



**Análisis de los criterios de sostenibilidad y lineamientos normativos que viabilizan los procesos de producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF) en Colombia**

Laura Maria Peña Camargo

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Director

Juan Sebastián García Gaviria, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana  
Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

## Resumen

El presente trabajo se centra en el análisis de los criterios de sostenibilidad y lineamientos normativos que viabilizan la producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF, por sus siglas en inglés de *Sustainable Aviation Fuels*) en Colombia, tomando como referencias normativas internacionales y las prácticas de países líderes como Estados Unidos de América y la Unión Europea. Este tema es de importancia en el contexto de la creciente necesidad de avanzar en la transición energética global y la necesidad de reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). A pesar de los avances de Colombia en biocombustibles como el biodiésel y el etanol, no se cuenta con un marco regulatorio específico para la producción de SAF. Lo que representa una oportunidad de generar unas políticas nacionales alineadas con estándares internacionales. El estudio propone un análisis comparativo de normas internacionales y la identificación de criterios de sostenibilidad clave como la prevención de deforestación, la gestión del agua y mejores prácticas agrícolas, que podrían ser adaptados al contexto colombiano. La metodología empleada es de carácter cualitativo y descriptivo, basada en el análisis documental y el método deductivo. El proyecto incluye un análisis TOWS, siendo una extensión de la matriz FODA que identifica fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, permitiendo establecer criterios que habiliten la implementación o producción de SAF en el país. Estos criterios en su medida se clasificarán en categorías medioambientales, sociales y económicas, y se integrarán en propuestas específicas para su posterior implementación en políticas públicas. El presente proyecto busca facilitar la creación de un marco normativo viable, que promueva la transición energética, la generación de empleo y la reducción de la huella de carbono en la aviación. Los resultados contribuirían a posicionar a Colombia como actor clave en la sostenibilidad e innovación del sector energético global.

**Palabras clave:** Criterios de sostenibilidad, Combustibles de aviación sostenibles (SAF), Biocombustibles,

## Abstract

This document focuses on the analysis of sustainability criteria and regulatory guidelines that enable the production of Sustainable Aviation Fuels (SAF) in Colombia, taking as a reference international regulations and practices of leading countries such as United States of America and the European Union. This topic is important in the context of the growing need to advance the global energy transition and the need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions, contributing to the Sustainable Development Goals (SDG). Despite the advances on biofuels such as biodiesel and ethanol in Colombia, there is no specific regulatory framework to produce SAF. This represents an opportunity to align national policies with international standards. The study proposes a comparative analysis of international standards and the identification of key sustainability criteria such as deforestation prevention, water management and best agricultural practices, which could be adapted to the Colombian context. The methodology used is qualitative and descriptive, based on documentary analysis and the deductive method. The project includes a TOWS analysis, which is an extension of the SWOT matrix that identifies strengths, opportunities, weaknesses and threats, allowing the establishment of criteria that enable the implementation or production of SAF in the country. These criteria will be classified into environmental, social and economic categories, and will be integrated into specific proposals for their subsequent implementation in public policies. This project seeks to facilitate the creation of a viable regulatory framework that promotes energy transition, job creation, and the reduction of the carbon footprint in aviation. The results would contribute to positioning Colombia as a key player in the sustainability and innovation of the global energy sector.

**Keywords:** Sustainability criteria, Sustainable aviation fuels (SAF), Biofuels, CORSIA, RSB, ISCC.

## **Dedicatoria**

Dedicado a quienes impulsan y movilizan cambios hacia la sostenibilidad, con la convicción de que el progreso real despegua cuando la innovación tecnológica y la responsabilidad ambiental avanzan de la mano. A todas esas personas que, con valentía y determinación, transforman ideas en acciones, recordándonos que el mañana no es un derecho dado, sino un compromiso colectivo.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Pontificia Bolivariana por brindarme el espacio académico y los recursos necesarios para crecer como profesional y persona. Extiendo un reconocimiento especial al director de este proyecto por su valioso apoyo, guía y acompañamiento en el desarrollo metodológico de esta investigación. Asimismo, expreso mi gratitud a la empresa en la que he tenido la oportunidad de formarme y consolidarme como profesional, y en la que he podido aplicar mis conocimientos para contribuir al desarrollo de proyectos con enfoque sostenible.

