la huella de carbono de producto.

El enfoque del ciclo de vida incluye todas las emisiones de GEI asociadas a un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida completo, desde las materias primas utilizadas en su producción hasta el final de su vida útil.

El enfoque de la huella de carbono corporativa delimita las emisiones de GEI de una organización, incluyendo tanto sus operaciones directas como indirectas. Esto incluye el consumo de energía, los desplazamientos de negocios y otras actividades relacionadas con la organización.

El enfoque de la huella de carbono de producto se centra en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con un producto específico. Se evalúa la cantidad de emisiones generadas durante su fabricación, uso y disposición final.

Por último, el enfoque de la huella de carbono de producto estima todas las emisiones de GEI que puedan estar asociadas con la producción, distribución y disposición final de un producto específico.

Las metodologías de medición de la huella de carbono son herramientas utilizadas para estimar la magnitud de GEI producidos por una organización, producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Estas metodologías pueden ayudar a las empresas a encontrar áreas de mejora en la gestión de sus emisiones y a desarrollar estrategias para reducir su impacto ambiental.

El control de emisiones es una de las principales estrategias empleadas para reducir la contaminación atmosférica y mitigar sus consecuencias negativas en la salud humana y el medio ambiente. La gestión de las emisiones precisa un enfoque integral que englobe desde la identificación de las fuentes de emisión hasta la puesta en marcha de medidas de control y monitoreo de la calidad del aire. Identificar las fuentes de emisión es el primer paso para su control, que requiere una evaluación exhaustiva de las mismas, incluidas las emisiones móviles y fijas.

Autores destacan la importancia del reconocimiento preciso de las fuentes de emisión para diseñar estrategias efectivas de control de emisiones.

Las políticas y regulaciones establecen metas y objetivos para la reducción de emisiones, así como normas y requisitos para las tecnologías de control de emisiones. Las regulaciones son

herramientas importantes para reducir las emisiones de contaminantes y fomentar la innovación tecnológica. Las tecnologías de control son sistemas utilizados para disminuir las emisiones y pueden incluir filtros de partículas, catalizadores y sistemas de captura de gases, estas tecnologías son fundamentales para reducir las emisiones en fuentes fijas como fábricas y centrales eléctricas.

2.1.3. Revisión sistemática de literatura

La revisión sistemática de la literatura es un enfoque riguroso y transparente para identificar, evaluar y combinar toda la evidencia pertinente disponible acerca de una pregunta de investigación específica. Este método busca abordar la literatura de manera sistemática y objetiva, con el fin de proporcionar una síntesis completa y confiable de los resultados de múltiples estudios. Enfoque sistemático es utilizado para minimizar el sesgo y la subjetividad en el proceso de revisión. Las revisiones sistemáticas pueden incluir la búsqueda de múltiples fuentes de literatura, la selección cuidadosa de los estudios relevantes, el análisis crítico de la calidad de los estudios, la extracción sistemática de datos y la síntesis de los resultados de los estudios.

El propósito de una revisión sistemática es brindar una síntesis exhaustiva e imparcial de la evidencia disponible para responder una pregunta de investigación específica. Se utilizan métodos definidos, transparentes y reproducibles. Las revisiones sistemáticas se basan en la evaluación crítica de múltiples estudios individuales y pueden proporcionar evidencia de calidad para guiar la toma de decisiones y futuras investigaciones.

2.2 Marco de antecedentes

2.2.1 Trabajos de grado

La revisión en torno a la temática permite identificar trabajos de grado relacionados como por ejemplo la publicación de Rodríguez et al., (2020) que expone una “Revisión de los factores de emisión considerados en las metodologías de la huella de carbono en Colombia” donde se analiza la diversidad de metodologías y la complejidad e incertidumbre presente sus modelos de estimación, además concluye que la mayoría de factores de emisión establecidos no consideran condiciones específicas del país o aplicaciones a un nivel más local y regional. En adición enmarca la necesidad de una metodología que más allá del cálculo pueda servir como un insumo para la toma de decisiones implica seleccionar la opción más adecuada entre varias alternativas,

La tesis de grado titulada “Estudio y selección de la metodología a utilizar para la medición de la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia”, constituye una base comparativa entre metodologías de medición reconocidas y muestra los beneficios de considerar aspectos ambientales y geopolíticos en las metodologías; además reconoce el potencial de aplicación de estas en las organizaciones en Colombia y la necesidad de mejora en la toma de datos y el control regulatorio. Concluye que la dimensión económica es crucial en la adopción de herramientas de medición. (Mateus Rincón, 2020)

Un ejemplo de aplicación de las metodologías del Greenhouse Gas Protocol y de la Word Wildlife Fund es la tesis titulada “Estimación de la huella de carbono y de la huella hídrica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga”, donde además de realizar la estimación según el alcance de las emisiones se plantea la propuesta de mitigación ante las mismas (Vega Sánchez, 2019).

2.2.2 Revisiones de literatura previas sobre el tema

Las emisiones de GEI se han investigado desde hace muchos años, así como las posibles alternativas para mitigar sus consecuencias. Existen varios estudios que se enfocan en determinar el concepto de huella de carbono y establecer un método adecuado para su estimación, sin embargo, no existe unanimidad al respecto.

Las áreas de conocimiento han aumentado el interés alrededor de las emisiones en cadenas de suministro desde donde se abordan diferentes enfoques al establecer los factores de cuantificación y los modelos varían sus perspectivas, los estándares pueden quedarse cortos al determinar una unidad funcional aplicada adecuadamente para situaciones y por eso la mayoría de las investigaciones se han ahondado en este tipo de análisis a un nivel sectorial o de un sistema específico.

Un análisis para calcular las emisiones de Alcance 3, de la revista Ingeniería Química y Tecnología es una base sólida y confiable en el objetivo de investigación, ya que la definición de los factores de emisión indirecta es una de las líneas temáticas con más incertidumbre en las metodologías.

Uno de los estudios más representativo para la presente investigación es un análisis bibliométrico sistemático sobre la forma cómo ha evolucionado la investigación en torno a la cadena de suministro baja en carbono, este estudio expone un análisis temático que incluye más de 700 artículos relacionados en torno a la investigación sobre la cadena de suministro baja en carbono, en este documento se clasifican y resumen los resultados más relevantes de casi una década de investigación comprendida entre los años 2012 y 2021, también señala el enfoque y la dirección de las futuras investigaciones relacionada (Du & Zhou, 2022) .

De manera similar, otra producción científica sobre cadenas de suministro bajas en carbono es una base de conocimiento detallada útil para la investigación de la cadena de suministro y su huella de carbono. Este documento brinda un análisis exhaustivo de la literatura donde se discute la evolución de la temática, además tiene como objetivo analizar sus tendencias, los autores más influyentes y la dirección futura de investigación hacia la economía verde y la descarbonización de las cadenas de suministro (Luo et al., 2022) .

Adicionalmente, otra publicación considerada importante es un artículo a cerca de la tecnología de *Blockchain*, la cual proporciona una revisión de la literatura que expone un marco teórico en el que este concepto representa un papel fundamental en la integración de las cadenas de suministro de las organizaciones orientadas a disminuir la huella de carbono, también proporciona recomendaciones para investigaciones futuras en torno a la temática (Wang et al., 2020).

En resumen, estos estudios y otros similares son muy útiles para encaminar la investigación de las metodologías de estimación de emisiones de dióxido de carbono en las cadenas de suministro y para conocer, comparar y desarrollar herramientas y metodologías más precisas y confiables que permitan optimizar la gestión ambiental, alcanzar la meta de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la trazabilidad en cada una de las etapas y actividades de las cadenas de valor.

3. Marco metodológico

La metodología de investigación se realiza aplicando tres etapas, mostradas en la Figura 2, correspondientes a las fases para una revisión sistemática de la literatura científica y la literatura gris que conlleve al análisis de los métodos de estimación, evaluación y/o medición de emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro.

Figura 2 Metodología de la investigación

Metodología de la investigación

Revisión sistemática		
1. Planeación de la revisión	Identificación del análisis e inmersión en el objeto de investigación.	Base de datos bibliográficos: <i>Scopus, Google Scholar</i>
2. Ejecución de la revisión	Diseño y gestión del análisis, categorización y selección de documentos.	Análisis bibliométrico, método de inclusión y exclusión mediante criterios.
3. Consolidación de la revisión	Análisis de contenido y síntesis, elaboración del artículo y consolidación de resultados.	Revisión y análisis de la literatura: Microsoft Word, Mendeley

Nota: Metodología adaptada de *El estado del arte: una metodología de investigación* (p.434)., por Gómez Vargas, M., Galeano Higueta, C. y Jaramillo Muñoz, D. A; 2015, Revista Colombiana de Ciencias Sociales.

Las fases metodológicas están comprendidas así: planeación de la revisión, donde se establece la orientación de la investigación y se realiza una inmersión en el entorno científico para

determinar la pregunta de investigación, objetivos, áreas temáticas y respectivos enfoques; la segunda fase es la ejecución de la revisión donde se realiza el diseño y la gestión de la investigación, se determinan criterios de inclusión y exclusión para seleccionar y categorizar la documentación que represente mayores aportes a la investigación; y finalmente en la fase de difusión correspondiente al análisis del contenido y la síntesis de los aportes para la posterior formalización de los hallazgos y la elaboración del documento final.

3.1 Revisión sistemática de la literatura

La revisión sistemática marca el inicio de la investigación, y se compone de varias etapas. En primer lugar, se realiza una exploración teórica para identificar los conocimientos fundamentales del estudio. Luego, se desarrolla una revisión bibliográfica para identificar los artículos más relevantes en la literatura científica y gris. Estos artículos son evaluados y analizados para obtener los resultados esperados. Finalmente, se consolida la información encontrada de la investigación.

3.1.1 Planeación de la revisión

La planificación de la revisión comprende las siguientes etapas descritas a continuación:

3.1.1.1 Inmersión preliminar.

La necesidad de una revisión sistemática surge de la exploración de antecedentes y la revisión teórica, que muestran la importancia del control de las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro y la variedad de análisis de los métodos de medición y estimación de la huella de carbono.

Por lo tanto, se requiere un enfoque global y unificado para estudiar esta área temática y obtener conclusiones más generales. De esta manera, la investigación puede contribuir al

desarrollo de conocimientos en el marco estratégico de las organizaciones en sus cadenas de suministro.

3.1.1.2 Planteamiento de la pregunta de investigación.

Se busca que la investigación cubra el área científica mediante una exploración en la literatura actual, para identificar los aportes relevantes de la medición de la huella de carbono en cadenas de suministro. En consecuencia, la pregunta de investigación se plantea así: ¿Cuáles son los métodos para calcular o estimar las emisiones de dióxido de carbono en las cadenas de suministro? ¿Qué características podría tener una propuesta metodológica para evaluar la huella de carbono en cadenas de suministro?

3.1.1.3 Implementación de un protocolo de revisión.

El enfoque utilizado para la revisión sistemática de la literatura es el que propone (Gómez Vargas et al., 2015), como se muestra en la figura 2. Este protocolo se utiliza tanto para la revisión de literatura científica como para la revisión de literatura gris.

3.1.2 Ejecución de la revisión

3.1.2.1 Definición de la investigación.

Se identificaron las palabras clave que segregan los artículos de investigación que conformaron el marco de referencia, donde se establecieron 3 grupos de palabras clave expuestas anteriormente en la tabla 1.

3.1.2.2 Selección de los artículos más relevantes.

Teniendo los resultados de la búsqueda en la base de datos Scopus para la literatura científica y en Google Académico para la literatura gris, se realiza una evaluación de la relevancia y pertinencia de las publicaciones en relación con el tema de investigación. Por lo tanto, se aplican criterios de inclusión y exclusión para refinar la búsqueda e identificar los artículos más

significativos para la investigación. Esto permite una selección más precisa de los estudios que serán utilizados en la revisión sistemática.

3.1.2.3 Extracción, seguimiento y síntesis de los datos.

Tras recopilar y analizar los artículos de investigación, considerando como criterio de selección principal su contribución significativa en la medición de la huella de carbono en las cadenas de suministro, se identifican los artículos más relevantes. A partir de estos artículos se extraerá la información necesaria para desarrollar la investigación, incluyendo elementos como el título del artículo, resumen, objetivo de la investigación y contribuciones del documento en relación con la medición de dióxido de carbono.

3.1.3 Consolidación de la revisión

La revisión sistemática es el medio para resolver la pregunta de investigación, en esta última etapa, a partir del análisis de los artículos seleccionados, se identifican las metodologías empleadas para estimar la huella de carbono y este resultado permite definir y describir las características generales de la metodología a proponer y los factores clave en su implementación, con estos resultados se cumple el objeto de investigación, es crucial establecer una estructura de información científica para desarrollar y consolidar un artículo que presente los resultados obtenidos durante el proceso de investigación.

4. Revisión de la literatura

La revisión de la literatura tiene como objetivo analizar y determinar si la teoría recopilada durante la investigación puede proporcionar una respuesta, aunque sea parcial, a la pregunta de investigación o si puede guiar el enfoque de la investigación. El análisis bibliométrico proporciona información sobre los autores, revistas, citas y áreas temáticas donde está presente la temática

de investigación. Las herramientas con las cuales se llevó a cabo el análisis bibliométrico son Scopus y VOSviewer para la literatura científica, y Google Académico para la literatura gris.

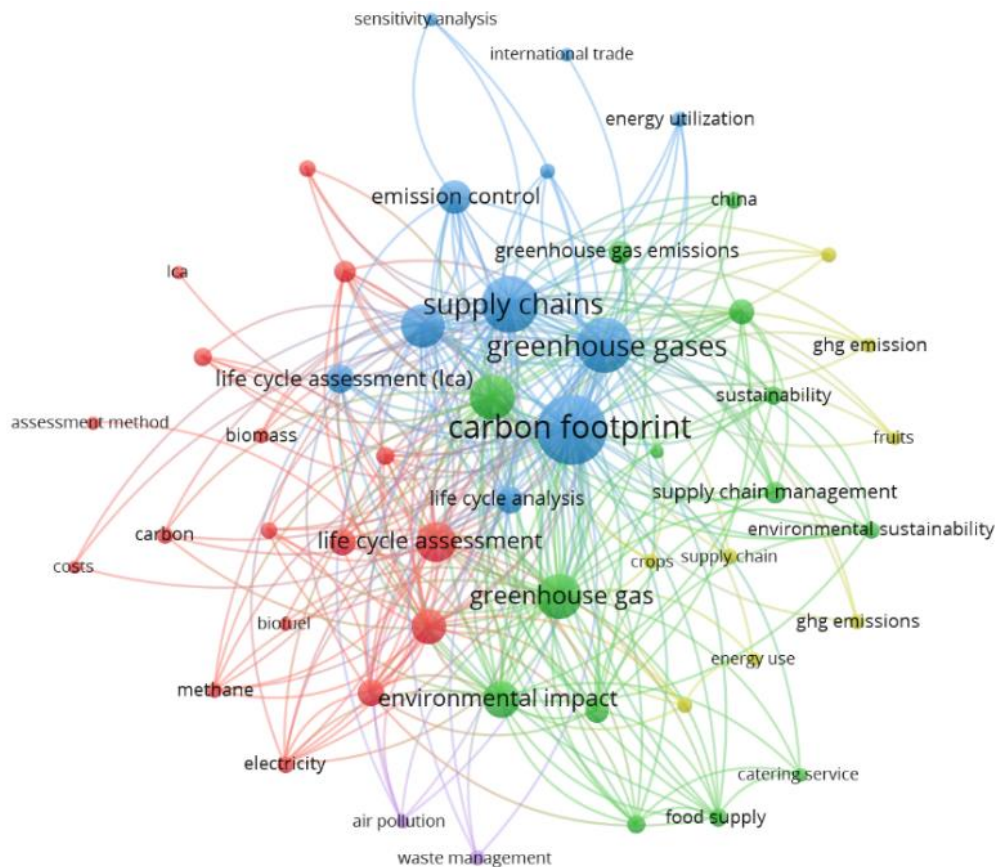
4.1 Análisis bibliométrico de la literatura científica

4.1.1 Análisis de palabras clave

La distinción de las palabras clave empleadas por los autores ayuda a identificar los tópicos y áreas temáticas que se utilizan con más frecuencia alrededor del tema de investigación.

Figura 3

Análisis de la relación de palabras clave de los autores



Nota: Análisis de palabras clave tomado de VOS viewer.

En la tabla 2 se muestra cómo se emplean tres grupos de palabras clave para agrupar conceptos similares y hacer referencia a “huella de carbono”, “cadena de suministro” y “metodologías”.

Tabla 2

Identificación de palabras clave

Huella de carbono	Cadena de suministro	Metodologías
CO ₂	Supply chain	Calculation
Carbon footprint	Supply chains	Estimation
Carbon dioxide	Supply chain management	Valuation
Ghg emission	Supply chain emissions	Assessment method
Greenhouse gases	Supply chain analysis	Emission control
Carbon emission		

4.1.2 Ecuación de búsqueda

A continuación, en la tabla 3 se plantea la ecuación de búsqueda empleada en las bases de datos de *Scopus* para la recuperación de documentos de literatura científica.

Tabla 3

Estructuración de la ecuación de búsqueda en Scopus

Base de Datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
<i>Scopus</i>	TITLE-ABS-KEY (carbon AND footprint OR co2 AND emission OR ghg OR greenhouse AND gas AND estimation OR calculation OR valuation OR assessment AND supply AND chain) AND PUBYEAR > 2016 AND	205

PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE , “rp”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE , “re”)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , “English”) OR LIMIT-TO (LANGUAGE , “Spanish”)) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Carbon Footprint”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Supply Chains”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Carbon Dioxide”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Supply Chain Emissions”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Emission Control”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Carbon Emission”))

Nota. Ecuación de búsqueda preliminar en la base de datos Scopus.

Con los resultados se establece un método de inclusión y exclusión por criterios, especificado en la tabla 4, para identificar los documentos que harán parte de la muestra para esta investigación.

Tabla 4

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Documentos que sean artículos de investigación. ▪ Documentos publicados entre los años 2017 – 2023 ▪ Documentos directamente relacionados con los grupos de palabras clave de la investigación. ▪ Documentos publicados por las revistas de mayor reconocimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Documentos realizados en un idioma diferente al español e inglés. ▪ Documentos cuyas áreas temáticas son irrelevantes para el aporte de la pregunta de investigación.

En la tabla 5 se aplican los criterios anteriormente descritos para complementar el diseño de la ecuación de búsqueda de *Scopus* y así refinar la recuperación de documentos para la revisión de la literatura.

Tabla 5

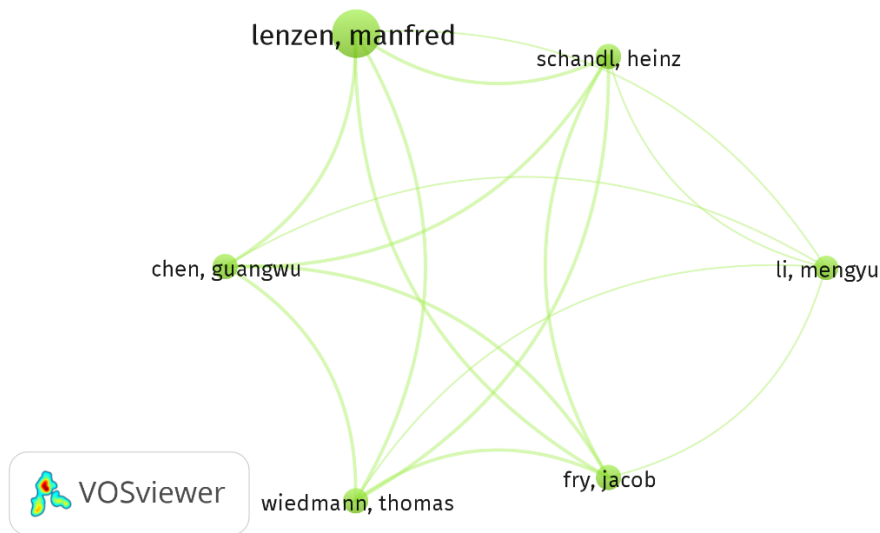
Ecuación de búsqueda en Scopus refinada

Ecuación de búsqueda refinada
(TITLE-ABS-KEY (carbon AND footprint OR co2 AND emission OR ghg OR greenhouse AND gas) AND TITLE-ABS-KEY (estimation OR calculation OR valuation OR assessment) AND TITLE-ABS-KEY (supply AND chain)) AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , “final”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE , “re”)) AND (EXCLUDE (SUBJAREA , “ECON”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “MEDI”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “COMP”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “HEAL”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “NURS”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “PHAR”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “PHYS”) OR EXCLUDE (SUBJAREA , “VETE”)) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Supply Chain”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Carbon Footprint”) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , “Assessment Method”))

Tras buscar con la ecuación final en la tabla 5, se encontraron 102 artículos. Estos artículos fueron sometidos a una verificación de contenido e identificación de su potencial aporte para la investigación. Luego se analizaron los artículos para determinar cuáles serían excluidos y cuáles serían representativos para la revisión. En este análisis, se dio prioridad a los documentos que presentaban metodologías aplicadas a cadenas de suministro o ciclos de vida. Por otro lado, se excluyeron aquellos artículos cuyo enfoque no estaba directamente relacionado con un método de cuantificación; también se excluyeron las publicaciones que no estaban disponibles en acceso abierto y se tomaron como prioridad los artículos publicados en las revistas de mayor nivel.

El análisis documental de la literatura científica conllevó a seleccionar un total de 50 artículos para la respectiva revisión, a continuación, en los siguientes apartados se muestran las publicaciones clasificadas por año, país y revista.

El análisis de citación realizado con la herramienta VoS Viever y los datos bibliográficos de Scopus mostró la relación entre los autores de la muestra según las veces que se han citado entre sí, como se muestra en la figura resaltan 6 autores los cuales tienen al menos 2 publicaciones y han sido citados al menos 50 veces.



Nota: Obtenido de VOSviewer con datos de Scopus.

El análisis incluye otros autores que no fueron enmarcados por la ecuación de búsqueda pero que si embargo tuvieron aportes científicos en los artículos de la muestra revisados y fueron incluidos para complementar la información presentada.

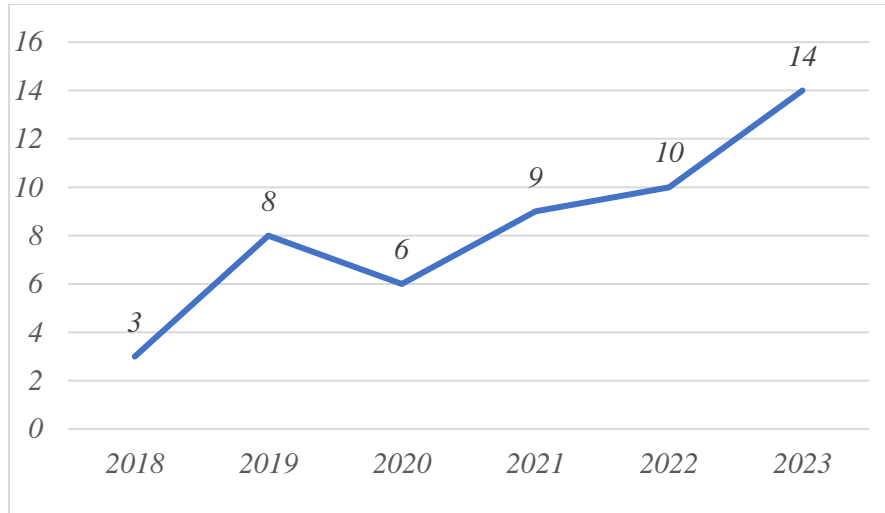
4.1.3 Publicaciones por año

En la figura 4 se evidencia la distribución de artículos publicados cada año. En la muestra seleccionada para el análisis se observa que la investigación de las temáticas que rodean las

emisiones de GEI y las cadenas de suministro aumentaron en el año 2019 y que a partir del año 2020 se ha ido incrementando el interés y la producción científica al respecto.

Figura 4

Producción científica por año



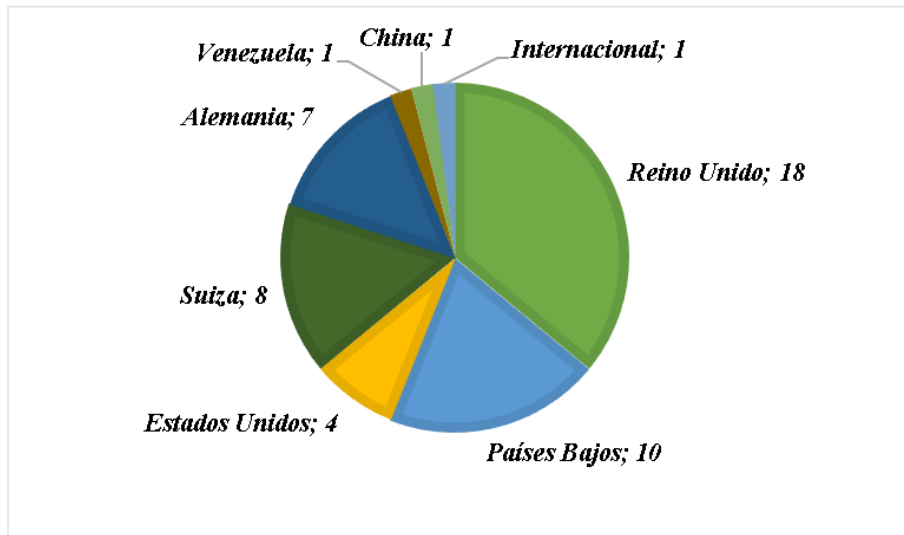
Nota. Producción científica anual desde 2018, información tomada de Scopus y adaptada en Excel.

4.1.4 Producción científica por país

En la revisión realizada se encuentra que entre los países más destacados en cantidad de publicaciones científicas con las temáticas relacionadas a la de la presente investigación está Reino Unido, encabezando la lista con 11 publicaciones, Países bajos y Suiza con 6 publicaciones cada uno y seguidos por Alemania con 4 publicaciones.

Figura 5

Producción científica por país



Nota. Cantidad de artículos publicados por país o territorio, información tomada de Scopus y adaptada en Excel.

4.1.5 Publicaciones por revista

En este análisis se observan las revistas a las que pertenecen las publicaciones estudiadas en esta revisión. Destacaron las revistas Journal of Cleaner Production, International Journal of Life Cycle Assessment, Sustainable Production and Consumption y Sustainability.

Tabla 6

Producción científica por revista

Revista	Publicaciones
Journal of Cleaner Production	6
International Journal of Life Cycle Assessment	4
Sustainable Production and Consumption	3
Sustainability	3
Science of the Total Environment	3
Journal of Environmental Management	2
International Journal Energy Research	2
Science	1
Energies	1

Energy Conversion and Management: X	2
Processes	2
Nature Comunicatios	1
International Journal of Environmental Research	1
Modern Supply Chain Research and Applications	1
Energy	1
Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias	1
Environmental Science and Policy	1
Ecological Economics	1
Frontiers in Environmental Science	1
Agriculture	1
The Royal Society of Chemistry	1
Procedia Manufacturing	1
Procedia CIRP	1
Chemical Engineering and Technology	1
Environmental Impact Assessment Review	1
Circular Economy	1
Cleaner Environmental Systems	1
Environmental research letters	1
The Lancet. Planetary health	1
Developments in the Built Environment	1
Environmental Science and Technology	1
Journal of Fiber Bioengineering and Informatics	1

Nota. Cantidad de artículos publicados por revista, información tomada de Scopus y adaptada en Excel.

4.2 Análisis bibliométrico de la literatura gris

Se analizaron también algunas fuentes de información que no estaban incluidas en los resultados arrojados por la base de datos científica utilizando el buscador de Google Académico. La búsqueda avanzada se realizó utilizando palabras clave en español como “cadena de

suministro” y “huella de carbono” junto con términos como metodología, cálculo, estimación y evaluación. La ecuación se diseñó con resultados en español ya que gran parte de los resultados de búsqueda en Scopus para la literatura científica fueron publicados en inglés.

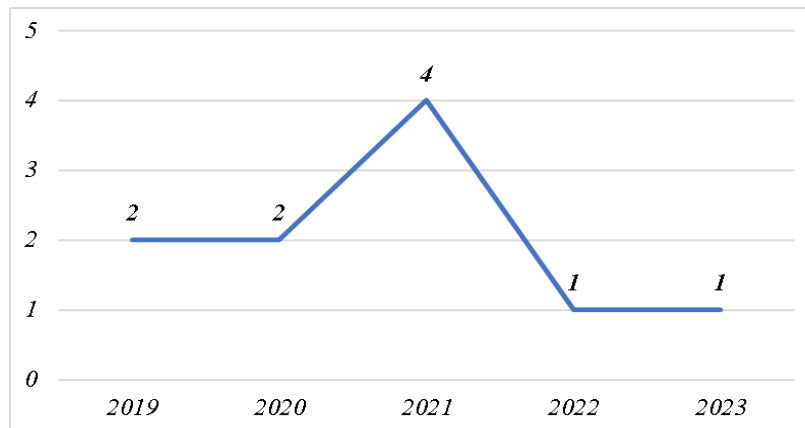
Los criterios de selección para esta búsqueda incluyeron publicaciones realizadas entre el periodo 2018-2023, disponibles principalmente en español, y que representaron una contribución directa a la investigación. Se consideraron artículos que trataban sobre la temática a nivel nacional e internacional, así como revisiones de metodologías publicadas en revistas de alto nivel.

4.2.1 Publicaciones por año

La consulta en la herramienta de Google Académico se limitó al periodo entre los años 2018 y 2023, se filtraron 50 resultados con las mejores coincidencias en la temática. Luego de una revisión preliminar se seleccionaron un total de 10 artículos para el análisis de la investigación teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión. A continuación, en la figura 6 se muestra la distribución de tales publicaciones por año.

Figura 6

Documentos de la literatura gris por año

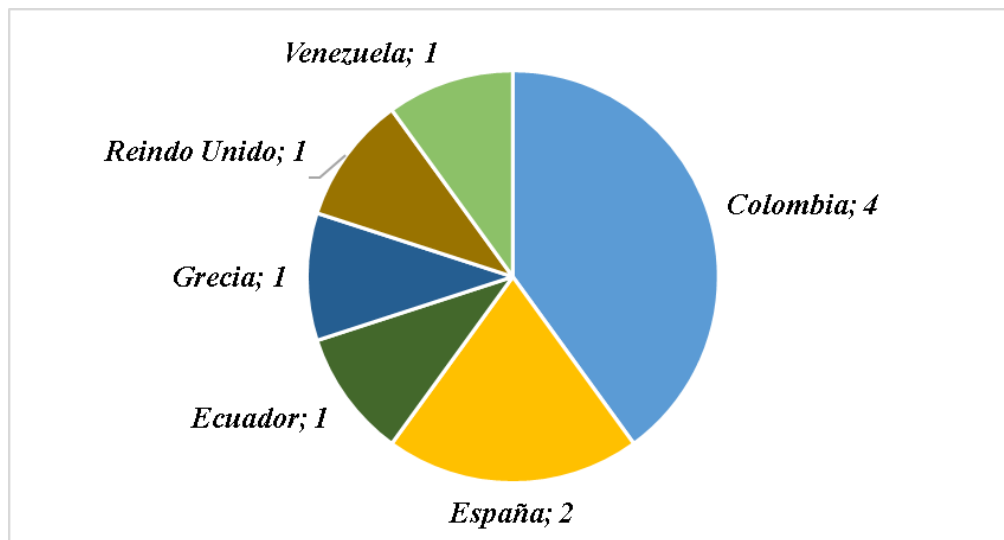


4.2.2 Producción científica por país

Las publicaciones seleccionadas se distribuyen geográficamente como se muestra en la figura 7, se analizaron principalmente documentos de Colombia y España.

Figura 7

Publicaciones por país en la literatura gris



4.2.3 Publicaciones por revista

En este análisis se agrupan los artículos seleccionados según la revista o repositorio de donde fueron publicados recuperados, así como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Fuentes de los documentos de la literatura gris

Fuente	
Universidad de Zaragoza	1
Repositorio Escuela Superior Politécnica de Chimborazo	1
European Research Studies Journal	1
Universidad de Sevilla	1
Mathematical Problems in Engineering	1

Universidad Santo Tomás	1
Universidad Pontificia Bolivariana	1
Revista DYNA	1
Revista Espacios	1
Universidad El Bosque	1

5. Revisión de la literatura sobre la identificación de las metodologías de estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro.

La temática desarrollada por la producción científica seleccionada se aborda desde varias perspectivas, destacando temas relacionados con la sostenibilidad ambiental, se discuten las emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes industrias como la alimentaria, el sector de construcción, manufactura y la energía. Además, se examinan las posibles soluciones para reducir estas emisiones, como la implementación de tecnologías más limpias y la adopción de prácticas sostenibles. La mayoría de las publicaciones desarrollan las evaluaciones del ciclo de vida y la evaluación de la huella ecológica para identificar los impactos ambientales de los productos y procesos. Por último, se destaca la importancia de operar dentro de los límites planetarios para garantizar la sostenibilidad ambiental.

La identificación de las fuentes de emisiones de GEI es apenas el comienzo del reto para este tipo de metodologías ya que la cuantificación también puede variar, comúnmente es medida en toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Esto implica además el esfuerzo de convertir las emisiones de otros gases de efecto invernadero, como el metano y el óxido nitroso, a su equivalente en emisiones de CO₂. En adición, lo más ideal para un cálculo real y comparable entre sectores es la determinación de una unidad funcional generalizable para cualquier proceso

de estimación y esto es otro aspecto en que se podría mejorar la aplicación de los estándares y el seguimiento de emisiones (Muthu, 2015).

5.1. Revisión de la literatura científica

La literatura sobre las metodologías de evaluación de la huella de carbono ha aumentado a través de los últimos años, el rol que representa para las organizaciones y los territorios es muy importante, ya que influye en la toma de decisiones a corto y largo plazo, marcando un horizonte hacia el desarrollo sostenible y sustentable. Las evidencias encontradas soportan el incremento de la responsabilidad empresarial, social y ambiental. De acuerdo con los hallazgos es común que se empleen estándares internacionales integrados con métodos cuantitativos que varían según los objetivos y alcances de la medición.

Las empresas al gestionar sus cadenas de suministro tienen la responsabilidad de reducir la huella de carbono de sus operaciones para contribuir a compensar los efectos del cambio climático (Matuščík & Kočí, 2021). Dicha gestión debería considerar la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles en todas las etapas de la cadena de suministro, donde se analice el proceso desde la obtención de materias primas hasta la entrega del producto final al cliente.

Por ejemplo, una empresa puede reducir su huella de carbono al utilizar materiales y procesos de producción más sostenibles, como la energía renovable, la optimización del transporte y la logística, la gestión de residuos y la conservación de recursos. También puede colaborar con sus proveedores para adoptar prácticas más sostenibles y establecer metas de reducción de emisiones de GEI en toda la cadena de suministro (Gutiérrez Gómez & García Rendón, 2021).

La dirección de operaciones a lo largo de las cadenas de suministro debe considerar la huella de carbono para la toma de decisiones estratégicas y operativas para lograr una gestión sostenible y responsable. Esto implica medir y monitorear constantemente las emisiones de GEI,

establecer objetivos de reducción de emisiones y orientar las actividades de todas las etapas de la cadena de suministro hacia prácticas sostenibles. Además, la huella de carbono se considera como una métrica para evaluar el impacto ambiental de las operaciones de la cadena de suministro y mejorar continuamente la gestión sostenible de la empresa.

El proceso de estimación de la huella de carbono en las cadenas de suministro es complejo ya que implica la identificación de todos los orígenes de emisiones de GEI, desde la producción de materias primas, hasta el transporte y la entrega del producto final al cliente. Para ello, se emplean herramientas como los inventarios de emisiones de GEI y los análisis del ciclo de vida de los productos, es importante que los datos en los que se basarán las mediciones sean evaluados de manera adecuada y exhaustiva (Fry et al., 2018). Los autores Cabernard et al. (2022) resaltan la importancia de la transición a energías renovables, la sustitución de materiales de alto impacto, y la mejora las cadenas de suministro teniendo en cuenta las ventajas competitivas específicas de cada lugar para reducir el impacto ambiental.

La identificación de las fuentes de emisiones de GEI es el primer reto para este tipo de metodologías ya que la cuantificación también puede variar, comúnmente es medida en toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Esto implica además el esfuerzo de convertir las emisiones de otros gases de efecto invernadero, como el metano y el óxido nitroso, a su equivalente en emisiones de CO₂. La evidencia muestra que lo más ideal para un cálculo real y comparable entre sectores es la determinación de una unidad funcional generalizable para cualquier proceso de estimación y esto es otro aspecto en que se podría mejorar la aplicación de los estándares y el seguimiento de emisiones (Muthu, 2015).

Al realizar la medición de la huella de carbono de la cadena de suministro se pueden establecer objetivos de reducción de emisiones y tomar medidas para mejorar la sostenibilidad y

la eficiencia de las operaciones. Además, el cálculo de la huella de carbono ayuda a las empresas a tomar decisiones informadas sobre la selección de sus proveedores y la gestión de la cadena de suministro. En cualquier sector o industria, los avances deben integrarse con la información financiera. Los informes integrados permiten a todas las partes del sistema supervisar los avances y recibir alertas sobre dónde puede haber mejoras y mitigaciones de impactos (Lenzen et al., 2020).

En la muestra para la revisión de artículos se consideraron revisiones de literatura que abordaron temáticas emergentes directamente relacionadas o que de algún modo aportan a la investigación de la huella C en las cadenas de suministro, la tabla 8 muestra las perspectivas de tales revisiones sistemáticas, su aporte en innovación y sus principales hallazgos.

Tabla 8

Antecedentes de revisiones de literatura relacionadas

Referencia	Método	Perspectiva	Principales resultados
Du & Zhou (2022)	Análisis bibliométrico	Evolución de la investigación cadena de suministro baja en carbono	Proporciona un resumen por etapas de los resultados de investigación relevantes de la última década y proporciona un marco teórico para la gestión de la cadena de suministro.
Ghosh et al., (2020)	Revisión sistemática de la literatura (37 artículos)	Gestión de la huella de carbono para una cadena de suministro sostenible	Perspectiva teórica sobre la huella C en la gestión de la cadena de suministro y otros aspectos de la sostenibilidad. Evidencia el sesgo de la mayoría de las investigaciones hacia las aplicaciones y no hacia las intervenciones políticas
González et al., (2019)	Organización basada en procesos sustentables. Una revisión de literatura	Método Delphi para identificar dimensiones clave en las organizaciones basadas en procesos sustentables.	Brinda un marco investigación, de las tres dimensiones principales (Producción Sustentable, Economía y administración sustentable y Manejo y cuidado del ambiente con visión sustentable) la más relevante es la producción sustentable, y dentro de ella el indicador más abordado, es manufactura.