---

## Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACVS	Análisis de Ciclo de Vida Social
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BLIHR	Iniciativa de los Líderes Empresariales sobre los Derechos Humanos ( <i>Business Leaders Initiative on Human Rights</i> )
CAEP	Comité de Protección Ambiental de la Aviación ( <i>Committee on Aviation Environmental Protection</i> )
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CORSIA	Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional ( <i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i> )
CTA	Cooperativa de Trabajo Asociado
CUE	Consortio de autores del estudio (CNPML-UPB-EMPA)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GRI	Iniciativa de Reporte Global ( <i>Global Reporting Initiative</i> )
HEFA	Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados ( <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i> )
IATA	Asociación Internacional de Transporte Aéreo ( <i>International Air Transport Association</i> )
ICAO	Organización de Aviación Civil Internacional ( <i>International Civil Aviation Organization</i> )
ICV	Índice de Calidad de Vida
IFC	Corporación Financiera Internacional ( <i>International Finance Corporation</i> )
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
ILUC	Cambio Indirecto en el Uso de la Tierra ( <i>Indirect Land Use Change</i> )
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
ISCC	Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono ( <i>International Sustainability &amp; Carbon Certification</i> )

---

ISO	Organización Internacional de Normalización ( <i>International Organization for Standardization</i> )
LCA	Análisis del Ciclo de Vida ( <i>Life Cycle Assessment</i> )
NBI	Necesidades Básicas Insatisfechas
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OIT	Organización Internacional del Trabajo
PIB	Producto Interno Bruto
PtL	Energía a Líquido ( <i>Power-to-Liquid</i> )
RAC	Reglamentos Aeronáuticos de Colombia
RED II	Directiva de Energías Renovables II ( <i>Renewable Energy Directive II</i> )
RED III	Directiva de Energías Renovables III ( <i>Renewable Energy Directive III</i> )
RFS	Estándar de Combustibles Renovables ( <i>Renewable Fuel Standard</i> )
RIN	Número de Identificación Renovable ( <i>Renewable Identification Number</i> )
RSB	Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles ( <i>Roundtable on Sustainable Biomaterials</i> )
RSPO	Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible ( <i>Roundtable on Sustainable Palm Oil</i> )
SAF	Combustible Sostenible de Aviación ( <i>Sustainable Aviation Fuel</i> )
UE	Unión Europea
UT	Confederación Unitaria de Trabajadores
VGRC	Valle Geográfico del Río Cauca

## Tabla de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Dedicatoria .....	4
Agradecimientos.....	5
Siglas .....	6
Contenidos .....	8
Lista de figuras y tablas.....	10
1.1. Introducción .....	11
1.2. Planteamiento del problema .....	12
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general .....	15
1.3.2. Objetivos específicos .....	15
1.4. Justificación .....	16
2.1. Marco referencial.....	17
2.1.1. Marco conceptual.....	17
2.1.2. Estado del arte.....	21
3.1. Metodología.....	27
Resultados .....	29
4.1. Instrumentos normativos a nivel nacional e internacional establecidos para la producción y comercialización de SAF. ....	29
4.2 Lineamientos para la certificación de sostenibilidad (CORSA, RBS, ISCC) establecidos para la producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF).....	35
4.2.1. Criterios de sostenibilidad de CORSA.....	36
4.2.2. Procesos de Certificación en RSB e ISCC para Combustibles Sostenibles de Aviación bajo CORSA.....	39
<i>RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials)</i> .....	40
<i>ISCC (International Sustainability &amp; Carbon Certification)</i> .....	40
4.2.3 Evaluación de sistemas de auditoría, trazabilidad, verificación y participación .....	42
4.2.4. Comparación de enfoques.....	42
4.3. Análisis de los criterios de sostenibilidad y lineamientos normativos que viabilizan los procesos de producción de (SAF).....	43
4.3.1 Análisis PESTEL.....	44
4.3.2. Matriz TOWS .....	46
4.3.3. Estrategias TOWS. ....	48