Luo (2022)	Análisis visual	Cadena de suministro baja en carbono, direcciones y tendencias	Explora el sistema actual de conocimientos, la tendencia evolutiva de los temas y las futuras direcciones de investigación, y enriquece el marco de la economía verde
Olatunji (2019)	Revisión de literatura	Impulsores y barreras para la reducción competitiva de la huella de carbono en la cadena de suministro del sector manufacturero	Obstáculos y factores que impulsan una reducción competitiva de las emisiones de carbono en la cadena de suministro de una empresa manufacturera. Se destacaron las buenas prácticas y se esbozaron las estrategias competitivas.
Patsavellas & Salonitis (2019)	Revisión de literatura	Constata la necesidad de un marco estructurado de evaluación de las emisiones de CO ₂ de los diversos componentes de la digitalización industrial	Sugerencias de investigación sobre la huella C de la digitalización de la industria manufacturera: metodología de recopilación y agregación de datos detallada para determinar el impacto de la Industria 4.0 y la IoT en las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.
Wang (2020)	Revisión de literatura	La tecnología Blockchain y su papel en la mejora de la capacidad de integración de la cadena de suministro y la reducción de las emisiones de carbono	Perspectivas el "sistema técnico" y el "sistema social" de las cadenas de suministro. Blockchain tiene atributos únicos, como la inmutabilidad de los datos, la transparencia y la trazabilidad. Se realiza un estudio piloto para investigar más a fondo la futura aplicación de blockchain en la cadena de suministro

Los autores de la tabla anterior brindan revisiones que brindan una comprensión completa de puntos clave de la cadena de suministro baja en carbono, se aborda de manera teórica y práctica la gestión de la cadena de suministro; se estudiaron métodos manuales de revisión y clasificación, la mayoría de estos desarrollan un análisis cuantitativo de las características de la literatura y las tendencias evolutivas alrededor de las temáticas de investigación. Algunos de estos estudios se enfocaron en sectores específicos como la manufactura, la construcción y la industria 4.0. La

revisión de Wang et al. (2020) estuvo enfocada en la integración de la cadena de suministro con la tecnología del blockchain como medio para mejorar la trazabilidad y confiabilidad de la información y por consiguiente de los datos para la estimación de la huella de carbono en cualquier cadena de valor. Los autores González et al. (2019) a su vez abordaron dimensiones indispensables que deberían ser clave para las organizaciones: Producción Sustentable, Economía y administración sustentable y Manejo y cuidado del ambiente con visión sustentable.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente revisión contiene las metodologías más utilizadas a partir del año 2018, se realizó la revisión documental de más de 100 artículos científicos en los cuales se abordaron una variedad de sectores como el de la energía, la alimentación, la salud, la manufactura. Esta revisión recopila los vacíos encontrados por diferentes autores en los últimos 6 años y las líneas de investigación que se deberían fortalecer según estos.

La huella de carbono se puede estimar de diversas formas, actualmente existen varias herramientas y calculadoras en línea para identificar las emisiones de GEI personales o domésticas. Estas calculadoras consideran factores como el uso de energía en el hogar, el transporte, la dieta, las compras y los residuos para aproximar la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos. El Protocolo GEI y otras normas utilizan factores de emisión, datos de actividad y metodologías específicas para calcular las emisiones de GEI en diversos sectores y entidades.

Uno de los enfoques aplicados en los análisis de ciclo de vida, la huella de carbono, esta se obtiene sumando las emisiones que resulten de cada etapa de vida útil de un producto o servicio, incluida la producción de materiales, la fabricación, el uso y el final de la vida útil. Este enfoque tiene en cuenta las emisiones resultantes de diversas prácticas y actividades antropogénicas, como la combustión de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y la minería.

Igualmente, los tipos de huella de carbono incluyen alcances y metodologías de evaluación. La huella de carbono se entiende como el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causadas directa e indirectamente por un individuo, organización, evento o producto. Suele expresarse en toneladas métricas al año e incluye las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) como equivalentes de CO₂.

Existen varias metodologías para estimar la huella de carbono de los productos, y estos métodos pueden clasificarse en dos enfoques principales: el modelo de procesos y el modelo de entradas-salidas. Los principales enfoques encontrados en la literatura son el análisis entradas-salidas, la evaluación del ciclo de vida y su combinación en modelos híbridos. Estos métodos difieren en cuanto a su alcance y aplicación, y ofrecen diferentes perspectivas sobre la huella de carbono de productos, servicios y actividades.

La revisión sistemática compara estos métodos y puede aportar información sobre su exactitud y precisión a la hora de medir y evaluar las reservas y los cambios de carbono. Además, provee un contexto general sobre la aplicación de las metodologías en diferentes sectores y de hacia dónde deberían encaminarse futuras investigaciones.

En el enfoque basado en la producción, la carga medioambiental se clasifica desde el lado de la producción, como los fabricantes y las compañías eléctricas. Por otro lado, en el enfoque basado en el consumo, la carga medioambiental se asigna en función de los productos finales que se van a consumir, como por ejemplo los hogares. En general, a la hora de evaluar la huella ambiental, se opta por el enfoque basado en el consumo porque la demanda total de una nación no puede satisfacerse únicamente con las industrias nacionales (Ichisugi et al., 2019).

Tabla 9

Principales metodologías para la estimación de la huella de carbono

Metodología	Descripción	Características	Autores
<i>Evaluación del ciclo de vida (ECV)</i>	Este método evalúa el impacto ambiental de un bien, proceso o servicio durante todo su ciclo de vida, desde la obtención de la materia prima hasta su eliminación.	Considera todas las etapas, incluida la producción de materiales, la fabricación, el uso y el final de la vida útil, y se usa para calcular la huella de carbono.	Dai et al (2020); Li et al (2021); Xue et al (2019); Mohammed et al (2023); Martelli et al., (2023); Belkhir & Elmeligi, (2018); Álvarez (2018); Dixit et al, (2023); Al Sholi et al (2023); Moazzem et al., (2018); Karlsson et al., (2021); Moreno et al (2022).
<i>Normas ISO 14040/44 directrices ECV</i>	ISO 14040: proporciona los principios y el marco general para la evaluación del ciclo de vida. ISO 14044: establece la metodología específica para llevar a cabo dicha evaluación.	Requiere identificar y evaluar los impactos ambientales durante todas las etapas del ciclo de vida. Permite identificar con el análisis ambiental oportunidades de mejora que ayuden a reducir costes.	Fernández-Ríos et al., (2023) Almeida et al., (2023)
<i>Norma ISO 14064 Huella de Carbono para organización es y proyectos</i>	Estándar Internacional verificable	Enfoque en organizaciones y proyectos, incluye validación de informes. Requiere conocimientos técnicos en contabilidad de GEI, puede ser compleja para organizaciones pequeñas.	de Albuquerque Landi et al., (2023); Carrillo (2019); Aristizábal-Alzate & González-Manosalva (2021) Torres Rojas, (2023)
<i>Norma ISO 14067 Huella de carbono de los productos</i>	Organización Internacional de Normalización (ISO) en 2012, esta metodología ofrece principios y directrices para el cálculo de la huella de carbono Proporcionada por la.	Enfoque en productos, aplicación global, Carácter voluntario. Requiere un conocimiento profundo y datos detallados en todas las etapas de la cadena de suministro.	Suer et al., (2021); Munasinghe et al., (2021)

<i>Métodos híbridos</i>	Combina dos o más métodos de estimación de la huella C como por ejemplo el análisis insumo-producto y de evaluación del ciclo de vida para calcular las emisiones de carbono.	Integra los aspectos económicos y medioambientales de un producto o sistema para proporcionar una evaluación completa de su huella de carbono.	García-Alaminos et al., (2022); Al-Yafei et al. (2021); Aseel et al., (2021); Ichisugi et al., (2019); Crow et al., (2019); Yang et al., (2023)
<i>GHG Protocol – Product life cycle accounting and reporting standard</i>	Convocada por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), esta metodología ofrece directrices para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del ciclo de vida de un producto.	Enfoque en emisiones directas e indirectas. Ampliamente adoptada por empresas y gobiernos.	Céspedes et al., (2022)

Estas metodologías son ampliamente reconocidas y utilizadas para estimar la huella de carbono de los productos. Proporcionan enfoques estructurados para evaluar el impacto medioambiental de los productos y las actividades, lo que las convierte en herramientas valiosas para las organizaciones y los individuos que buscan comprender y reducir sus emisiones de carbono.

La toma de decisiones durante la red de cadena de suministro sostenible (CSS) tiene un gran impacto en la huella de carbono del producto (PCF) por esto es importante estimarla en todas las etapas y que exista un análisis adecuado desde la planeación y diseño de la cadena. Los autores He et al., (2019) proponen una base para modelar la PCF a lo largo de la CSS, este modelo de referencia está basado en el SCOR (Supply Chain Operations Reference) que es un modelo

propuesto por el Supply Chain Council donde se establecen actividades específicas en detalle para los procesos de planificación, obtención de recursos, fabricación, entrega, devolución y habilitación. El modelo puede utilizarse para describir cadenas de suministro muy simples o complejas utilizando un conjunto común de definiciones.

Existen muchas definiciones para la cadena de suministro sostenible, una revisión sistemática sobre la gestión de la huella de carbono identifica que estas definiciones se centran en 3 términos: rendimiento económico, cuidado del medio ambiente y responsabilidad social (Ghosh et al., 2020). También afirman que la mayoría de las investigaciones se centran en desarrollar nuevas metodologías, pero son pocas las que buscan complementar los vacíos de las metodologías existentes de igual manera se centran más en el impacto ambiental y el rendimiento económico que en la responsabilidad social.

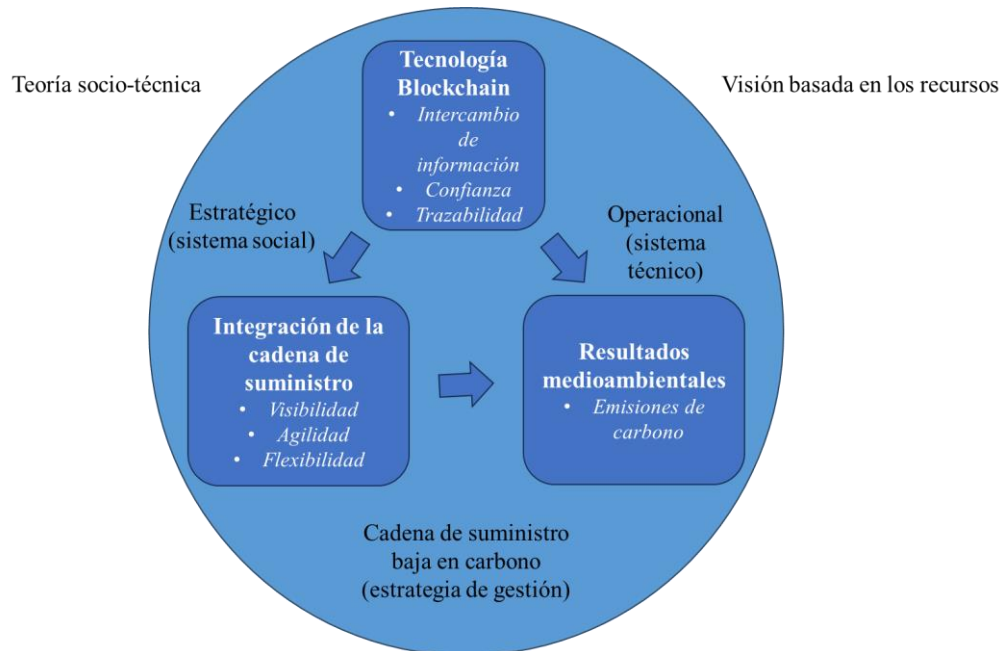
Un análisis y evaluación de la huella de carbono de los proveedores en la cadena de suministro demostró que las grandes organizaciones pueden presentar más dificultades para cumplir las expectativas ambientales dada la complejidad de sus operaciones; también demostraron que los proveedores de tamaño medio-bajo tienden a ser más eficientes desde el punto de vista económico y medioambiental (Bodendorf et al., 2022).

La mayoría de las empresas no tienen un incentivo real para la aplicación de medidas sostenibles y los acuerdos existentes no son lo suficientemente vinculantes y terminan desviando el interés colectivo. Específicamente para el eslabón de los proveedores estos autores han propuesto iniciativas como el “*green purchasing*” o las compras verdes, sin embargo, los mismos también evidenciaron que las partes interesadas de la red proveedora no tienen la influencia esperada en la adopción de medidas por parte de los proveedores (Bodendorf et al., 2022, p. 3).

Otros autores afirman que las empresas menos complejas en su estructura y de menor tamaño también pueden beneficiarse de tecnologías como el *blockchain*, ya que aumenta su acceso a los recursos financieros y facilita la ampliación de su negocio. Las estructuras integrales de cadenas múltiples también pueden ampliar la aplicación de blockchain a escala mundial al facilitar el comercio transfronterizo y mejorar el rendimiento de las cadenas de suministro globales (Wang et al., 2020, p. 11).

Figura 8

Marco conceptual del blockchain y las cadenas de suministro bajas en carbono



Nota: adaptado de Wang et al., p. (2020, p. 11)

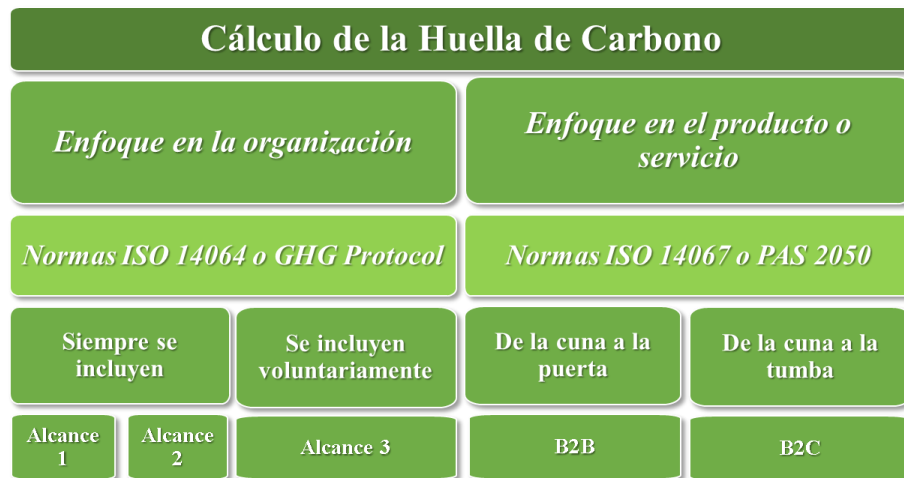
La cadena de suministro es un eslabón clave en la gestión de la empresa que incluye la adquisición y producción de bienes y servicios, su eficiencia es esencial para el éxito de una organización, ya que permite reducir los costos, asegurar la calidad y satisfacer las demandas de los clientes (Olatunji et al., 2019). Las empresas que gestionan cadenas de suministro tienen la

responsabilidad de reducir la huella de carbono de sus operaciones para ayudar a mitigar los efectos del cambio climático (Matuščík & Kočí, 2021). Esto puede lograrse a través de la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles en todas las fases de la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la entrega del producto final al cliente.

Una perspectiva general para clasificar las metodologías de estimación es según el enfoque que puede estar basado en la organización o en un producto o servicio específico. En la figura 11 se muestran las principales metodologías para estos enfoques.

Figura 9

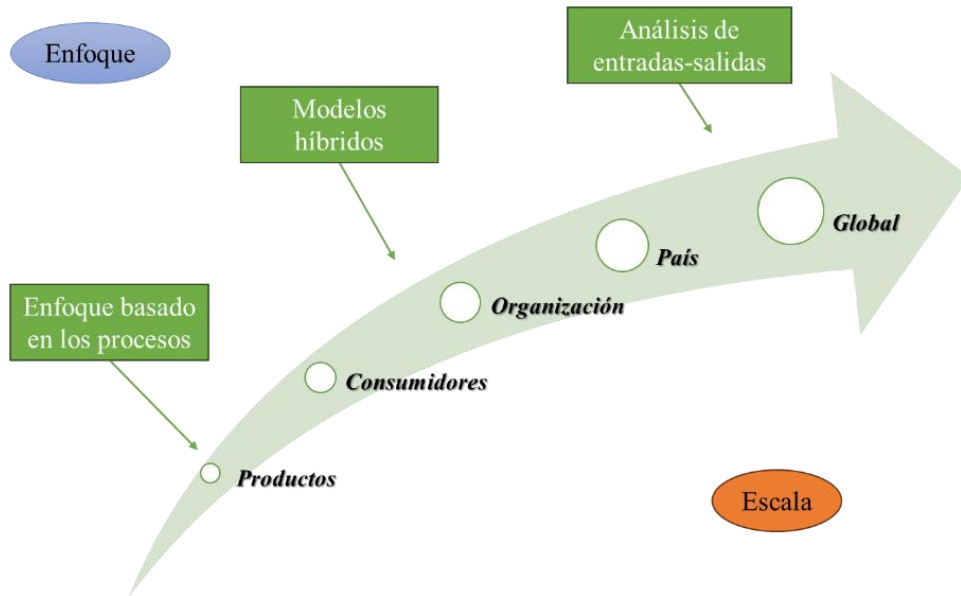
Metodologías para el cálculo de la huella de carbono según el enfoque



En la figura 12 se muestra cómo pueden aplicarse diversos enfoques dependiendo de la escala o alcance que se determine para limitar las emisiones de GEI a calcular.

Figura 10

Relación entre la escala de la huella de carbono y el enfoque de cálculo



Nota: elaboración propia.

5.1.1 Evaluación del Ciclo de Vida - ECV

Esta metodología fue la que más se presentó en la revisión. La producción científica de la muestra desarrolla esta evaluación en diferentes sectores con diversos enfoques presentados a continuación. Los hallazgos concuerdan con que es necesario mejorar la metodología para comunicar mejor la información medioambiental al público con el fin de fomentar el consumo responsable. De esta manera se incentiva a su vez a las organizaciones en el aspecto de su responsabilidad social empresarial.

La alimentación es uno de los sectores indispensables para el desarrollo de la humanidad, algunos procesos relacionados con los alimentos poseen emisiones considerables en las etapas de obtención y transporte materias primas, fabricación, embalaje, transporte a centros de distribución y disposición de desperdicios. Un número considerable de autores han ahondado en este sector y los principales hallazgos encontrados en la revisión se describen en este apartado.

La cadena de suministro del sector alimentario ha tenido relevancia en las investigaciones sobre la huella de carbono, los autores Lee et al. (2021) por ejemplo, realizan una evaluación del ciclo de vida donde calculan la huella de carbono de dos productos teniendo en cuenta la fase de adquisición de la materia prima y la fase de fabricación de los productos terminados. Para este caso de estudio la fase de proveedores y de embalaje de los productos fueron las más representativas en cuanto a emisiones por lo que los autores concluyeron que para una mejor estimación es indispensable contar con el eslabón de proveedores para contar con información más transparente y así analizar lo que sucede con cada materia prima en cada etapa.

Los autores Dai et al. (2020) por su parte, identificaron tres lagunas de investigación entre los estudios existentes en el sector alimentario: dos sobre la modelización de la ECV de los alimentos relacionadas con la regionalización e incertidumbre; y una sobre la modelización energética de las instalaciones de la comida fuera de casa. Abordar estas lagunas puede requerir cooperación internacional y política para avanzar en la estandarización del marco de la ECV.

Continuando con el sector de productos alimenticios, varios autores sugieren que utilizar unidades funcionales (UF) basadas en nutrientes, tanto índices de nutrientes monotemáticos como multitemáticos, y modelos de perfiles de nutrientes; se puede proporcionar una referencia más completa para la realizar la contabilidad de emisiones (McAuliffe et al., 2020). La selección de las UF debe realizarse según el objetivo, el alcance del sistema, el producto objeto de estudio, por lo que la aplicación de una UF más compleja es una perspectiva interesante para ahondar la investigación en este campo.

Dentro del sector alimentario, la industria cárnica posee una significativa participación en las emisiones de GEI, los resultados de los autores Xue et al. (2019) reafirmaron la baja eficiencia de conversión energética de la cadena de suministro de carne (entre la que la carne de vacuno era

la menos eficiente) y las elevadas emisiones de GEI en la fase de producción de la carne. Mientras que el cambio en la estructura de la dieta (ya sea reduciendo el consumo de carne o sustituyéndola por despojos comestibles) mostró el mayor potencial de reducción de emisiones, la eliminación de los residuos cárnicos en la distribución al por menor, el consumo y la generación de subproductos en el sacrificio y el procesamiento también tuvieron un profundo efecto en la reducción de emisiones.

La fase de transporte y distribución representa un valor significativo dentro de cualquier cadena de suministro, algunos autores están enfocando sus investigaciones en el sector energético dada su importancia en el contexto del cambio climático. Por ejemplo, el suministro, el almacenamiento y el transporte internacional de hidrógeno verde (H₂) son esenciales para la descarbonización del sector energético. Según Godinho et al., (2023) en su investigación sobre la huella de carbono en el transporte marítimo de hidrógeno, en comparación con los sistemas convencionales, el impacto medioambiental de diversos procesos de producción de hidrógeno, en particular el reformado de metano con vapor; el transporte internacional de H₂ renovable utilizando LOHC (*liquid organic hydrogen carriers*) portadores de hidrógeno orgánico líquido los cuales son compuestos orgánicos que pueden absorber y liberar hidrógeno mediante reacciones químicas con los que se podría alcanzar un ahorro aproximado del 96,0% en 2030.

La energía es un factor importante al analizar cualquier cadena de suministro, la producción de energía a partir de biomasa por ejemplo, es particularmente estratégica para el alcance de los objetivos globales de sostenibilidad y se espera que el uso de biocombustibles para la producción descentralizada de energía en plantas de tamaño medio-pequeño aumente a corto-medio plazo siendo esta una opción alineada con los objetivos globales de reducción de energía fósil y GEI.

Otros autores presentan una metodología simplificada para la estimación preliminar de la huella de carbono asociada a la generación de calor mediante astillas forestales, como herramienta de apoyo a la evaluación de la sostenibilidad en la toma de decisiones relativas a la biomasa (Scrucca et al., 2023).

La producción de petróleo y gas natural representan una cantidad considerable de emisiones. Una década atrás existió un desacuerdo entre las estimaciones publicadas sobre las emisiones de CH₄ procedentes de las operaciones de gas natural en Estados Unidos llevó a un amplio consenso sobre la necesidad de disponer de datos adicionales para caracterizar mejor las tasas de emisión, una evaluación realizada por Álvarez et al., (2018) mostró un resultado 60% mayor que la estimada por la Agencia de Protección Medioambiental para el año 2015 debido a que posiblemente se pasaron por alto emisiones representativas en condiciones anormales . Se recomendó como estrategia la identificación de las emisiones elevadas y sus causas junto con la implementación de sistemas menos propensos a fallos.

En el caso del petróleo este es un sector que representa cantidades de emisiones representativas y que están relacionadas de manera directa o indirecta con otros sectores. Dado lo anterior ha surgido la necesidad de una información más detallada sobre las emisiones a lo largo de toda la cadena de suministro de petróleo a raíz de la transición energética. Además, la normativa medioambiental ha incentivado la divulgación de emisiones. Sin embargo, la evaluación de la huella de carbono existente no tiene en cuenta la complejidad de la estructura del comercio de crudo y su cadena de suministro carece de trazabilidad. Este análisis utiliza la ECV para tener en cuenta las emisiones de GEI de la cadena de suministro del petróleo, escasamente se visibilizan las emisiones de carbono con un enfoque "desde el pozo hasta la entrada en la refinería", es decir a nivel de las rutas entre los productores y los mercados destino. La base del ECV es una red de

representación de la cadena de suministro mundial de petróleo donde los yacimientos petrolíferos, las terminales de envío, las estaciones de oleoductos y las refinerías son nodos; Oleoductos y transporte marítimo es decir las rutas son bordes. A nivel de cada país productor, la red se utiliza con un algoritmo de optimización multiobjetivo para estimar mezcla de crudos Junto con los datos sobre la demanda de crudo en las refinerías, esto permite una resolución a nivel de las vías individuales de la cadena de suministro. Los autores (Dixit et al., 2023) abordaron este enfoque mediante conjuntos de datos de alta fidelidad y algoritmos de optimización para facilitar la trazabilidad de la cadena de suministro y por medio de estimadores de emisiones ascendentes basados en la física, demostraron una variabilidad significativa de las intensidades globales de carbono con enfoque "desde la entrada hasta la refinería" en las rutas de comercio de crudo. En el enfoque "desde el pozo hasta la entrada en la refinería" las emisiones se clasifican en dos categorías: extracción de crudo (upstream) y transporte de crudo (midstream). Con este enfoque, se logran cubrir ciertos vacíos relacionados con la trazabilidad de la cadena de suministro los cuales han limitado los esfuerzos políticos.

Según los autores Chordia et al., (2021) encontraron que la literatura referente a la evaluación del ciclo de vida de las instalaciones de producción de baterías de iones de litio (BIL) carecía de un análisis de cómo las cargas ambientales han cambiado con el tiempo debido a una transición a la producción a gran escala. Utilizando datos únicos de inventario del ciclo de vida representativos de la producción a gran escala examinaron el efecto de este aumento productivo. El aumento de la producción de BIL traslada las cargas medioambientales a la extracción y producción de materiales en fases anteriores, independientemente de la intensidad de carbono de la fuente de energía. Por lo tanto, un mensaje clave para la industria y los responsables políticos es que sólo es posible reducir aún más los impactos climáticos de la producción de las LIB si la

cadena de suministro de las BIL utiliza fuentes de energía renovables. De este estudio se destaca la importancia de tener en cuenta los cambios en los sistemas bases ya que estos tendrán efectos al evaluar tecnologías y procesos de mejora.

Las evaluaciones de ciclo de vida permiten también comparar el impacto entre productos, los autores Mohammed et al., (2023) en su investigación exponen una evaluación preliminar del futuro desarrollo de una industria de bioplásticos de origen biológico. En la misma estiman el impacto medioambiental de la fase de producción del bioplástico con alginato cálcico Ca (Alg)₂ en comparación con el de los plásticos y los polímeros de base biológica habituales (PET 5504). Los resultados de la ECV revelaron un impacto de GEI entre 3 y 7 veces mayor del bioplástico Ca (Alg)₂ en comparación con las películas de PLA y PET. Esta investigación concluye que mediante la integración de la bioenergía baja en carbono y las cadenas de suministro de e-metanol, el impacto de los GEI se reduce en un 79%, lo que ilustra una vía hacia un diagrama de flujo de producción de bioplásticos más sostenible.

Para el sector de las tecnologías de información y comunicación los autores aseguran que las emisiones de los dispositivos TIC y por tanto su impacto ambiental provienen del consumo de energía utilizado tanto en la fabricación de estos dispositivos como en su funcionamiento. Además, la extracción de metales terrestres utilizados en la fabricación de dispositivos TIC y la eliminación de residuos contribuyen adicionalmente a la huella total de CO₂ de la industria TIC (Belkhir & Elmeligi, 2018). Las metodologías que se pueden utilizar como la ECV requieren un esfuerzo y voluntad considerables para recopilar una cantidad significativa de datos clave sobre cada uno de los dispositivos principales para estimar la huella del ciclo de vida anual de cada dispositivo, y su equivalente global.

Dentro de este tipo de metodología destaca también un análisis realizado para un evento deportivo a nivel mundial, los autores Al Sholi et al. (2023) presentan una investigación exhaustiva a cerca del análisis de la huella de carbono basado en el alcance y relacionado con dos fases, a saber, la etapa de construcción y la etapa de funcionamiento de los estadios, tomando como caso de estudio los ocho estadios de la Copa del Mundo de Qatar. En este tipo de eventos es muy importante la innovación y considerar modelos de economía circular, los autores proponen el desarrollo de estrategias óptimas para la selección de materiales y técnicas; la optimización y el desarrollo de materiales de construcción sostenibles o bajos en carbono y energéticamente eficientes como el cemento bajo en carbono, la madera, la paja y la tierra comprimida, es decir materiales con huellas de carbono más pequeñas. También es clave determinar la utilización de la energía durante el proceso de construcción y gestionar el rendimiento lo cual parte desde la fase de diseño (Al Sholi et al., 2023). En esta metodología se utilizó la base de datos Ecoinvent que recopila datos de diversos sectores. Los datos de ciclo de vida de los estadios fueron desarrollados por la Universidad de Qatar y para cada fase (construcción y explotación) se determinaron los alcances 1, 2 y 3. La emisión de tCO₂ equivalente (tCO₂-eq) se calculó multiplicando la cantidad de cada contribuyente por el factor de emisión. Los resultados mostraron que el alcance 3 fue el más representativo en la fase de construcción con más del 90% para y el alcance 2 fue el más representativo en la fase de explotación con más del 60%. Se concluyó que las emisiones de la cadena de suministro de un estadio durante su construcción y su funcionamiento son en su mayoría emisiones de Alcance 3.

En el sector de la construcción se encontró un análisis multidimensional estructurado como una evaluación participativa integrada, el cual implicó a los actores pertinentes en el proceso de evaluación como representantes de la industria y expertos de la cadena de suministro, así como

proveedores de materiales, contratistas, consultores, clientes y organismos gubernamentales. Con el apoyo de la ECV de los sistemas de construcción de referencia se hicieron estimaciones de las magnitudes de los potenciales actuales y futuros de disminución de las emisiones de GEI en toda la cadena de suministro de la construcción de edificios, esto se consiguió mediante los materiales y los flujos de emisiones de GEI a través de la cadena de suministro de sistemas de construcción comunes para edificios residenciales plurifamiliares; identificando posibles opciones de reducción de GEI; utilizando lo anterior para evaluar el impacto de la combinación de medidas de reducción para la construcción de un edificio funcionalmente equivalente, aunque con menores emisiones de GEI; y elaborando escenarios para destacar los retos y posibilidades hasta el Año 2045 asociados a las medidas aplicadas en toda la cadena de suministro (Karlsson et al., 2021).

En la tabla 10 se consolida un resumen según el enfoque desarrollado y el sector de aplicación para las evaluaciones de ciclo de vida analizadas en este apartado.

Tabla 10

Consolidación según el enfoque y sector de aplicación para las ECV

Sector	Enfoque	Metodología	Eslabones involucrados	Autores
<i>Alimentario</i>	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment) Metodología IPCC (2013) SimaPro v9.1	Obtención de materias primas y fabricación.	Lee et al., (2021)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	Análisis de flujo de materiales	Cadena de suministro	Xue et al., (2019)
<i>Energía</i>	De puerta a puerta (<i>Gate-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment) Metodología de la huella medioambiental de los productos	Producción, manejo, almacenamiento, transporte y distribución	Godhino et al., (2023)

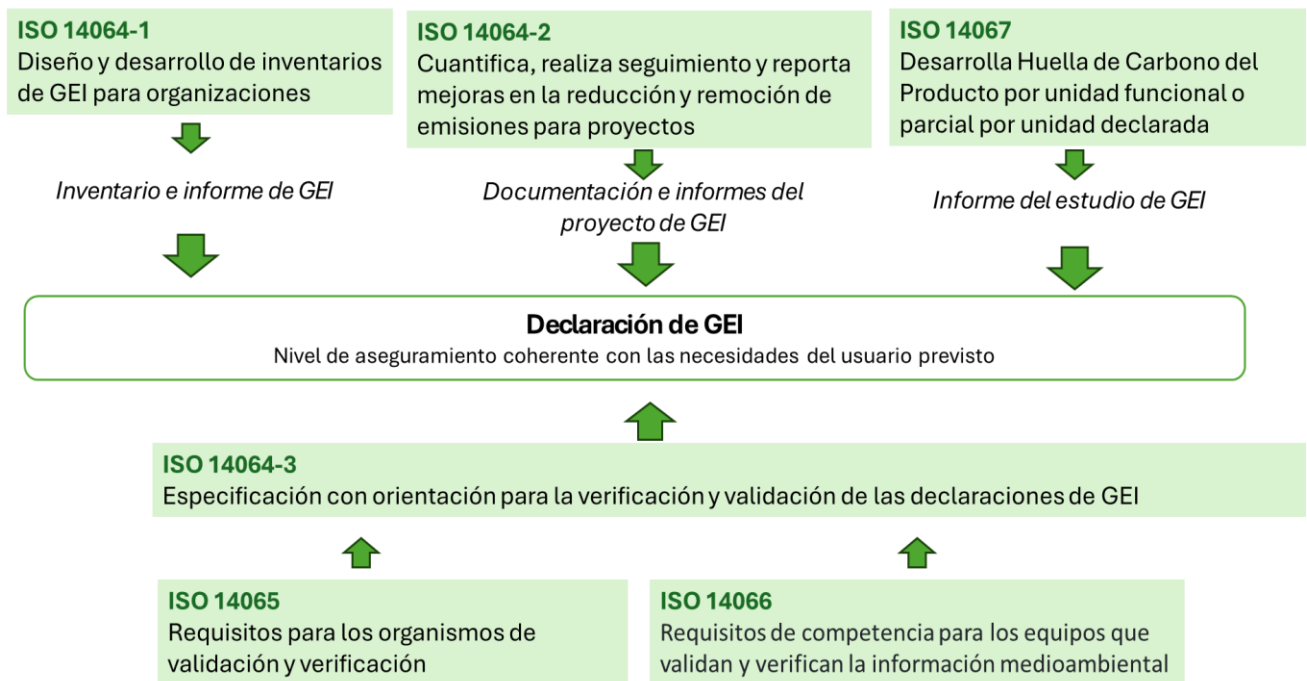
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment)- Metodología IPCC (2021) SimaPro v9.3	Proveedores, organización. Producción, transporte y uso.	Scrucca et al., (2023)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	Greenhouse Gas Reporting Program, (EPA, 2017)	Proveedores, organización. Excluye distribución local y uso final.	Alvarez et al., (2018)
	Pozo hasta la entrada de la refinería (<i>Well-to-refinery-entrance</i>)	ECV (Life Cycle Assessment)	Cadena de suministro	Dixit et al., (2023)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV - Metodología IPCC (2013) Ecoinvent v. 3.6	Obtención de materias primas y producción.	Céspedes et al., (2022)
Manufactura	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment)	Proveedores, organización.	Mohammed et al., (2023)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment)	Extracción y producción de materia prima, producción.	Chordia et al., (2021)
Construcción	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ECV (Life Cycle Assessment)	Representantes de la industria, proveedores de materiales, contratistas, consultores, clientes y organismos gubernamentales	Karlsson (2021)
Servicios	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ECV (Life Cycle Assessment) Ecoinvent V3.7.1	Adquisición de materias primas, construcción y disposición de residuos. Fase de utilización.	Al-Sholi et al., (2023)

5.1.2 Normativas ISO

Entre las metodologías globalmente aceptadas que se encontraron en la revisión se tienen las normas ISO que son estándares ampliamente utilizadas, en la figura 11 se observa un resumen de las normativas ISO relacionadas con la cuantificación, verificación y validación de emisiones de GEI.

Figura 11

Resumen estándares ISO



Nota: adaptado de ISO (2019).

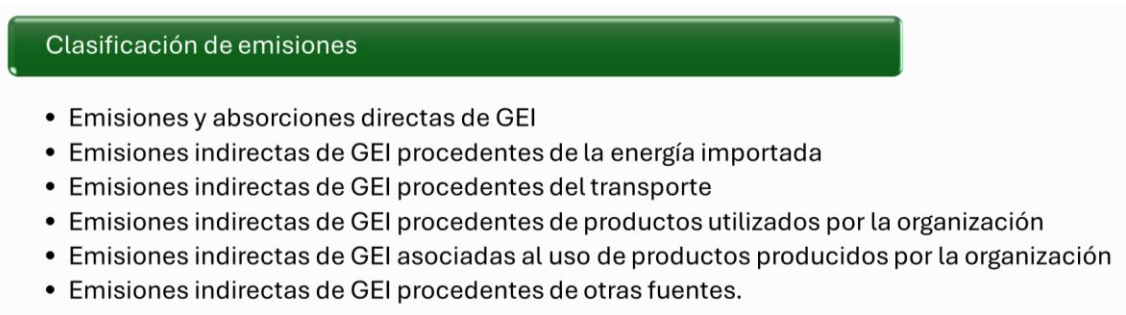
Los alcances 1 y 2 están detallados por normas como la ISO 14064-1, pero las emisiones de alcance 3 al traspasar los límites de la organización no se obligan a reportarse. La complejidad de la estimación de los datos de alcance 3 hacen que no tengan un consenso específico para su estimación ya que se han propuesto diferentes normas y métodos. A continuación, en la tabla 9 se definen tales alcances. De acuerdo con la norma ISO 14064-1:2019, las emisiones potenciales de

gases de efecto invernadero se clasificaron, organizaron y procesaron en seis categorías. El análisis, a nivel de empresa, abarcó el ciclo de vida completo del producto, es decir, desde la cuna hasta la tumba. Todos los impactos se calcularon también de forma agregada, y se crearon subcategorías tal y como recomienda la norma ISO 14046 para una mejor visualización y comparación (ISO 2019).

Las emisiones potenciales de GEI se clasificaron y procesaron en seis categorías (ISO 2019):

Figura 12

Categorías de emisiones ISO 14064-1:2019



Nota: adaptado de (ISO, 2019)

En el sector textil como en la mayoría de los productos terminados se tiene mucha incertidumbre en las etapas de uso y eliminación, una investigación enfocada en las emisiones de una marca textil italiana determinó mediante el estándar ISO 14064-1 2019 que “las emisiones indirectas resultantes de los productos y materiales utilizados directamente por la organización representaron el 71% de las emisiones totales” (de Albuquerque Landi et al., 2023). Este sistema tuvo en cuenta la producción y el transporte de materias primas desde el proveedor hasta la fábrica, así como el transporte de materias primas y productos semiacabados dentro de la cadena de producción de la empresa, incluidos todo tipo de embalajes y transportes relacionados. También

se incluyó el consumo de electricidad y metano de la fábrica, junto con los impactos relacionados con los vehículos de la empresa, las visitas de trabajo, la estimación del transporte de los empleados y los visitantes de la unidad de venta al por menor dentro de la fábrica. El transporte de las devoluciones gestionadas por la empresa, el tratamiento de residuos y el transporte hasta el vertedero, y también se tienen en cuenta el lavado estimado y el almacenamiento del producto durante su utilización y su disposición final.

La huella de carbono de la cadena de suministro de la confección refleja las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un producto o actividad, y la evaluación de la huella de carbono del producto (HCP) es un enfoque importante para valorar las emisiones de GEI, materiales como el poliéster que es una fibra ampliamente utilizada se produce a partir de recursos no renovables. Un estudio de caso llevo a cabo una evaluación del ciclo de vida (ECV) de una camiseta de poliéster importada a Australia desde China, se utilizó la norma ISO 14040, esta norma específica incluye el objetivo y el alcance, la unidad funcional, el límite del sistema, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación. Se demostró que la fase de utilización por parte del consumidor es la que más participación posee en las emisiones de gases de efecto invernadero con un 30,35%, esto debido principalmente a los procesos de lavado; la fase de producción de fibra de poliéster es el segundo que más contribuye. Dentro de la fase de producción, la hilatura es la que más contribuye a la HCP debido a la elevada demanda de energía eléctrica (Moazzem et al., 2018).

Para calcular la HCP de un producto textil se necesitan dos tipos de datos: datos de actividad y de factor de emisión. Los datos de actividad implican la cantidad de todos los materiales de entrada y salida, el transporte, la fase de uso y la energía. Los factores de emisión se refieren al vínculo entre los datos de actividad y los datos de emisión que convierten la cantidad en emisión de GEI. Los datos de actividad y los datos de energía/factor de emisión pueden

obtenerse de fuentes primarias y secundarias. En este estudio, se utilizaron fuentes bibliográficas para la recopilación de datos. Las necesidades energéticas de cada proceso individual se determinaron en función del consumo de combustible y los insumos de electricidad notificados. La HCP de cada subproceso de la cadena de suministro se calculó a partir del insumo de materiales, el insumo de energía y el factor de conversión CO₂-eq para la energía. Este estudio se realizó utilizando fuentes secundarias de datos por falta de fuentes primarias.

El enfoque de la cuna a la puerta puede emplearse para la identificación de oportunidades de mejora y la toma de decisiones en las cadenas de suministro, un ejemplo es el trabajo de Suer et al., (2021) el cual modela una evaluación de la huella de carbono basada la norma ISO 14067 utilizando datos primarios que mejora con modelos metalúrgicos recuperados de la literatura por los autores. Presenta una evaluación holística de la huella de carbono orientada a la producción de acero neutro para los escenarios considerados, de modo que el impacto de estos escenarios para reducir el potencial de calentamiento global.