---

5. Conclusiones.....	56
Referencias.....	59

---

## Lista de figuras y tablas

<b>Figura 1</b> Eficiencia de conversión de SAF por materia prima de acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía. (2024) .....	23
<b>Figura 2</b> Escenario JET y oferta de SAF-Colombia histórico (2012-2022) proyección (2023-2050) Ministerio de Minas y Energía. ....	24
<b>Figura 3</b> Metodología.....	28
<b>TABLA 1.</b> Vías de conversión sostenible de combustible aeronáutico certificadas según la norma ASTM D7566.....	19
<b>TABLA 2</b> Marco normativo internacional para la producción de combustibles de aviación sostenibles .....	29
<b>TABLA 3</b> Marco normativo en Colombia para la producción de combustibles de aviación...32	
<b>TABLA 4</b> Criterios de sostenibilidad y evaluación de biocombustibles.....	37
<b>TABLA 5</b> Criterios de certificación en RSB e ISCC para SAF bajo CORSIA. ....	42
<b>TABLA 6</b> Comparación general entre RSB e ISCC.....	43
<b>TABLA 7</b> Análisis pestel de los criterios de sostenibilidad CORSIA en Colombia. ....	44
<b>TABLA 8</b> Estrategias TOWS.....	48
<b>TABLA 9</b> Análisis comparativo del ciclo de vida (LCA). ....	51

## 1.1. Introducción

Mediante este proyecto se desarrolla el análisis de criterios de sostenibilidad aplicados a la producción de Combustibles de Aviación Sostenible (SAF) en Colombia, tomando los referentes normativos aplicados a nivel internacional y la ruta de producción de SAF emitida a nivel nacional. Este proyecto de investigación se llevará a cabo mediante un estudio cualitativo y descriptivo con el fin de identificar aquellos criterios y lineamientos comunes entre los referentes de estudio que cumplen y apalancan la producción sostenible de SAF, no solo desde el punto de vista ambiental sino también social y económico, contribuyendo a una transición energética sostenible en Colombia.

El estudio realizado no tiene como alcance el desarrollo de una metodología para la evaluación de criterios de sostenibilidad en el marco de la producción de SAF, pero sí busca, mediante un análisis teórico cualitativo, proponer los lineamientos y criterios que desde un análisis de factores internos y externos deberían ser una prioridad en los proyectos de producción de combustibles sostenibles en el país, con el propósito de asegurar que dichos proyectos logren alcanzar los procesos de certificación sostenible de SAF, los cuales en Colombia no cuentan con un marco regulatorio propio y se basan en estándares internacionales, como los establecidos por CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) y la norma ASTM D7566.

Actualmente en Colombia se están desarrollando políticas públicas e incentivos para fomentar la inversión en la producción de SAF, incluyendo la construcción de biorrefinerías y el uso de tecnologías limpias, por tanto se espera que este proyecto sea un marco de referencia para la evaluación y toma de decisiones en el desarrollo de proyectos de producción de combustibles sostenibles e implementación de políticas gubernamentales nacionales en lo concerniente a lineamientos y criterios de sostenibilidad de combustibles de aviación sostenibles.

---

## 1.2. Planteamiento del problema

Los ecosistemas se están degradando a una velocidad nunca vista en la historia de la humanidad. La acción del hombre, los sistemas de producción<sup>2</sup> y el consumo de energía, han llevado a un incremento en la producción de combustibles fósiles. Tal como lo alerta el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los gobiernos del mundo planifican para 2030 producir un 110% más de combustibles fósiles. Esta proyección se encuentra por encima del nivel de producción requerido para limitar el calentamiento global a 1,5 °C, lo que implica directamente una mayor afectación a los ecosistemas (PUNAMA 2023).