Una revisión sistemática del inventario del ciclo de vida de la ropa del autor señaló que la mayoría de los estudios no siguen la cadena completa del ciclo de vida y propusieron mapear las evaluaciones del ciclo de vida (ECV) ISO 14044, del sector mediante una revisión bibliográfica sistemática y ajustar aún más la información encontrada mediante la extracción de metaanálisis en una única unidad funcional en relación con su uso de energía y agua, y las emisiones de GEI. (Munasinghe et al., 2021).

Este estudio pretende evaluar la huella de carbono de diferentes tecnologías de H₂ que podrían emplearse en Colombia. La ECV sigue las directrices establecidas por la norma ISO 14040/14044. Los cálculos se realizaron a partir de la literatura, ya que en Colombia no se dispone de infraestructuras para producir H₂ a gran escala. Durante este análisis, el H₂ azul se definió como

H₂ cuyo umbral de emisión de carbono es < 4,13 kg CO₂-eq/kg H₂ y cuya fuente primaria es el gas natural o el carbón. El H₂ verde se definió como el H₂ cuyo umbral de emisión de carbono es < 4,13 kg CO₂-eq/kg H₂ y cuya fuente primaria son recursos renovables como las energías eólica y solar y la biomasa (Moreno et al., 2022).

Dentro de este marco varios artículos abordaron el sector alimentario; uno de ellos realiza por ejemplo una evaluación del ciclo de vida para 4 alternativas de empaque para un producto, en esta Almeida et al., (2023) aplican las directrices de las normas ISO 14040 y 14044 y concluyen que las características del envasado, las opciones de vida útil, junto con la posibilidad de evitar el desperdicio de alimentos, son fases importantes del ciclo de vida que deben tenerse en cuenta cuando se investigan las mejoras medioambientales de los productos del mar procesados. La evaluación y comparación de otros productos puede aportar información sobre el comportamiento de estos factores para la toma de decisiones de embalaje en las cadenas de suministro.

El embalaje es otro factor que puede representar un impacto ambiental considerable en cada etapa de cualquier cadena de suministro, una investigación analiza cómo se envasa la leche realizando una ECV comparando datos de la cadena de suministro empleando los comunes plásticos de un solo uso con el escenario donde se empleen mantequeras de acero inoxidable y botellas de vidrio reutilizables; este estudio sugiere que la emisión de gases de efecto invernadero puede reducirse en unas 6,5 toneladas equivalentes de CO₂ al año si se aplica el sistema de reutilización (un 65 % en los procesos analizados). La fabricación de botellas de plástico en el escenario de plástico y el mantenimiento y transporte en el de reutilización son los principales responsables del impacto ambiental (Błażejowski et al., 2021)

Una innovación reciente en el sector alimentario es la producción de carne cultivada ya que tiene el potencial de tener un impacto ambiental más bajo en comparación con la carne

convencional teniendo en cuenta los indicadores ambientales como el uso de la tierra agrícola, la contaminación del aire y las emisiones relacionadas con el nitrógeno. Para el caso de la huella de carbono es inferior a la de la carne de vacuno. Su comparación con el pollo y el cerdo depende de las combinaciones energéticas. Aunque la producción de carne cultivada y su cadena de suministro son intensivas en energía, utilizar energías renovables puede garantizar que sea una alternativa sostenible a todas las carnes convencionales (Sinke et al., 2023).

Por ejemplo, en una investigación se integra el modelo de ECV con el del análisis de costos del ciclo de vida (Life Cycle Cost), es utilizada la misma unidad de función, sistema límite y rango de tiempo. La unidad de función es la cantidad de ingredientes desperdiciados un día en comedores. Utilizando el punto de vista "de la cuna a la tumba" El estudio descubrió que la cantidad total de residuos de alimentos en los comedores universitarios con 22.000 estudiantes era de 246,75 t/a, la huella de carbono causada por los residuos de alimentos era de 539,28 t CO₂-eq, y el coste era de 4.729.900 yuanes. (Li et al., 2021, p. 7) La mayor parte del impacto de las comidas de comedor en el medio ambiente procede del uso de energía en la cocción de los alimentos y del consumo de alimentos de tipo animal. La innovadora integración de los cálculos del coste del ciclo de vida pone de relieve el papel clave de la mano de obra necesaria para cocinar. Los resultados de la investigación responden a las preguntas científicas básicas de cuánta comida se desperdicia en los comedores universitarios, y las emisiones de carbono y los valores de coste de estos alimentos desperdiciados en todos los eslabones de la cadena de suministro. Los resultados de la investigación pueden proporcionar una base política y datos de apoyo para reducir el desperdicio de alimentos en las universidades y conseguir una reducción de las emisiones de carbono en los comedores universitarios.

Del mismo modo un estudio de Fernández-Ríos et al., (2023) investiga dos tecnologías de captura y utilización de carbono y su desempeño en la descarbonización de la producción de suplementos de espirulina, que es un producto de algas consumido habitualmente por sus características nutricionales. Los escenarios propuestos por los autores consideraron la sustitución del CO₂ sintético de uso alimentario en el cultivo de *Arthrospira platensis* (alga espirulina) por CO₂ procedente de la fermentación de la cerveza y CO₂ procedente de la captura directa de carbono en aire, representando así dos alternativas con gran potencial para mitigar las emisiones a corto y medio-largo plazo, respectivamente.

La ECV permite analizar y reconsiderar los procesos y actividades relacionados con los ciclos de vida de los productos. Por ejemplo, un estudio basado en la ISO 14040 evaluó las emisiones de un tractor agrícola teniendo en cuenta las fases de producción, uso y fin de vida útil; se mostró que gran parte de estas están relacionadas con su utilización, alrededor de un 90% (Martelli et al., 2023). La vía de mitigación de este tipo de productos parte del análisis del potencial de reciclaje de componentes con miras a la sostenibilidad de un sistema circular.

En la tabla 11 se muestra la consolidación por enfoque y sector de aplicación para las normativas ISO aplicadas en la literatura estudiada.

Tabla 11

Consolidación por enfoque y sector de aplicación para las normas ISO

Sector de aplicación	Enfoque	Metodología	Eslabones involucrados	Autores
<i>Textil</i>	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ISO 14040 Análisis de ciclo de vida	Obtención de materias primas, la producción, el transporte, el uso y la eliminación.	Moazzem et al., (2018)

	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ISO 14064-1	Producción y transporte de materias primas, Organización, transporte, distribución, disposición final.	de Albuquerque et al., (2023)
Energía	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14040 / ISO14044 Directrices ECV	Proveedores, organización	Moreno et al., (2022)
Siderurgia	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14067- Huella de carbono del producto	Desde la obtención de la materia prima hasta la producción.	Suer et al., (2021)
Alimentario	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14040 / ISO14044 Directrices ECV	Organización, producción incluyendo el fin de vida útil	Almeida et al., (2023)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14040 / ISO14044 Directrices ECV	Obtención de materia prima, producción	Fernández-Ríos (2023)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ISO 14040 / ISO14044 Directrices ECV	Adquisición de materias primas, fabricación de productos terminados y disposición de residuos.	Li et al., (2021)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle-to-gate</i>)	ISO 14044 Directrices ECV (ex ante)	Extracción y producción de recursos, transporte, uso del suelo *excluye el embalaje	Sinke (2023)
Lácteo	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ISO 14040 / ISO14044 Directrices ECV	Cadena de suministro. Excluye el uso del producto	Błażejowski et al., (2021)
Agrícola	De puerta a puerta y de cuna a puerta (<i>Gate-to-gate and cradle-to-gate</i>)	ISO 14040 Directrices ECV	Proveedores, organización, consumidores. Producción, uso y fin de vida útil.	Martelli et al., (2023)

5.1.3 Modelos híbridos

La contabilización de emisiones puede sujetarse a diversos factores y la complejidad de las cadenas de suministro puede hacer que sea más desafiante su estimación; por eso diversos autores han optado por combinar metodologías para complementar los datos. A continuación, se enuncian algunos ejemplos de autores que han buscado la combinación de metodologías y herramientas para minimizar los posibles vacíos en los cálculos a lo largo de las cadenas de suministro.

Una propuesta realizada por (García-Alaminos et al., 2022), propone un método híbrido reproducible basado en datos cuantitativos que permite evaluar los 3 alcances; donde el alcance 1 y 2 se miden en un enfoque ascendente mediante la ECV y el alcance 3 con MRIO. Este enfoque puede abordar desde otra perspectiva la complejidad de las cadenas de suministro.

Los autores Al-Yafei et al., (2021) aplicaron un modelo híbrido para evaluar las emisiones de la cadena de suministro del gas natural licuado en el cual emplean el análisis multirregional de entradas y salidas (MRIO), la herramienta de simulación de procesos Aspen Hysys y LNG una herramienta de cuantificación de las emisiones del transporte marítimo. Con estas herramientas agruparon las fuentes de emisiones medioambientales según la participación de cada etapa en la cadena de suministro, donde descubrieron que la carga de GNL, en terminal de exportación, y las etapas de transporte de GNL presentaban las emisiones atmosféricas máximas.

El gas es una de las fuentes de combustible y dada la complejidad de su red de distribución es todo un reto integrar la sostenibilidad. En el año siguiente el mismo autor Al-Yafei et al., (2022) investigó hasta qué punto es sostenible la cadena de suministro de gas natural licuado mediante un modelo integrado de evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida donde incluye el análisis multirregional de entradas y salidas (MRIO), la herramienta de simulación de procesos Aspen Hysys y LNG la herramienta de cuantificación de las emisiones del transporte marítimo LNG. Las

emisiones de CO₂ más elevadas fueron en la fase de carga en el terminal de exportación las cuales representan alrededor del 40 % de contribución en toda la cadena de valor del gas natural licuado. El impacto de estas emisiones depende del diseño y de la naturaleza del equipo empleado en el proceso junto con el combustible utilizado y las características de la corriente de combustión.

Del mismo modo los autores propusieron un modelo para estimar la huella de carbono del transporte marítimo de gas natural licuado utilizando el programa MATLAB, crearon un marco de contabilidad de la huella de carbono basado en la incertidumbre. Este modelo se basó en un análisis estadístico, se realizó una modelización y simulación Monte Carlo con MATLAB y un análisis de sensibilidad con Risk Solver. (Aseel et al., 2021).

Los autores propusieron evaluar la proyección nacional de la huella de carbono en Japón basándose en el concepto de ciclo de vida y en los IAM, (Modelos de evaluación integrados).

En este estudio, se recopilaron los datos fundamentales utilizando bases de datos de ECV y estimando las futuras emisiones de GEI teniendo en cuenta en enfoques basados en la producción y en el consumo, teniendo en cuenta las cadenas de suministro entre sectores industriales (Ichisugi et al., 2019).

Casos de estudio de investigación aplicados en un territorio se plantean la medición de la huella de carbono en el marco de acuerdos como el de “Objetivos de desarrollo sostenible al 2030” el cual plantea la meta de limitar el calentamiento global a 1,5 grados Celsius. Es el caso de la investigación de Goodwin et al. (2023), donde se analizan las cadenas de suministro locales, subnacionales e internacionales de una ciudad, utilizando un MRIO que cuantifica las emisiones de alcance tipo 3 para así identificar las áreas de mayor impacto y oportunidades de mejora. En el caso de estudio del territorio de la Capital Australiana se busca reducir su huella de carbono con varias medidas, incluida la mejora de la eficiencia energética, la implementación de sistemas de

transporte sostenibles y la transición a fuentes de energía renovables. Estas medidas suponen un gran esfuerzo y voluntad ante una serie de cambios generalizados en las formas de consumo y por ende en el estilo de vida. La meta de reducción específica de la huella de carbono requiere medidas proactivas para compensar el cambio climático y contribuir a los esfuerzos globales para controlar el aumento de la temperatura. Estas medidas a su vez se deberían enfocar principalmente en el diseño de nuevos modelos empresariales, la inversión en investigación e infraestructura y la creación de incentivos económicos y políticos, especialmente en sectores como la electricidad, el transporte y la alimentación (Goodwin et al., 2023).

Se ha evaluado también la producción de gas natural, varias investigaciones han estudiado el impacto climático de la producción de gas natural y sus posibles consecuencias económicas. A partir de estimaciones de las emisiones de CO₂ y metano de distintas actividades de la cadena de suministro, los autores Crow et al., (2019) contruyeron un modelo determinista de las emisiones de GEI de los yacimientos de gas convencionales y no convencionales en función del tiempo. Estas emisiones se combinaron con un modelo tecnoeconómico dinámico de suministro de gas, donde a su vez evalúa el impacto potencial en el precio del petróleo. En este se calcularon las emisiones en cinco tipos de yacimientos diferentes y muestra la variación de intensidad en las emisiones correspondientes a las distintas fases del ciclo de vida de un yacimiento. Los escenarios de emisiones elevadas muestran emisiones de CO₂ significativamente más altas para la producción no convencional que para la convencional, lo que probablemente refleja mayores variaciones entre los distintos yacimientos durante la fase de finalización de los pozos y la extracción. Este estudio determinó que aproximadamente el 40% de la producción de CO₂ está directamente relacionada con las actividades de perforación, así que las emisiones también van a depender del método de producción utilizado (Crow et al., 2019). Este tipo de estimaciones y su confiabilidad constituyen

las bases de políticas de descarbonización eficaces que puedan dar prioridad a los intercambios con bajas emisiones de carbono. Los distintos niveles de agregación de crudo (vía, tipo de mezcla, país) facilitan la flexibilidad necesaria para aplicar este tipo de políticas. Además, la importancia a mediano y largo plazo de estas emisiones puede motivar la estimación y notificación de las emisiones de carbono en tiempo real por parte de la industria.

Una investigación basada desde la perspectiva del uso de energías renovables en la industria del petróleo y el gas en Colombia evalúa la reducción potencial de emisiones de GEI que puede lograrse mediante la implementación de un sistema de coproducción de energía geotérmica en dos campos petrolíferos colombianos, en comparación con un caso base en el que las necesidades energéticas se derivan de fuentes no renovables como el gas y el diésel, utilizan motores de ciclo Rankine orgánico (ORC) para convertir el calor de los fluidos producidos en los campos petrolíferos en energía eléctrica. El potencial energético de este recurso se evalúa mediante el concepto de exergía, y se aplica una ECV para calcular la huella de carbono utilizando la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2013. Los autores determinaron la huella de carbono de la producción de varios crudos convencionales norteamericanos, que producen emisiones a través de muchas actividades en varios puntos de la cadena de valor, incluyendo la perforación, las variaciones en el uso de la tierra, la producción de crudo, el procesamiento del crudo, el venteo, la quema en antorcha y las emisiones fugitivas. Los cálculos de la ECV mostraron que un escenario en el que se utiliza energía renovable produce un 6,7% menos de emisiones de CO₂ en comparación con un enfoque tradicional sin utilizar energía renovable (Céspedes et al., 2022).

La generación de energía a partir de biomasa es un paso crucial en el camino para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible a nivel mundial, y se prevé que los biocombustibles se

utilizarán más ampliamente para la producción descentralizada de energía en pequeñas plantas en el corto plazo, alineándose con los objetivos globales de reducción de los combustibles fósiles y de GEI. La metodología simplificada propuesta por Scrucca et al., (2023) se basa en las características de la planta, en los métodos de producción y la distancia de transporte, y permite evaluar el impacto teniendo en cuenta su variación. , tal metodología incluye todas las fases relevantes del ciclo de vida y se basa en las características específicas del combustible y de la planta, por lo que puede apoyar eficazmente la evaluación de la sostenibilidad en la toma de decisiones sobre proyectos de biomasa mediante estimaciones adecuadas de la Huella de Carbono. La combustión de las astillas de madera en la planta de generación de energía fue el mayor contribuyente al impacto en los casos de producción para una cadena de suministro local, donde la fase de producción gana importancia cuando se considera el cultivo y el método de fertilización. La contribución de la etapa de transporte de las astillas fue menos relevante y se compara a la de la combustión en la central energética cuando se considera una cadena de suministro más larga. Se confirmó la idea básica de que utilizar astillas forestales es especialmente estratégico para la producción de energía sostenible dentro de una cadena de suministro de madera-energía en una corta distancia de transporte. Además, la metodología permitió estimar distancias de transporte indicativas para las que las astillas forestales pueden considerarse ambientalmente competitivas en comparación con fuentes renovables alternativas como, por ejemplo, los pellets de madera (Scrucca et al., 2023).

Un ejemplo de aplicación de modelos híbridos de evaluación del ciclo de vida (ECV) integrado con el modelo de análisis IO (Input-Output) en datos económicos para cuantificar la huella de gases de efecto invernadero (GEI) de toda la economía del sector de la energía eólica de China de referencia de China de 2007, 2012 y 2017. Según los autores “Las fuentes de energía

renovables, como la eólica, desempeñarán un papel esencial en la transición energética mundial con bajas emisiones de carbono” (Yang et al., 2023, p 1)

Este sector es uno de los más prometedores ante la lucha contra el cambio climático y China es un país destacado por su infraestructura en energía eólica y se espera que se continúe expandiendo. Sin embargo, la implementación de la energía eólica para la generar electricidad requiere una inversión sustancial en infraestructuras de parques eólicos, lo que ejerce un impacto medioambiental y un consumo de recursos (Li et al., 2020). Por este motivo la huella medioambiental asociada al desarrollo de la energía eólica debe estimarse de modo que abarque todas las fases de su ciclo de vida. Los sistemas de energía eólica involucran sectores como la fundición de acero, la producción de materiales compuestos y la fabricación de equipos mecánicos. Los autores también afirman que el desarrollo del sector eólico en una economía inducirá las huellas energéticas y de gases de efecto invernadero (GEI) de los sectores de la cadena de suministro. Según este análisis también se concluyó que aproximadamente un 2% de la disminución de la huella energética y de GEI se puede atribuir al aumento en la implementación de sistemas de energía eólica en la red de China. Este estudio también descubrió que más del 97% de las huellas de energía y GEI de la cuna al cable se derivaban de la construcción de parques eólicos, mientras que menos del 3% procedía de la generación de energía eólica, también el desglose de las etapas de producción demostró que la mayor parte de la huella (más del 84%) del sector eólico chino procedía de las industrias anteriores.

Un modelo interesante es el presentado por Stephan et al., (2019) coordina un inventario de ciclo de vida mediante la automatización de componentes. Se basa en un análisis híbrido de intercambio de trayectorias e incluye módulos interrelacionados desarrollados en Python mediante programación orientada a objetos.

En la tabla 12 se muestra la clasificación por sector de aplicación y enfoque para los modelos híbridos analizados en la literatura científica.

Tabla 12

Consolidación por enfoque y sector de aplicación en los modelos híbridos

Sector de aplicación	Enfoque	Metodología	Eslabones involucrados	Autores
Energía	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	Análisis MRIO, herramienta de simulación Aspen Hysys y LNG.	Cadena de suministro	Al-Yafei et al., (2021)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ECV y análisis MRIO.	Cadena de suministro	Al-Yafei., (2022)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ECV y DYNAAMO model	Producción/organización	Crow et al., (2019)
	De la cuna al cable (<i>Cradle to wire</i>)	ECV - Análisis de entradas y salidas	Cadena de suministro	Yang et al., (2023).
Educación	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ECV (Alcance 1 y 2) MRIO (Alcance 3)	Cadena de suministro	García.Alaminos (2022)
Manufactura	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ECV y IAM (modelos de evaluación integrados)	Cadena de suministro	Ichisugi (2019)
	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	Inventario de ciclo de vida, análisis híbrido de intercambio de trayectorias	Cadena de suministro	Stephan et al., (2019)

5.1.4 GHG Protocol – Protocolo GEI

Cuanto más empresas de la cadena de suministro participen, más precisos serán los cálculos. Lo más ideal sería una herramienta basada en la web que sea fácil de usar y esté disponible en todo el mundo. La herramienta web, garantiza que todas las emisiones anteriores (integridad) se recojan anualmente de forma comparable (coherencia). La mejora recursiva iniciada mediante la participación de otros agentes de la cadena de suministro garantiza la precisión. Y todos los datos necesarios para el cálculo están disponibles en una estructura clara y comprensible y, por tanto, son fácilmente verificables (transparencia) (Schmidt et al., 2022).

Para complementar este estándar, está disponible en la página web www.ghgprotocol.org un conjunto de herramientas de cálculo de tipo sectorial e intersectorial. Estas herramientas ofrecen una guía paso a paso y hojas electrónicas de trabajo para ayudar a los usuarios a calcular emisiones de GEI para fuentes o industrias específicas (Corporate Standard | GHG Protocol, 2021).

Utilizando el estándar, las empresas pueden medir los gases de efecto invernadero asociados con el ciclo de vida completo de los productos, incluidas las materias primas, la fabricación, el transporte, el almacenamiento, el uso y la eliminación. Los resultados pueden crear una ventaja competitiva al permitir un mejor diseño de productos, aumentar la eficiencia, reducir los costos y eliminar riesgos. La norma también ayudará a las empresas a responder a la demanda de información medioambiental de los clientes y facilitará la comunicación de los aspectos medioambientales de los productos (Product Standard | GHG Protocol, 2020).

5.2 Revisión de la literatura gris

La investigación de la huella de carbono también se extiende a la literatura gris, que también es denominada como literatura semipublicada, literatura no convencional o literatura

invisible. Los hallazgos encontrados enuncian diversos documentos ya que medir la huella de carbono en las cadenas de suministro es cada vez más importante por la creciente preocupación por el cambio climático. En este sentido, la literatura gris ha proporcionado una valiosa contribución a la investigación en este campo. A continuación, se presentan los artículos relevantes que aportan al análisis de metodologías para la evaluación de la huella de carbono en cadenas de suministro.

En primer lugar, existe interés científico en la descarbonización global de la producción energética encaminada a disminuir las emisiones de GEI, que sustituya la energía fósil por energías renovables no convencionales, “la energía distribuida y los recursos de generación (principalmente energías renovables) están desempeñando un papel cada vez más fundamental en la prestación de servicios eléctricos, lo que plantea desafíos a la organización tradicional de la cadena de suministro de los sistemas energético” (Gutiérrez Gómez & García Rendón, 2021, p. 3)

Según Matuščík & Kočí (2021) “bajo el nombre de huella de carbono (FC) se esconde una gran variedad de enfoques metodológicos, que a menudo tienen en común poco más que el objetivo de medir el impacto de una actividad en el clima de la Tierra”(p. 3). La huella de carbono es el indicador más conocido; sin embargo, también es en el que el caos es más evidente, con multitud de definiciones y enfoques diferentes.

Algunos autores afirman que:

La estimación y verificación de las emisiones de GEI y sus concentraciones en la atmósfera, requieren protocolos con supervisión constante de los factores de emisión de los distintos GEI, y esto tiende a afectar el cálculo de otros indicadores ambientales, la denominada huella de carbono parte de la expresión de la masa (kg, tonelada) de CO₂ equivalente emitido por una organización, proceso, sistema o actividad por unidad de

producto o período de tiempo, hasta la forma más rigurosa que corresponde al cálculo del área de territorios productivos (cultivos, pastos, bosques, superficies de cuerpos de agua, etc.) requerida para secuestrar una cierta cantidad de carbono emitido por una actividad u organización, hasta (Rodríguez et al., 2020, p. 75)

La norma ISO 14064 recomienda utilizar herramientas de cálculo que muestren resultados separados para cada alcance, el autor Carrillo (2019), determina la huella de carbono en un laboratorio químico ambiental mediante esta norma donde evidenció que el alcance 2 fue el más representativo con un 46,5% seguido por el alcance 1 y 3 con 40,4% y 13,1% respectivamente. observó los requisitos y directrices establecidos en las normas ISO 14001 (2015), 14040, 14041, 14043 y 14064.

De manera similar el artículo de Aristizábal-Alzate & González-Manosalva (2021) es un ejemplo para la evaluación de la huella de carbono de cualquier tipo de organización porque se rige de estándares internacionales como ISO 14040-14044 e ISO 14064. Para este caso se aplicó en un campus universitario donde “las actividades que más GEI emiten corresponden al Alcance 1, especialmente el uso de combustibles fósiles, empleado principalmente para el transporte de equipos y empleados con cerca del 69%; y, en el Alcance 2, el consumo de electricidad aporta aproximadamente el 26,8%” (p, 91).

La autora implementó la metodología establecida en la norma ISO 14064-1 “*Gases de Efecto Invernadero. Especificaciones y orientaciones, a nivel de la organización, para la cuantificación y la declaración de las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero*”, en donde se encuentran los principios y requisitos obligatorios a cumplir para el desarrollo y gestión del reporte de los inventarios de gases de efecto invernadero a nivel organizacional (ISO 14064, 2018). Con el desarrollo de esta tesis se concluyó que para una organización que brinda

servicios de logística las emisiones indirectas, es decir, el alcance 2 relacionado con el consumo de energía eléctrica es la principal fuente de emisión. Se destacó la importancia de la trazabilidad de las emisiones y se recomendó “fortalecer el sistema de información sobre las fuentes de emisión de GEI y consumo de energía fundamentales para el proceso de identificación, medición y mitigación de estos gases” (Torres Rojas, 2023, p. 49).

Una de las revisiones halladas aborda la importancia de la integración de la economía circular en las cadenas de suministro, las posibilidades entre sectores son muy variadas, ya que las cadenas de suministro de cada empresa son diferentes según sus actividades, al tenerse en cuenta los procesos circulares, el producto y su trazabilidad es indispensable para definir las posibilidades que se pueden dar en los flujos inversos el autor de esta revisión afirma que, “implantar procesos circulares en una cadena lineal, supone mejorar tanto en sostenibilidad como en el rendimiento de esta”(Adrados Pérez, 2021, p. 56) .

Según el autor Almerco Armas (2022), la economía circular “es un nuevo modelo que promueve y garantiza la innovación y el crecimiento sostenible mediante la optimización de recursos, la reducción en el consumo de materias primas y el reciclaje, convirtiéndolos así en nuevos productos” (p. 41).

Los resultados de cálculo presentados indican que los métodos para medir la huella de carbono no reflejan plenamente las necesidades de la vida real. El nivel informado de emisiones de CO₂ depende del método de cálculo utilizado. el desarrollo del método para la identificación e integración de los datos relacionados con las emisiones de CO₂ de los participantes de la cadena de suministro.

En la práctica, el nivel de emisiones de CO₂ depende de parámetros logísticos como la distancia, el factor de carga y el horario de transbordo. Los métodos de medición de la huella de carbono no reflejan plenamente las necesidades de la vida real. El nivel de emisiones de CO₂ depende del método de cálculo utilizado. Por lo tanto, la elección del método de cálculo debe ser cuidadosamente justificada por una empresa (Dubisz & Golinska-Dawson, 2021, p. 860).

Según el análisis basado en el método de evaluación del ciclo de vida, para el producto específico de alimentos frescos, las huellas de carbono de origen, transbordo, centros de distribución, minoristas y eliminación de residuos están incluidas en la huella de carbono del sistema logístico de cadena de frío construido en este estudio (Hu et al., 2021).

A partir del cálculo de la simulación y los resultados del análisis del modelo de huella de carbono de la logística de la cadena de frío, se puede ver que, en comparación con otros eslabones de la logística de la cadena de frío, el eslabón de transporte refrigerado es el principal emisor de carbono de este canal de circulación. Sin considerar los cambios de otros factores externos inciertos, la velocidad de los camiones frigoríficos tiene un impacto clave en la huella de carbono.

La sociedad de consumo actual hace posible tener un objeto producido en países a miles de kilómetros en cuestión de días e incluso horas. La necesidad de consumo conlleva, por su parte, una gran producción continua que está en constante adaptación y búsqueda del cliente. La educación ambiental debe incentivar la consciencia de la sociedad sobre el impacto de nuestras actividades o de los productos que consumimos. La Huella de Carbono se presenta, en este sentido, para facilitar el concepto que se generaliza comúnmente como la “contaminación” que produce una organización o un producto en particular (García Castillo, 2022). Este autor evaluó las emisiones de alcance 3 de organizaciones industriales de España aportando el alcance 3 en nuestro

informe conseguimos contextualizar la organización en su medio, ya que nos dará una idea de sus proveedores y de su responsabilidad ambiental.

La tabla 13 muestra un resumen consolidado de los principales sectores y enfoques encontrados en la literatura gris.

Tabla 13

Consolidación por enfoque y sector de aplicación en la literatura gris.

Sector de aplicación	Enfoque	Descripción	Eslabones involucrados	Autores
Industria química	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14064-1 Huella de carbono de la organización (<i>Corporate Carbon Footprint</i>)	Organización	Carrillo (2019)
Sector educativo	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	ISO 14064, 14040/43. Enfoque de ciclo de vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)	Organización	Aristizábal-Alzate (2021)
Sector logístico	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	ISO 14064-1 Huella de carbono de la organización (<i>Corporate Carbon Footprint</i>)	Organización	Torres-Rojas (2023)
Sector textil	De la cuna a la puerta (<i>Cradle to gate</i>)	GHG Protocol - Factores de conversión para los informes de las empresas (<i>Conversion Factors for Company Reporting</i>)	Organización, Operaciones de distribución	Dubisz & Golinska-Dawson (2021)
Sector alimentario	De la cuna a la tumba (<i>Cradle to grave</i>)	Método híbrido: ECV-Análisis de entradas y salidas	Operaciones de producción, procesamiento, transporte, distribución, disposición final.	Hu et al., (2021)

5.3 Análisis y consolidación

A continuación, se empiezan a desarrollar conceptos estructurantes que permitirán consolidar la información obtenida entre la literatura gris y la científica es importante incidir esta estructuración de conceptos para centrar la revisión.

La cadena de suministro es un proceso esencial en la gestión de la empresa que incluye la adquisición y producción de bienes y servicios, su eficiencia es clave para el éxito de una organización, puesto que reducir los costos, mejorar la calidad y satisfacer las demandas de los clientes (Olatunji et al., 2019). “Las empresas que gestionan cadenas de suministro tienen la responsabilidad de reducir la huella de carbono de sus operaciones para ayudar a mitigar los efectos del cambio climático” (Matuščík & Kočí, 2021). Esto puede lograrse a través de la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles en las fases que conforman la cadena de suministro, desde la obtención de materias primas hasta la entrega del producto final al cliente.

Una organización puede reducir su huella de carbono al utilizar materiales y procesos de producción más sostenibles, como la energía renovable, la optimización del transporte y la logística, la gestión de residuos y la conservación de recursos. También puede colaborar con sus proveedores para adoptar prácticas más sostenibles y establecer metas de reducción de emisiones de GEI en toda la cadena de suministro (Gutiérrez Gómez & García Rendón, 2019).

A lo largo de cualquier cadena de suministro se pueden definir distintas huellas de carbono así como se muestra en la figura 13 a continuación; si se tienen en cuenta la producción y distribución de las materias primas es posible determinar la huella de carbono de la cadena de proveedores, también se puede terminar la huella de carbono únicamente de una organización en específico o se puede estimar la huella de carbono de un producto teniendo en cuenta el sistema

completo desde la obtención de materias primas, pasando por las actividades principales de la organización y teniendo en cuenta también la distribución , el consumo, uso, reutilización o disposición final de un producto.

Figura 13

Enfoques para la estimación de la huella de Carbono



Nota: Adaptado de <https://eco-circular.com/2021/01/29/la-neutralidad-de-carbono-factor-determinante-para-la-recuperacion-y-competitividad-de-las-pymes/>

Una perspectiva general para clasificar las metodologías de estimación es según el enfoque que puede estar basado en la organización o en un producto o servicio específico. En la figura 14 se muestran las principales metodologías para estos enfoques.

Nota: elaboración propia.

En la tabla 14 se observan las características de las principales metodologías incluyendo sus elementos, las variables medidas, los actores involucrados en el cálculo y los principales sectores y autores donde se han aplicado.

Tabla 14

Consolidación de metodologías huella C

Metodología	Sector de aplicación	Alcance	Principales hallazgos	Autor
<i>Evaluación del ciclo de vida (ECV)</i>	Alimentos Energía Manufactura	Alcance 1, 2 y 3	Considera todas las etapas, incluida la producción de materiales, la fabricación, el uso y el final de la vida útil, y se usa para calcular la huella de carbono. Las etapas de uso y disposición final son las que presentan mayor incertidumbre	Almeida et al (2023); Dai et al (2020); Li et al (2021); Xue et al (2019); Mohammed et al (2023); Martelli et al., (2023); Belkhir & Elmeligi, (2018); Álvarez (2018); Dixit et al (2023); Al Sholi et al (2023); Moazzem et al., (2018); Karlsson et al., (2021); Moreno et al (2022).
<i>Norma ISO 14040 y 14044 Marco metodológico ECV en productos y servicios</i>				
<i>Norma ISO 14064- Inventarios GEI organización, proyecto</i>	Multi sectorial	Alcance 1 y 2 Organización o proyecto.	El análisis, a nivel de empresa, abarcó el ciclo de vida completo del producto, es decir, desde la cuna hasta la tumba. Todos los impactos se calcularon también de forma agregada, y se crearon subcategorías tal y como recomienda la norma ISO 14046 para una mejor visualización y comparación.	de Albuquerque Landi et al., (2023); Carrillo (2019); Aristizábal-Alzate & González-Manosalva (2021); Torres Rojas, (2023).

<i>Norma ISO 14067 Huella de carbono de los productos</i>	Manufactura	Cadena de suministro	Modela una evaluación de la huella de carbono basada en datos primarios que mejora con modelos metalúrgicos recuperados de la literatura por los autores.	Suer et al., (2021); Munasinghe et al., (2021)
<i>Modelos híbridos</i>	Sector energético, manufactura	Cadena de suministro	Este enfoque puede abordar desde otra perspectiva la complejidad de las cadenas de suministro ya que combina dos o más metodologías.	García-Alaminos et al., (2022); Al-Yafei et al.2021; Aseel et al., 2021; Ichisugi et al., 2019; Crow et al., 2019; Yang et al., 2023
<i>GHG Protocol - Product life cycle accounting and reporting standard</i>	Sector energético	Cadena de suministro	Brinda requisitos y orientaciones para las organizaciones cuantifiquen un inventario de emisiones de GEI asociadas a un producto específico. Se pueden tomar decisiones informadas para reducir las emisiones de GEI de los productos que diseñan, fabrican, venden, compran o utilizan.	Céspedes et al. (2022)

Existen también herramientas para que sectores específicos calculen su huella de carbono, en la muestra se encontro un ejemplo aplicado al sector agrícola. Los autores Broeze et al., (2023) presentan una herramienta orientada a consolidar un análisis con un esfuerzo mínimo: la calculadora ACE (Agro-Chain greenhouse gases Emissions Calculaator). Esta calculadora ayuda a identificar los puntos críticos de emisión de GEI en la cadena de valor. Además, permite comparar las emisiones de GEI de distintos escenarios de cadena alimentaria. Esta calculadora combina métricas para estimar los impactos climáticos a lo largo de una cadena alimentaria con datos secundarios, lo que facilita una evaluación rápida ya que describe todas las actividades con insumos y pérdidas a lo largo de la cadena de suministro, partiendo de la explotación agrícola y la

intensidad de GEI del cultivo y terminando en el punto de venta para el cual se calcula la huella de carbono del producto.

En el sector de los alimentos se ha demostrado que no sólo la producción agrícola, sino también los procesos de la cadena postcosecha añaden importantes emisiones de GEI al suministro de alimentos, también está demostrado que las intervenciones para reducir los desperdicios pueden añadir emisiones adicionales sustanciales (Broeze et al., 2023). Los autores recomiendan analizar las compensaciones con las emisiones de GEI antes de llevar a cabo intervenciones para reducir los residuos.

5.3.1 Contexto nacional

En Colombia, las emisiones de CO₂ en las cadenas de suministro son un problema importante debido a la alta dependencia del país en la industria del petróleo y la minería, así como en el sector agropecuario y la industria manufacturera. Estas industrias tienen una gran demanda de transporte y logística, lo que genera una cantidad significativa de emisiones de dióxido de carbono. (Guzman & Chávez, 2022)

Además, en Colombia existe una infraestructura de transporte limitada y poco desarrollada, lo que resulta en mayores costos y emisiones asociadas al transporte y la logística. La falta de inversión en una infraestructura de transporte eficiente y sostenible también ha llevado a un aumento en las emisiones de dióxido de carbono en las cadenas de suministro. Según Rodríguez et al. (2020), en su revisión se identifica que existen diferencias en las metodologías utilizadas, ya que algunos factores de emisión no consideran específicos relacionados con el entorno nacional, lo que puede aumentar la incertidumbre, como la composición fisicoquímica de los combustibles.

5.3.2 Marco regulatorio Colombia

En Colombia, el marco regulador de las emisiones de CO₂ lo rige el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. El país se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a través de diversos acuerdos internacionales y políticas nacionales.

5.3.2.1 Políticas y acuerdos nacionales

Colombia es firmante del Acuerdo de París, cuyo objetivo es limitar el aumento de la temperatura global muy por debajo de los 2 grados centígrados. El país también ha desarrollado sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones y adaptarse al cambio climático.

5.3.2.2 Organismos reguladores

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible supervisa las políticas y normativas medioambientales relacionadas con las emisiones de CO₂. Además, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) es responsable de la concesión de licencias ambientales y de la regulación de las actividades que pueden afectar a las emisiones de CO₂.

5.3.2.3 Legislación

Colombia ha promulgado leyes como la Política Nacional Ambiental, que incluye medidas para compensar el cambio climático y reducir las emisiones de GEI. El país también cuenta con normativas específicas para sectores como el transporte, la energía y la industria para controlar y vigilar las emisiones de CO₂.

5.3.2.4 Aplicación y cumplimiento

El marco normativo incluye mecanismos de seguimiento, notificación y verificación de las emisiones. Las empresas e industrias están obligadas a cumplir las normas sobre emisiones y a informar sobre su huella de carbono. En general, el marco normativo de Colombia para las

emisiones de CO₂ refleja su compromiso de hacerle frente a el cambio climático y promover el desarrollo sostenible.

Figura 14

Resumen de la normatividad en Colombia sobre emisiones de GEI



Nota: Elaboración propia, información recuperada de <https://colombia.justia.com/nacionales/>

Otro factor importante para considerar es el contexto social, ya que es fundamental que las empresas y los consumidores adopten prácticas sostenibles y reduzcan su impacto ambiental. A pesar de algunos esfuerzos para mejorar la sostenibilidad en la cadena de suministro, como la implementación de prácticas de producción más limpias y el uso de tecnologías de transporte más eficientes, todavía hay mucho por hacer en términos de descarbonización de las cadenas de suministro en Colombia. Sin embargo, en el país se está empezando a observar un marco regulatorio que promueve mecanismos más eficientes para abordar el desafío de la descarbonización (Gutiérrez Gómez & García Rendón, 2019).

5.4 Propuesta metodológica para la estimación de la huella de Carbono.

La elección de una metodología de estimación de la huella de carbono contempla una serie de pasos y consideraciones clave. La metodología debe implicar la identificación de los límites organizativos y operativos, el cálculo de las emisiones directas e indirectas de GEI y la utilización de metodologías normalizadas y aceptadas.