Frente a esto Colombia por primera vez ratifica en la COP 28 la no proliferación de combustibles fósiles motivando a la unión entre las naciones en torno a una eliminación gradual y equitativa del petróleo, el carbón y el gas. (Pacto mundial COP28., 2023)

Por tanto, la transición energética sostenible es uno de los principales retos que afrontan los procesos de refinación, siendo actualmente la producción de combustibles en Colombia exclusivamente a partir de petróleo; la transición de refino a biorefino es una realidad en Europa, las refinerías se ven obligadas a adaptar sus operaciones para alinearse con los cambios de política. A la fecha la vía de transición de combustibles fósiles a combustibles sostenibles que se está implementando en las refinerías del mundo a corto y mediano plazo se enmarca en la producción de los "Sustainable Aviation Fuels" (SAF), o Combustibles de Aviación Sostenibles en español. (Pacto mundial COP28., 2023)

Estos son combustibles que se elaboran a partir de materias primas renovables como biomasa, residuos orgánicos, grasas animales, aceites vegetales y algas. Los SAF son combustibles de aviación con menores emisiones netas de Gases de Efecto de Invernadero (GEI) durante su ciclo de vida que los combustibles fósiles, siendo combustibles "Drop in fuels" que se pueden mezclar con los combustibles fósiles utilizados actualmente, por tanto, no se requiere realizar modificaciones en los sistemas de las aeronaves ni en las operaciones de suministro, manteniendo los mismos estándares de seguridad. Por tanto, el criterio de obligatoriedad del uso de SAF en Europa se ha determinado mediante la iniciativa

---

*ReFuelEU Aviation*, la cual forma parte del paquete legislativo denominado "*Fit for 55*". Este paquete, presentado por la Comisión Europea el 14 de julio de 2021, busca reducir las emisiones netas de GEI en un 55% para el año 2030, en comparación con los niveles de 1990. Dentro de esta normativa europea, se establece un objetivo progresivo para la incorporación de SAF en los combustibles de aviación, comenzando con un 2% en los depósitos de aquí a 2025 hasta llegar al 70% en 2050.

A su vez se tiene en cuenta que el "Fit for 55" es una propuesta integral que incluye múltiples directrices y regulaciones diseñadas a los estados miembros de la Unión Europea con los objetivos del Acuerdo de París, fomentando la transición hacia una economía baja en carbono.

En el caso de los SAF, la obligatoriedad y los plazos establecidos fueron clave para incentivar la innovación tecnológica, aumentar la capacidad de producción y garantizar la descarbonización gradual del sector aeronáutico.

Estos lineamientos de obligatoriedad llevaron a las naciones unidas mediante la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) a aprobar en el 2021 los nuevos criterios de sostenibilidad para los SAF, admisibles en el Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA, por sus siglas en inglés). Los criterios de sostenibilidad evalúan si los combustibles alternativos de aviación son aptos para ser reconocidos bajo el marco del CORSIA, asegurando que se incluyan no solo las reducciones de emisiones de GEI asociados a los SAF, sino también los atributos de sostenibilidad sociales, económicos y otros atributos medioambientales. Asimismo, estos criterios son el eje de verificación para los entes de certificación en toda la cadena de producción, comercialización y suministro de los SAF. (OACI, 2021)

En Colombia la producción de SAF se encuentra en etapa piloto. Solo hasta el 09 de octubre del 2023 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció la hoja de ruta para producción de SAF, lo que indica que a la fecha Colombia no cuenta con un marco regulatorio para la producción de combustibles de aviación sostenibles, por ende, no se han establecido lineamientos específicamente para Colombia relacionados con los criterios de

sostenibilidad a los cuales deben acogerse los procesos de refinación en el desarrollo y producción de SAF.

Por este motivo es indispensable iniciar el análisis y revisión de los criterios de sostenibilidad en los actuales procesos de producción (refinación) de SAF, establecidos por las refinerías de los países referentes de la Unión Europea (UE) y Estados Unidos de América, con el fin de adoptarlos como mejores prácticas en las refinerías de Colombia; esto como input previo para los procesos de certificación que habilitan la comercialización de combustibles sostenibles de aviación en Colombia. Los SAF contribuyen a la transición energética del país, la dinamización del mercado energético, apalancan el cumplimiento de los objetivos ambientales y regulaciones internacionales, por consiguiente, serán un aporte en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el cumplimiento del Acuerdo de París y el éxito del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. (Aerocivil., 2023.)

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar los criterios de sostenibilidad y lineamientos normativos que viabilizan los procesos de producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Colombia, a partir de aquellos existentes a nivel internacional.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Reconocer aquellos instrumentos normativos a nivel nacional e internacional, principalmente en EE.UU. y la UE, en relación con la producción y comercialización de SAF.
- Identificar los lineamientos para la certificación de sostenibilidad (CORSIA y BPS) establecidos para la producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF).
- Proponer los criterios de sostenibilidad que habilitan la producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Colombia.

---

## 1.4. Justificación

En Colombia, la producción de SAF enfrenta el desafío de la ausencia de un marco normativo específico que defina los criterios de sostenibilidad aplicables. A pesar de los avances en biocombustibles como el biodiésel y el etanol, los SAF carecen aun de los lineamientos necesarios para garantizar su producción bajo principios de sostenibilidad social, legal y ambiental. En este contexto, el Ministerio de Minas y Energía y la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) lideran la construcción de la Hoja de Ruta SAF, donde se proponen los criterios de sostenibilidad para estos combustibles. (Aerocivil. (s.f.). Pongámosle SAF.2023)

Determinar estos criterios resulta importante para la transición energética justa en Colombia, ya que permitirá al país avanzar en el cumplimiento de los ODS de las Naciones Unidas (ONU). Conocer y aplicar los estándares de sostenibilidad no solo contribuirá a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida de los SAF, sino que también favorecerá a otros aspectos medioambientales y socioeconómicos. Esto incentivará la producción de SAF y su integración en la transición verde de la aviación, alineando las operaciones de este sector con las políticas globales para mitigar las emisiones. Además, promover la producción de SAF no solo aportará a descarbonizar el sector aéreo, sino que proveerá al país de oportunidades de reindustrialización con nuevas fuentes de empleo y desarrollo de ciencia y tecnología (Rojas, C. (2024, septiembre 26). El SAF, una oportunidad para la reactivación económica de Colombia con energía limpia). Por tanto, el aporte de esta investigación permite que desde la formulación de los proyectos de producción de SAF se implementen los criterios de sostenibilidad que viabilizan la producción y comercialización a nivel nacional e internacional, siendo estos criterios indispensables para alcanzar los procesos de certificación Sostenible establecidos en (CORSIA).

---

## 2.1. Marco referencial

### 2.1.1. Marco conceptual

El sector de la aviación es responsable de aproximadamente el 2-3% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producto de las actividades humanas (IATA, 2022). Ante la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir la huella de carbono, la adopción de los SAF se presenta como una solución clave para la descarbonización del sector. Los SAF tienen la ventaja de integrarse en la infraestructura existente sin requerir modificaciones en las aeronaves ni en los sistemas de suministro, ofreciendo una alternativa viable frente a los combustibles fósiles tradicionales (Smith, 2021).

La producción de los SAF se basa en la utilización de materias primas sostenibles, como aceites vegetales, grasas animales y residuos agrícolas, que son procesados mediante tecnologías avanzadas como el Hidrotratamiento de Ésteres y Ácidos Grasos (HEFA). Este método transforma la biomasa en combustibles líquidos que cumplen con los estrictos requisitos técnicos de la aviación, garantizando la calidad y seguridad (Pérez & Sánchez, 2019). Los combustibles avanzados se refieren a aquellos desarrollados a partir de fuentes no convencionales, como residuos orgánicos y residuos industriales, que se caracterizan por tener un impacto ambiental reducido en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Estos combustibles son una parte integral del desarrollo de SAF debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la aviación comercial (Smith, 2021).

Los biocombustibles se producen a partir de biomasa y son una categoría clave dentro de los combustibles avanzados. En el contexto de SAF, los biocombustibles se obtienen de diversas materias primas, incluyendo aceites vegetales y grasas animales, y son tratados mediante procesos como el hidrotratamiento para cumplir con las especificaciones de los combustibles de aviación (Johnson, 2020).

El Combustible sostenible de aviación (SAF) es un tipo de biocombustible que se ha adaptado específicamente para su uso en la aviación. Su principal ventaja es la capacidad

---

de integrarse en la infraestructura existente de suministro de combustible, permitiendo una reducción inmediata en las emisiones de CO<sub>2</sub> sin necesidad de modificar las aeronaves o los motores (IATA, 2022).

El proceso de hidrotreatmento de ésteres y ácidos grasos (HEFA, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más utilizados para producir SAF. Este proceso convierte las materias primas como aceites vegetales y grasas animales en hidrocarburos que son casi idénticos a los combustibles fósiles, garantizando así su compatibilidad con las especificaciones de la aviación (Pérez & Sánchez, 2019).