Tabla 15

Propuesta metodológica según el nivel de análisis

	Metodología	Elementos	Actores
Producto	Norma ISO 14067	ECV, Unidad funcional, establecimiento de límites, categorías de GEI, Requisitos de calidad de los datos, procedimientos de asignación, criterios de corte, metodología de cálculo, comunicación e informes.	Empresas, organizaciones y clientes.
	GHG Protocol Product Lifecycle Accounting and Reporting Standard	Límites y alcances, etapas del ciclo de vida, unidad funcional, asignación de emisiones, requisitos de calidad, informe y comunicación, integración con inventarios corporativos, aplicabilidad mundial.	WRI, Agencias gubernamentales y regulatorias, clientes, socios.
Organización	Norma ISO 14064	Especificaciones y directrices a nivel de organización (14064-1) y a nivel de proyectos (14064-2), validación y verificación (14064-3)	Organización, organismo de verificación, partes interesadas
	GHG Protocol Corporate Standard	Límites organizacionales, límites operacionales, fuentes de emisión, potenciales de calentamiento global, factores de emisión, año base y series temporales, calidad y exactitud de los datos, límites para el alcance 3, métricas de intensidad, informes y verificación, alcance financiero, norma de la cadena de valor corporativa (alcance 3).	Organización

Cadena de suministro	Evaluación de ciclo de vida - Modelos híbridos	Combina elementos de dos o más metodologías. Enfoque de ciclo de vida, análisis de inventarios de emisiones, datos empresariales y operacionales, inclusión de factores de emisión específicos, consideración del alcance 3, normalización, ponderación, tecnologías, prácticas innovadoras, adaptación a contextos sectoriales.	Proveedores Productores Consumidores, Comunidad científica, Agentes gubernamentales
-----------------------------	--	--	--

Se propone que la elección de una metodología sea en base al alcance de la medición para que las organizaciones puedan dar el primer paso en el cálculo de sus emisiones a través del método menos complejo en su implementación que permita alinearse al objetivo específico y que identifique las mayores fuentes de emisión y las posibles oportunidades de mejora y optimización de los procesos. Medir y gestionar la huella de carbono es un paso crucial para las pequeñas y medianas empresas que quieren reducir su impacto ambiental. La figura 16 consolida algunos de los aspectos más importantes a considerar en la toma de decisiones alrededor de la gestión de la huella de carbono.

Figura 15

Factores para la toma de decisiones

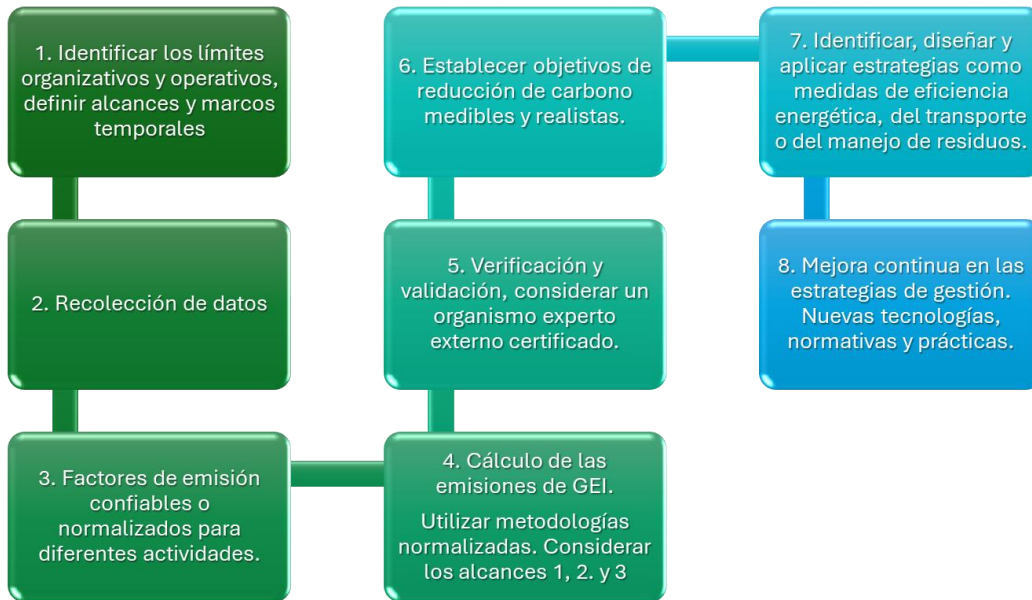
Alcance de las emisiones	<ul style="list-style-type: none">▪ El enfoque suele estar en medir y notificar las emisiones directas (Alcance 1) e indirectas (Alcance 2) de sus propias operaciones antes de abordar las emisiones de la cadena de valor (Alcance 3). Esto ayuda a establecer una línea de base para sus emisiones e identificar áreas de mejora.
Metodologías específicas del sector	<ul style="list-style-type: none">▪ Algunas industrias pueden tener metodologías o directrices especializadas para medir las emisiones, que las empresas pueden adoptar para garantizar la precisión y la coherencia.
Requisitos de información	<ul style="list-style-type: none">▪ Las empresas pueden elegir una metodología basada en los requisitos de notificación de sus partes interesadas, como inversores, clientes u organismos reguladores.
Metas y objetivos	<ul style="list-style-type: none">▪ Las empresas pueden elegir una metodología que se alinee con sus metas y objetivos, como la reducción de emisiones o la consecución de objetivos de sostenibilidad.
Presupuesto y recursos	<ul style="list-style-type: none">• La disponibilidad de presupuesto y recursos puede influir en la elección de la metodología, ya que algunos métodos pueden requerir software especializado, experiencia u otros recursos.
Precisión y fiabilidad	<ul style="list-style-type: none">• Priorizar metodologías que ofrecen un alto nivel de precisión y fiabilidad en la estimación de las emisiones, como la metodología híbrida, que combina diferentes enfoques para lograr una evaluación más completa.
Facilidad de aplicación	<ul style="list-style-type: none">• Elegir una metodología cuya aplicación sea alcanzable e integrable en los sistemas y procesos existentes.

Nota: elaboración propia.

5.4.1 Hoja de ruta para la estimación de la huella de carbono en cadenas de suministro.

Figura 16

Hoja de ruta para la medición de la huella de carbono

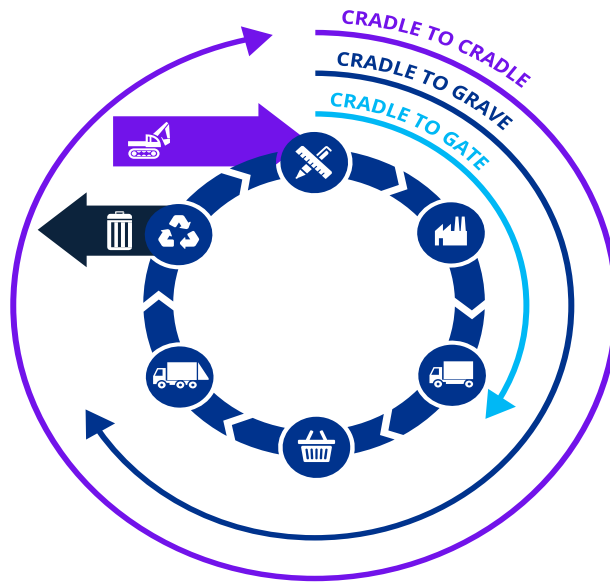


5.4.1.1 Identificar los límites organizativos y operativos.

El primer paso es definir cuáles serán los alcances, los límites del sistema y los marcos temporales sobre los cuales se hará la evaluación. Según las necesidades y objetivos fijados, se pueden tomar los diferentes enfoques para la medición de la huella de carbono en la cadena de suministro como lo muestra la figura 17 mostrada a continuación.

Figura 17

Representación gráfica enfoques Cradle-to-cradle, Cradle-to-grave y Cradle-to-gate



Nota: tomado de <https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2023/10/life-cycle-assessment-guide.html>

- *Enfoque “De la cuna a la puerta” (Cradle-to-gate):* incluye las fases de obtención de materias primas, transporte, transformación, embalaje y distribución. Excluye las etapas de uso y disposición final.
- *Enfoque “De la cuna a la tumba” (Cradle-to-grave):* incluye los procesos de obtención de materias primas, transporte, transformación, embalaje, distribución, uso y disposición final.
- *Enfoque “De la cuna a la cuna” (Cradle to Cradle):* se basa en los productos diseñados desde el principio para ser seguros tanto para las personas como para el medio ambiente, y que al final de su vida útil, pueden ser completamente reciclados o convertidos en nutrientes seguros para la tierra.

La norma ISO 14046 define los alcances de las emisiones de GEI, así como se muestra en la tabla 16. Estos alcances son el punto de partida para definir y clasificar las actividades a incluir dentro de la evaluación.

Tabla 16

Alcances de las emisiones de GEI según normativa ISO 14064

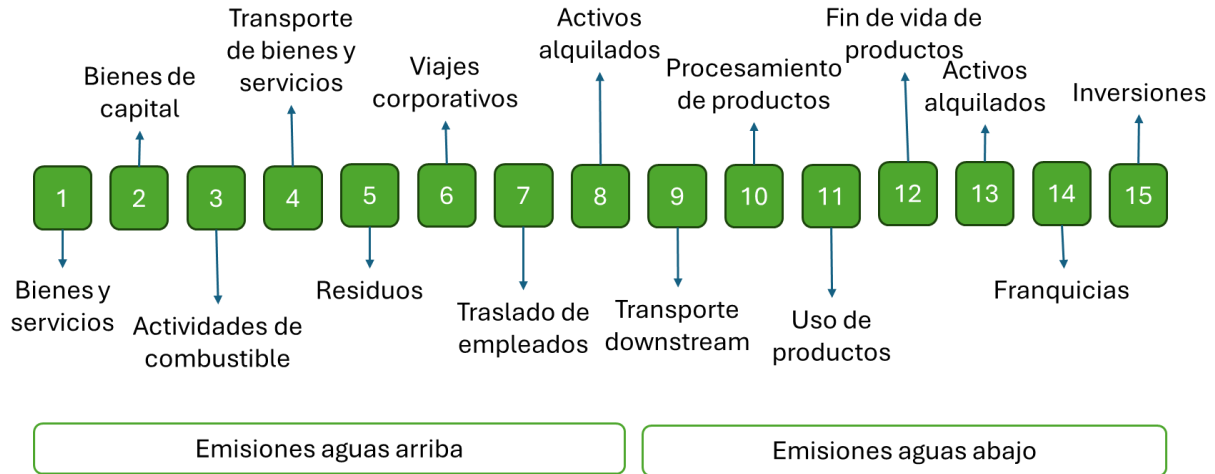
Alcance	Definición
<i>Alcance 1.</i> Emisiones directas de GEI.	Son aquellas que provienen de las fuentes que son parte de la organización.
<i>Alcance 2.</i> Emisiones indirectas de GEI por energía.	Son aquellas que provienen de la generación de electricidad o son de origen externo, pero son consumidos por la organización.
<i>Alcance 3.</i> Otras emisiones indirectas de GEI.	Son aquellas que son diferentes a las emisiones indirectas de GEI, son consecuencias de las actividades de la organización pero que se originan en fuentes pertenecientes a otra organización.

Nota: adaptado de (ISO 14064-1, 2015)

El Protocolo de GEI a su vez subdivide las emisiones de Alcance 3 en 15 categorías como se muestra en la figura 19. Algunas de ellas pueden atribuirse a fases anteriores, como la adquisición de bienes y servicios de la cadena de suministro, mientras que otras se producen en fases posteriores, como las emisiones causadas por el uso de los productos vendidos.

Figura 18

Categorías de emisiones de Alcance 3 según el GHG Protocol



Nota: adaptado de GHG Protocol (2021)

Las categorías 11 y 12 presentan un reto particular, a saber, el uso y la eliminación de los productos fabricados por la empresa que deben contabilizarse. Mientras que las demás categorías incluyen en su mayoría emisiones producidas "ex post", estas emisiones se producen en un futuro próximo o más lejano, dependiendo del producto y dependen de las pautas de uso de los clientes, que sólo pueden estimarse de forma aproximada.

No todas estas categorías son siempre apropiadas; depende del contexto y objetivo del análisis. Por ejemplo, se plantea la cuestión de si los desplazamientos de los empleados al trabajo deben imputarse realmente a la empresa (categoría 7). Las categorías 10 a 12 también pueden ser contabilizadas por clientes posteriores, lo que puede dar lugar a una doble contabilización si varias empresas de una cadena de suministro establecen progresivamente una huella de carbono para sus productos o servicios. Por lo tanto, estas categorías tampoco son adecuadas para una mayor

agregación de las emisiones a las emisiones totales de la cadena de suministro, y deben elegirse con cuidado (GHG Protocol, 2021)

5.4.1.2 Recolección de datos.

El cálculo de las emisiones de GEI incluye los datos de las emisiones directas de diversas fuentes, como vertederos, vehículos de flota y electricidad adquirida, así como las emisiones indirectas de bienes y servicios adquiridos, viajes de negocios y otras actividades. Es ideal utilizar datos primarios, sin embargo, también es posible usar datos secundarios como datos públicos disponibles en informes gubernamentales, estadísticas de emisiones de la industria, etc. Cuando sea posible, se puede utilizar la automatización y la tecnología para facilitar la recolección y tratamiento de datos. Esto puede incluir el uso de sistemas de monitoreo remoto, sensores inteligentes, software de gestión de energía, entre otros, para recopilar datos de manera eficiente y en tiempo real. Existen varias herramientas de software diseñadas específicamente para la gestión de la huella de carbono. Estas herramientas pueden ayudar en la recopilación, el almacenamiento, el análisis y la presentación de datos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por ejemplo, autores como Lee et al. (2021) emplearon la herramienta SIMAPRO (Sistema Integral de Medición y Avance de la Productividad), que se basa en el establecimiento de diálogos sistemáticos en todos los niveles de la empresa y puede ayudar a las organizaciones a mejorar la productividad de sus colaboradores, partiendo del estudio de indicadores clave que influyen en el rendimiento. Este sistema permite modelar y analizar ciclos de vida complejos de una manera sistemática y transparente. También permite identificar los puntos claves en cada eslabón de su proceso productivo, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, distribución, uso y disposición final.

Otra herramienta relevante empleada por autores como Al Sholi et al. (2023) es la base de datos Ecoinvent, la cual contiene más de 20.000 conjuntos de datos confiables de inventarios del ciclo de vida, que cubren una variedad de sectores.

5.4.1.3 Determinación de los factores de emisión.

Estos factores son los coeficientes que convierten las unidades físicas de actividad (como kilómetros recorridos en un automóvil, consumo de electricidad en kilovatios-hora, etc.) en emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante consultar fuentes confiables para obtener factores de emisión precisos y actualizados, esto puede incluir organizaciones gubernamentales, agencias medioambientales, instituciones académicas, y organizaciones internacionales dedicadas al estudio del cambio climático.

Al seleccionar los factores de emisión hay que tener en cuenta el método por el cual fueron desarrollados, algunos están basados en promedios mientras que otros pueden ser específicos según el sector, la tecnología o las prácticas industriales; esto puede influir en la precisión y comparabilidad de los resultados. También es importante la actualización de estos factores ya que pueden cambiar en el tiempo con los avances de investigación.

El GHG Protocol (2021) incluye factores de emisión estándar para diversas actividades y fuentes. Su base de datos de factores de emisión es ampliamente reconocida y utilizada en todo el mundo. Del mismo modo el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) publica informes periódicos que contienen factores de emisión estándar para diferentes tipos de actividades y fuentes de emisión que también son ampliamente aceptadas. Algunos países tienen agencias gubernamentales encargadas de recopilar datos sobre emisiones de GEI y proporcionar orientación sobre factores de emisión. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA).

5.4.1.4 Cálculo de las emisiones de GEI.

Primero se deben identificar las actividades específicas a evaluar. Entre estas podría ser por ejemplo el consumo de electricidad en un edificio, el combustible utilizado en un vehículo, las emisiones asociadas con la producción de un producto, etc. Luego, se debe medir la cantidad de actividad realizada durante el período de tiempo determinado. Por ejemplo, la cantidad de electricidad consumida en kilovatios-hora (kWh), la cantidad de combustible consumida en litros, la cantidad de productos fabricados en unidades, etc. La fórmula básica es:

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Cantidad de actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

Por ejemplo, si estás calculando las emisiones de CO₂ asociadas con el consumo de electricidad y la cantidad de electricidad consumida es de 1,000 kWh, y el factor de emisión de la electricidad es de 0.5 kg CO₂e/kWh, entonces las emisiones de CO₂ serían:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 1,000 \text{ kWh} \times 0.5 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 500 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

La fórmula básica para calcular la huella de carbono es un generalizado, no tiene un autor específico, ya que es un principio general utilizado en diversas disciplinas para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, esta fórmula se deriva de metodologías estándar desarrolladas por organizaciones como el Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol, 2021) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014).

5.4.1.5 Verificación y validación.

Considerar a los organismos externos certificados de verificación y validación de las emisiones. Realizar auditorías internas periódicas y revisiones del desempeño ambiental puede ayudar a identificar áreas donde se pueden realizar mejoras adicionales en la gestión de la huella de carbono. Muchas herramientas de gestión de la huella de carbono incluyen funcionalidades de

verificación interna que ayudan a detectar posibles errores o inconsistencias en los cálculos. Estas herramientas pueden realizar comprobaciones automáticas de datos y proporcionar alertas cuando se detectan discrepancias.

Por ejemplo, el estándar ISO 14064-3 (2019) contiene la especificación con orientación para la verificación y validación de las declaraciones de GEI. El estándar ISO 14065 (2020) contiene los requisitos para los organismos de validación y verificación y el estándar ISO 14066 (2023) contiene los requisitos de competencia para los equipos que validan y verifican la información medioambiental.

5.4.1.6 Metas de reducción.

Establecer metas medibles y alcanzables. Identificar, diseñar y aplicar estrategias como medidas de eficiencia energética, del transporte o del manejo de residuos. Evaluar el compromiso de la organización y su cadena, considerar elegir proveedores con prácticas de sostenibilidad sólidas.

5.4.1.7 Mejora continua en las estrategias de gestión.

Es importante estar atento a nuevas tecnologías, normativas y prácticas. Existen diversas plataformas de software diseñadas específicamente para ayudar a las organizaciones a medir, monitorear y gestionar su huella de carbono. Estas herramientas pueden automatizar el proceso de recopilación de datos, realizar cálculos precisos de emisiones y generar informes detallados para la toma de decisiones informadas. Considerar la implementación de un sistema de información para manejar datos primarios y supervisar, revisar y ajustar los objetivos de reducción de carbono.

También puede resultar valioso comparar el desempeño ambiental y las prácticas de gestión de la huella de carbono con otras organizaciones similares en la industria para identificar información valiosa sobre oportunidades de mejora. Las asociaciones industriales, las iniciativas

de sostenibilidad y las redes de intercambio de mejores prácticas son recursos útiles para el benchmarking.

6. Conclusiones

La revisión exhaustiva de la literatura científica y gris ha permitido comprender en detalle los enfoques y métodos más utilizados en la medición de la huella de carbono en cadenas de suministro en los últimos años. Con la consolidación de la información obtenida, se logró una visión completa de las prácticas actuales en este campo y los sectores donde han sido aplicadas. La comprensión detallada de los enfoques y métodos utilizados es fundamental para cualquier organización interesada en tomar decisiones alrededor de sus emisiones y estrategias de optimización de recursos, reducción y/o mitigación de emisiones.

La estimación de la huella de carbono en las cadenas de suministro es una herramienta fundamental para evaluar y abordar el impacto ambiental de las actividades comerciales y productivas. La revisión de la literatura científica ha permitido identificar las principales metodologías utilizadas en estudios de estimación y medición de la huella de carbono junto con sus principales limitaciones, lo cual a su vez aumenta la investigación desde diversas perspectivas para el perfeccionamiento de las metodologías existentes y la consideración de los factores de emisión. Los sistemas de información y la innovación tecnológica son indispensables para la trazabilidad de los procesos y la recopilación de datos veraces.

A través de la investigación y la revisión de la literatura gris, se ha recopilado información valiosa sobre la importancia de medir correctamente las emisiones de gases de efecto invernadero considerando todos los actores de las cadenas de suministro. Se observó que comúnmente la extensión y la accesibilidad de las metodologías puede representar un obstáculo especialmente para las organizaciones pequeñas y medianas.

La consolidación de la información ha brindado una visión completa de las prácticas actuales en este campo, sin embargo, uno de los mayores retos presentes en el desarrollo e

implementación de cualquier metodología es la falta de trazabilidad en los procesos, el nivel de confiabilidad de los datos y la categorización los factores de emisión.