Además del proceso HEFA, existen otras tecnologías para la producción de SAF, como la síntesis Fischer-Tropsch y la gasificación de biomasa. Estas tecnologías permiten la conversión de diversas materias primas en combustibles líquidos que cumplen con las estrictas normativas de la aviación (Martínez & López, 2018).

El proceso HEFA, en particular, es ampliamente reconocido por su capacidad para producir combustibles que son químicamente casi idénticos a los combustibles fósiles, asegurando así su compatibilidad con los motores de las aeronaves (Gómez, 2021). Otra de las rutas tecnológicas emergentes para la producción de combustibles sostenibles de aviación es la conocida como *Power-to-Liquid* (PtL), mediante la cual se obtienen los llamados *e-Fuels* o combustibles sintéticos. A diferencia del proceso HEFA, que depende de materias primas de origen biológico como aceites vegetales o grasas animales, la ruta PtL se basa en aprovechar excedentes de electricidad renovable para producir hidrógeno verde mediante electrólisis y combinarlo con dióxido de carbono capturado de la atmósfera o de fuentes industriales (IRENA, 2021).

Este enfoque representa una alternativa estratégica para sectores de difícil electrificación directa, como la aviación de largo alcance, pues permite generar queroseno sintético con una huella de carbono potencialmente neutra. El principio es cerrar parcialmente el ciclo de carbono: el CO<sub>2</sub> emitido al quemar el combustible es equivalente al CO<sub>2</sub> capturado para fabricarlo, siempre y cuando se utilicen fuentes renovables de energía (IEA, 2021).

Además, el uso de e-Fuels tiene la ventaja de ser compatible con la infraestructura de almacenamiento y distribución ya existente, lo que reduce los costos de transición frente a opciones que requieren rediseñar motores o sistemas logísticos (Su-ungkavatin et al., 2023). Actualmente, la tecnología PtL se encuentra en fases piloto y de demostración, con casos de validación técnica bajo estándares como la ASTM D7566, que reconoce el queroseno sintético PtL-SPK como una ruta aprobada dentro de los combustibles sostenibles de aviación (ICAO, 2022). En este sentido, la ruta PtL complementa procesos como HEFA, aportando soluciones que diversifican las materias primas y amplían el potencial de descarbonización del sector aéreo. Sin embargo, su viabilidad a gran escala depende de la disponibilidad de electricidad renovable competitiva y de sistemas de captura de carbono eficientes, factores que continúan siendo objeto de investigación y desarrollo a nivel global (IRENA, 2021).

A la fecha, se han certificado once rutas de producción bajo la norma ASTM D7566, las cuales definen procesos validados para la obtención de combustibles sostenibles de aviación (SAF). Adicionalmente, existen otras rutas tecnológicas en fase de desarrollo, con potencial de ser incorporadas en futuras actualizaciones de esta normativa. Para los casos específicos de coprocesamiento de materias primas renovables junto con fracciones fósiles, se aplica la norma ASTM D1655, que establece los requisitos para combustibles de turbina de aviación convencional. Las características técnicas de estas vías de producción se sintetizan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Vías de conversión sostenible de combustible aeronáutico certificadas según la norma ASTM D7566.

<b>Proceso de conversión</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Posible materia prima</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Proporción de mezcla por volumen</b>
<i>Fischer-Tropsch</i>	PIE	Carbón, gas natural, biomasa	ASTM D7566 Anexo 1	50%
<i>Hidroprocesado de ésteres y ácidos grasos</i>	AEF	Bioaceites, grasas animales, aceites reciclados	ASTM D7566 Anexo 2	50%