Como resultado de esta investigación, se ha hecho un artículo científico que documenta los hallazgos y la metodología propuesta. Este artículo contribuirá al avance del conocimiento en el área de la huella de carbono en cadenas de suministro y proporcionará una guía útil para aquellos que buscan medir y reducir su impacto ambiental en este contexto. En resumen, este proyecto ha arrojado luz sobre la importancia de medir y reducir la huella de carbono en las cadenas de suministro para que, en el corto, mediano y largo plazo se tomen decisiones que acerquen cada vez más a las organizaciones y territorios a los objetivos de sostenibilidad y neutralidad de carbono. Se ha proporcionado una base sólida para futuras investigaciones y acciones de la sostenibilidad ambiental.

Los estudios empíricos sobre las calculadoras de la huella de carbono han mostrado limitaciones en cuanto al número limitado y el impacto en el cambio de los patrones de consumo. La complejidad del cálculo de la huella de carbono, cuando se consideran diferentes alcances (emisiones de Alcance 1, Alcance 2 y Alcance 3), puede plantear retos al captar todas las emisiones directas e indirectas. Recopilación de datos y garantía de calidad: La dependencia de los datos operativos de la empresa para calcular las emisiones requiere una sólida recopilación de datos y procesos internos de garantía de calidad para garantizar la precisión y la fiabilidad. La necesidad de seguir metodologías estandarizadas y aceptadas para calcular las emisiones de GEI puede ser una limitación, ya que diferentes metodologías pueden arrojar resultados variables y problemas de comparabilidad. Algunas metodologías requieren un alto nivel de granularidad y especificidad en la recopilación de datos, lo que puede requerir muchos recursos y ser difícil de implementar para ciertas organizaciones.

La normalización de la huella de carbono según los ingresos o el valor invertido puede introducir complejidades en la interpretación y la comparabilidad, ya que distintos métodos pueden llevar a conclusiones diferentes. Muchas empresas se enfrentan a retos debidos a la falta de datos fiables, lo que dificulta la medición precisa de las emisiones de carbono. Esto incluye la necesidad de acceder a datos internos, así como la dependencia de datos secundarios para completar los cálculos de carbono.

Las emisiones de alcance 3, que representan una parte significativa de las emisiones de una empresa y se extienden a lo largo de su cadena de valor, plantean retos a la hora de medir con precisión y realizar un seguimiento exhaustivo de estas emisiones. Esta complejidad surge de la larga cola de emisiones más allá de los proveedores primarios y de la necesidad de utilizar medias del sector, aproximaciones y otras fuentes para calcular las emisiones. Algunas actividades o fuentes pueden ser difíciles de medir, lo que añade complejidad a la medición precisa de la huella de carbono. Por ejemplo, tener en cuenta el cambio en el uso del suelo para productos agrícolas puede ser un reto específico.

El cálculo de las emisiones de Alcance 3 requiere personal, recursos, experiencia y procesos eficientes de gestión de datos, que pueden ser difíciles de alinear en toda la cadena de suministro de una empresa. Esta complejidad hace que el proceso de medición requiera muchos recursos.

Los retos y limitaciones para medir con precisión la huella de carbono se derivan de cuestiones relacionadas con la disponibilidad de datos, la complejidad en la medición de emisiones específicas y la naturaleza intensiva en recursos del proceso de medición. Para superar estos retos es necesario recopilar datos sólidos, aplicar metodologías estandarizadas y comprender en profundidad las emisiones de la cadena de valor de la organización.

7. Recomendaciones

La elección de metodologías reconocidas a nivel internacional, como las del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) o los estándares ISO, es fundamental para estimar la huella de carbono en las cadenas de suministro. Estas metodologías establecen directrices de calidad y precisión, y también proporcionan un marco común que facilita la comparación y el intercambio de información entre diferentes organizaciones y sectores.

Es importante incluir todas las etapas de la cadena de suministro en el análisis para obtener resultados precisos ya que ignorar alguna de estas etapas podría llevar a una subestimación significativa de las emisiones totales. Por ejemplo, no tener en cuenta las emisiones indirectas relacionadas con el transporte o el almacenamiento puede llevar a decisiones erróneas en la implementación de estrategias de reducción de carbono. Es necesario tener una visión integral y completa de cómo cada etapa contribuye a la huella de carbono total.

La precisión de los datos utilizados es fundamental en la estimación de la huella de carbono. Sin datos precisos, los cálculos serán inexactos y no tendrán valor. Por lo tanto, es esencial invertir tiempo y recursos en recopilar información precisa sobre emisiones, consumo de energía y otras actividades relevantes en cada etapa de la cadena de suministro. Esta información respalda una estimación confiable y también proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas efectivas de reducción de emisiones.

Estas recomendaciones no solo buscan asegurar una estimación precisa de la huella de carbono, sino también promover una mayor conciencia ambiental y prácticas empresariales más sostenibles. Al adoptar un enfoque riguroso y completo para medir y reducir las emisiones de carbono en las cadenas de suministro, las organizaciones pueden contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y demostrar su compromiso con la sostenibilidad ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Adrados Pérez, M. (2021). *La Economía Circular en la Cadena de Suministro*. Universidad de Zaragoza.
- Al Sholi, H. Y., Wakjira, T., Kutty, A. A., Habib, S., Alfadhli, M., Aejas, B., Kucukvar, M., Onat, N. C., & Kim, D. (2023). How circular economy can reduce scope 3 carbon footprints: Lessons learned from FIFA world cup Qatar 2022. *Circular Economy*, 2(1), 100026. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100026>
- Almeida, C., Ceballos-Santos, S., Laso, J., Margallo, M., Aldaco, R., & Marques, A. (2023). Contribution of glass jar packaging to the environmental assessment of canned seafood products: Albacore tuna (*Thunnus alalunga*) and Atlantic chub mackerel (*Scomber colias*) as case studies. *Journal of Cleaner Production*, 420(April). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138366>
- Almerco Armas, L. A. (2022). *Gestión sostenible de la cadena de suministros: Revisión sistemática de literatura*. [Universidad César Vallejo]. <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2595/7/2020JoseJavierRodriguezAscanio.pdf>
- Alvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., Davis, K. J., Herndon, S. C., Jacob, D. J., Karion, A., Kort, E. A., Lamb, B. K., Lauvaux, T., Maasakkers, J. D., Marchese, A. J., Omara, M., Pacala, S. W., Peischl, J., Robinson, A. L., ... Hamburg, S. P. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398), 186–188. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>

- Al-Yafei, H., AlNouss, A., Aseel, S., Kucukvar, M., Onat, N. C., & Al-Ansari, T. (2022). How sustainable is liquefied natural gas supply chain? An integrated life cycle sustainability assessment model. *Energy Conversion and Management: X*, 15(April), 100246. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100246>
- Al-Yafei, H., Kucukvar, M., Alnouss, A., Aseel, S., & Onat, N. C. (2021). A novel hybrid life cycle assessment approach to air emissions and human health impacts of liquefied natural gas supply chain. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196278>
- Aristizábal-Alzate, C. E., & González-Manosalva, J. L. (2021). Application of NTC-ISO 14064 standard to calculate the Greenhouse Gas emissions and Carbon Footprint of ITM's Robledo campus. *DYNA (Colombia)*, 88(218), 88–94. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n218.88989>
- Aseel, S., Al-Yafei, H., Kucukvar, M., Onat, N. C., Turkay, M., Kazancoglu, Y., Al-Sulaiti, A., & Al-Hajri, A. (2021). A model for estimating the carbon footprint of maritime transportation of Liquefied Natural Gas under uncertainty. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1602–1613. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.002>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.239>
- Błażejowski, T., Walker, S. R., Muazu, R. I., & Rothman, R. H. (2021). Reimagining the milk supply chain: Reusable vessels for bulk delivery. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1030–1046. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.030>
- Bodendorf, F., Dimitrov, G., & Franke, J. (2022). Analyzing and evaluating supplier carbon footprints in supply networks. *Journal of Cleaner Production*, 372(July). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133601>

- Broeze, J., Guo, X., & Axmann, H. (2023). Trade-Off Analyses of Food Loss and Waste Reduction and Greenhouse Gas Emissions in Food Supply Chains. *Sustainability (Switzerland)*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118531>
- Cabernard, L., Pfister, S., & Hellweg, S. (2022). Improved sustainability assessment of the G20's supply chains of materials, fuels, and food. *Environmental Research Letters*, 17(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac52c7>
- Carrillo, D. (2019). *Determinación de la Huella de Carbono Bajo los Estándares de la Norma ISO 14064 en el Laboratorio Químico Ambiental "LABSU."* 1–111.
- Céspedes, S., Cano, N. A., Foo, G., Jaramillo, D., Martinez, D., Gutiérrez, M., Pataquiba, J., Rojas, J., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2022). Technical and Environmental Feasibility Study of the Co-Production of Crude Oil and Electrical Energy from Geothermal Resources: First Field Trial in Colombia. *Processes*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/pr10030568>
- Chordia, M., Nordelöf, A., & Ellingsen, L. A. W. (2021). Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10), 2024–2039. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01976-0>
- Crow, D. J. G., Balcombe, P., Brandon, N., & Hawkes, A. D. (2019). Assessing the impact of future greenhouse gas emissions from natural gas production. *Science of the Total Environment*, 668, 1242–1258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.048>
- Dai, T., Yang, Y., Lee, R., Fleischer, A. S., & Wemhoff, A. P. (2020). Life cycle environmental impacts of food away from home and mitigation strategies—a review. *Journal of Environmental Management*, 265(February), 110471. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110471>

- de Albuquerque Landi, F. F., Fabiani, C., Pioppi, B., & Pisello, A. L. (2023). Sustainable management in the slow fashion industry: carbon footprint of an Italian brand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(10), 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02205-6>
- Dixit, Y., El-Houjeiri, H. M., Monfort, J.-C., Jing, L., Zhang, Y., Littlefield, J., Falter, C., Badahdah, A., Bergerson, J. A., & Barrett, S. (2023). Carbon intensity of global crude oil trading and market policy implications. *Nature Communications*, 14(October 2021), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41701-z>
- Du, Q., & Zhou, J. (2022). Evolution of Low Carbon Supply Chain Research: A Systematic Bibliometric Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph192315541>
- Dubisz, D., & Golinska-Dawson, P. (2021). Carbon Footprint Management within a Supply Chain – A Case Study. *European Research Studies Journal*, XXIV(Issue 2B), 860–870. <https://doi.org/10.35808/ersj/2295>
- Fernández-Ríos, A., Butnar, I., Margallo, M., Laso, J., Borrion, A., & Aldaco, R. (2023). Carbon accounting of negative emissions technologies integrated in the life cycle of spirulina supplements. *Science of the Total Environment*, 890(April). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164362>
- Fry, J., Lenzen, M., Jin, Y., Wakiyama, T., Baynes, T., Wiedmann, T., Malik, A., Chen, G., Wang, Y., Geschke, A., & Schandl, H. (2018). Assessing carbon footprints of cities under limited information. *Journal of Cleaner Production*, 176(2018), 1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.073>

- García Castillo, A. (2022). *Huella De Carbono En Organizaciones Industriales En España: Determinación Del Alcance 3* [Tesis de Máster, Universidad de Sevilla]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72427/fichero/TFM-2427+García+Castillo.pdf>
- García-Alaminos, Gilles, E., Monsalve, F., & Zafrilla, J. (2022). Measuring a university's environmental performance: A standardized proposal for carbon footprint assessment. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131783>
- Ghosh, P., Jha, A., & Sharma, R. (2020). Managing carbon footprint for a sustainable supply chain: a systematic literature review. *Modern Supply Chain Research and Applications*, 2(3), 123–141. <https://doi.org/10.1108/mscra-06-2020-0016>
- Godinho, J., Hoefnagels, R., Braz, C. G., Sousa, A. M., & Granjo, J. F. O. (2023). An economic and greenhouse gas footprint assessment of international maritime transportation of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers. *Energy*, 278(June 2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127673>
- Gómez Vargas, M., Galeano Higueta, C., & Jaramillo Muñoz, D. A. (2015). El estado del arte: una metodología de investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 6(2), 423. <https://doi.org/10.21501/22161201.1469>
- González, A. J., Romero, M. I., & Calderón Casallas, C. (2019). Organización basada en procesos sustentables. Una revisión de literatura Organization based on sustainable processes. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, VI(23), 97–126. Recuperado a partir de www.redalyc.org/articulo.oa?id=215067134007
- Goodwin, K., Allen, C., Teh, S. H., Li, M., Fry, J., Lenzen, M., Farrelly, S., Leon, C., Lewis, S., Chen, G., Schandl, H., & Wiedmann, T. (2023). Targeting 1.5 degrees with the global carbon

- footprint of the Australian Capital Territory. *Environmental Science and Policy*, 144(December 2022), 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.006>
- Gutiérrez Gómez, A., & García Rendón, J. J. (2021). Fuentes de energía renovable, recursos energéticos distribuidos y almacenamiento en Colombia: una revisión de la normatividad. *Universidad EAFIT*, 21–01, 0–30.
- Guzman, S., & Chávez, D. (2022). *Estudio comparativo sobre los métodos de captura de CO₂*. Universidad Industrial de Santander.
- He, B., Liu, Y., Zeng, L., Wang, S., Zhang, D., & Yu, Q. (2019). Product carbon footprint across sustainable supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118320>
- Hu, B., Huang, B., Liu, Z., Guo, H., Chen, Z., & Shi, L. (2021). Optimization Model of Carbon Footprint of Fresh Products in Cold Chain from the Energy Conservation and Emission Reduction Perspective. *Mathematical Problems in Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1155/2021/5559021>
- Ichisugi, Y., Masui, T., Karkour, S., & Itsubo, N. (2019). Projection of national carbon footprint in japan with integration of lca and iams. *Sustainability (Switzerland)*, 11(23), 1–21. <https://doi.org/10.3390/SU11236875>
- IEA. (2023). CO₂ Emissions in 2021. *Global Energy*, 62(10), 20–21. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IPCC. (2014). Informe Del Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

- ISO 14064 Gases de Efecto Invernadero - Parte 1: Especificación Con Orientación a Nivel de Organización Para La Cuantificación y Notificación de Las Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero., 47 (2018). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-1:ed-2:v1:es>
- Karlsson, I., Rootzén, J., Johnsson, F., & Erlandsson, M. (2021). Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. *Developments in the Built Environment*, 8(July). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100059>
- Lee, A., Wang, Y., & Lo, S. F. (2021). Life cycle assessment of functional food: Improving sustainability in the biotechnology industry through transparency. *Processes*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/pr9122130>
- Lenzen, M., Malik, A., Li, M., Fry, J., Weisz, H., Pichler, P. P., Chaves, L. S. M., Capon, A., & Pencheon, D. (2020). The environmental footprint of health care: a global assessment. *The Lancet Planetary Health*, 4(7), e271–e279. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30121-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30121-2)
- Li, H., Jiang, H.-D., Dong, K.-Y., Wei, Y.-M., & Liao, H. (2020). A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119192. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119192>
- Li, J., Li, W., Wang, L., & Jin, B. (2021). Environmental and cost impacts of food waste in university canteen from a life cycle perspective. *Energies*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/en14185907>
- Li, S., Ragu-Nathan, B., Ragu-Nathan, T. S., & Subba Rao, S. (2006). The impact of supply chain management practices on competitive advantage and organizational performance. *Omega*, 34(2), 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.08.002>

- Luo, J., Huang, M., & Bai, Y. (2022). Visual analysis of low-carbon supply chain: Development, hot-spots, and trend directions. *Frontiers in Environmental Science*, *10*(September), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.995018>
- Martelli, S., Mocera, F., & Somà, A. (2023). Carbon Footprint of an Orchard Tractor through a Life-Cycle Assessment Approach. *Agriculture (Switzerland)*, *13*(6), 1210. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061210>
- Mateus Rincon, D. C. (2020). *Estudio Y Selección De La Metodología a Utilizar Para La Medición De La Huella De Carbono En El Uso De Las Tic En Colombia*. (Issue c) [Universidad Santo Tomás]. <http://hdl.handle.net/11634/29754>
- Matušík, J., & Kočí, V. (2021). What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124833>
- McAuliffe, G. A., Takahashi, T., & Lee, M. R. F. (2020). Applications of nutritional functional units in commodity-level life cycle assessment (LCA) of agri-food systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*, 208–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11367-019-01679-7>
- Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., & Wang, L. (2018). Baseline scenario of carbon footprint of polyester t-shirt. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, *11*(1), 1–14. <https://doi.org/10.3993/JFBIM00262>
- Mohammed, A., Ward, K., Lee, K.-Y., & Dupont, V. (2023). The environmental impact and economic feasibility assessment of composite calcium alginate bioplastics derived from *Sargassum*. *The Royal Society of Chemistry*, 5501–5516. <https://doi.org/10.1039/d3gc01019h>

- Moreno, J., Cobo, M., Barraza-Botet, C., & Sanchez, N. (2022). Role of low carbon emission H₂ in the energy transition of Colombia: Environmental assessment of H₂ production pathways for a certification scheme. *Energy Conversion and Management: X*, 16(1), 100312. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100312>
- Munasinghe, P., Druckman, A., & Dissanayake, D. G. K. (2021). A systematic review of the life cycle inventory of clothing. *Journal of Cleaner Production*, 320(August), 128852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128852>
- Muthu, S. S. (2015). The carbon footprint handbook. In *The Carbon Footprint Handbook*. <https://doi.org/10.1201/b18929>
- Olatunji, O. O., Akinlabi, S. A., Ayo, O. O., Madushele, N., Adedeji, P. A., & Fatoba, S. O. (2019). Drivers and barriers to competitive carbon footprint reduction in manufacturing supply chain: A brief review. *Procedia Manufacturing*, 35, 992–1000. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.047>
- Rodríguez, J. P., Ruíz Ochoa, M. A., & Meneses, A. (2020). Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios*, 41(47), 74–84. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p06>
- Schmidt, M., Nill, M., & Scholz, J. (2022). Determining the Scope 3 Emissions of Companies. *Chemical Engineering and Technology*, 45(7), 1218–1230. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200181>
- Scrucca, F., Barberio, G., Cutaia, L., & Rinaldi, C. (2023). A simplified methodology for estimating the Carbon Footprint of heat generation by forest woodchips as a support tool for sustainability assessment in decision-making. *Cleaner Environmental Systems*, 9(May), 100126. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100126>

- Sinke, P., Swartz, E., Sanctorum, H., van der Giesen, C., & Odegard, I. (2023). Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(3), 234–254. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02128-8>
- Stephan, A., Crawford, R. H., & Bontinck, P. A. (2019). A model for streamlining and automating path exchange hybrid life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 237–252. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1521-1>
- Suer, J., Traverso, M., & Ahrenhold, F. (2021). Carbon footprint of scenarios towards climate-neutral steel according to ISO 14067. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128588>
- Torres Rojas, M. C. (2023). *Cálculo huella de Carbono Corporación Colombiana de Logística* [Universidad El Bosque]. <http://hdl.handle.net/20.500.12495/11836>.
- Vega Sánchez, D. R. (2019). Estimación de la huella de carbono y de la huella hídrica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga en el 2018. In *Universidad Pontificia Bolivariana* (Vol. 8, Issue 5). <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8442/39176.pdf?sequence=1>
- Wang, M., Wang, B., & Abareshi, A. (2020). Blockchain technology and its role in enhancing supply chain integration capability and reducing carbon emission: A conceptual framework. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su122410550>
- World Economic Forum. (2021). *Net-Zero Challenge: The supply chain opportunity*. January, 1–46. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Challenge_The_Supply_Chain_Opportunity_2021.pdf

- Xue, L., Prass, N., Gollnow, S., Davis, J., Scherhauser, S., Östergren, K., Cheng, S., & Liu, G. (2019). Efficiency and Carbon Footprint of the German Meat Supply Chain. *Environmental Science and Technology*, 53(9), 5133–5142. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06079>
- Yang, N., Yang, J., Pang, M., Zhang, P., Chang, Y., Zhang, L., Hao, Y., & Chen, Y. (2023). Decarbonization of the wind power sector in China: Evolving trend and driving factors. *Environmental Impact Assessment Review*, 103(May), 107292. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107292>