<b>Proceso de conversión</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Posible materia prima</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Proporción de mezcla por volumen</b>
<i>Isoparafinas sintetizadas de azúcares fermentados</i>	SORBO	Biomasa para producción de azúcar	ASTM D7566 Anexo 3	10%
<i>Queroseno sintetizado con derivados aromáticos</i>	FT-SKA	Carbon, gas natural, biomasa	ASTM D7566 Anexo 4	50%
<i>Alcohol to Jet</i>	ATJ-SPK	Biomasa de etanol o isobutano	ASTM D7566 Anexo 5	50%
<i>Combustible para aviones por hidrotermólisis catalítica</i>	CHJ	Triglicéridos como aceite de soya, jatropha, camelina, tung	ASTM D7566 Anexo 6	50%
<i>Cohidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos</i>	HC-HEFA-SPK	Algas	ASTM D7566 Anexo 7	10%
<i>Cohidroprocesamiento con petróleo</i>	AEF	Grasas, aceites y grasas coprocesadas con petróleo	ASTM D1655 Anexo A1	5%
<i>Cohidroprocesamiento Fischer-Tropsch con petróleo</i>	PIE	Hidrocarburos Fischer-Tropsch coprocesados con petróleo	ASTM D1655 Anexo A1	5%

Fuente: ASTM International (2020, 2021) y adaptado de *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* (s. f.). López Gómez et al., 2023. recuperado el 25 de mayo de 2025

La sostenibilidad en la producción de SAF se evalúa mediante normativas internacionales como la *International Sustainability & Carbón Certificación (ISCC)*, el esquema *CORSIA* (de la OACI) y el estándar del *Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)*. Estas regulaciones aseguran que las materias primas utilizadas no generen deforestación ni degraden ecosistemas, y que los procesos productivos reduzcan significativamente las emisiones de GEI (RSB, 2021; ISCC, 2020).

La implementación de políticas públicas es fundamental para superar los desafíos asociados a los SAF, como los altos costos de producción y la limitada disponibilidad de

---

materias primas. Incentivos fiscales, subsidios y mandatos de mezcla con combustibles fósiles son estrategias clave para hacerlos más competitivos. Asimismo, la evaluación de las normativas internacionales, adaptándose a los avances tecnológicos, garantiza la relevancia de estas certificaciones en los mercados globales (ICAO, 2021).

El desarrollo de SAF enfrenta retos significativos, entre ellos la necesidad de diversificar las materias primas y reducir los costos de producción. Innovaciones como la utilización de algas y la integración de procesos de captura de carbono podrían mejorar la sostenibilidad y viabilidad económica de estos combustibles (Williams et al., 2021). La adopción generalizada de SAF puede contribuir de manera significativa a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector de la aviación. Sin embargo, su éxito depende de la colaboración entre gobiernos, industria y organizaciones internacionales para superar los desafíos tecnológicos y económicos (Peterson et al., 2020; Pérez et al., 2022). Este avance no solo representa una alternativa técnica, sino también un compromiso con los objetivos globales de sostenibilidad.

### **2.1.2. Estado del arte**

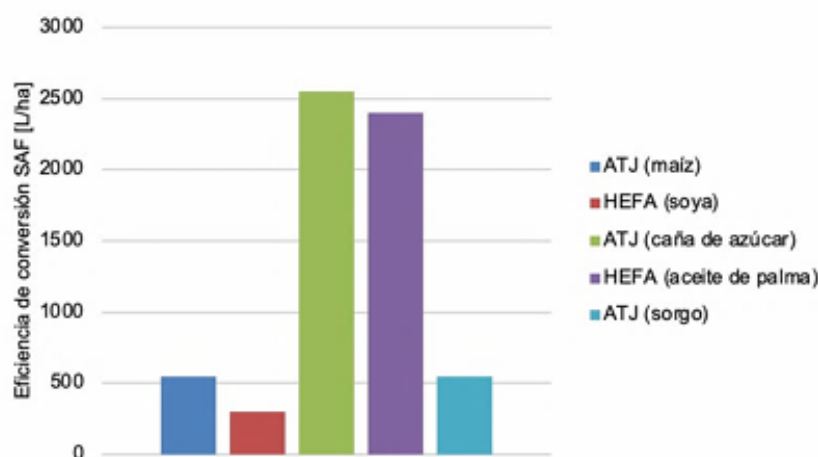
En el informe preparado por el U.S *Department of energy* (2022), describe cual puede ser la contribución de los SAF a la disminución de la huella de carbono. Además, describe cuales son los criterios que la OACI ha fijado para considerar los SAF como sostenibles, estos combustibles emiten aproximadamente entre el 75% y el 85% menos de CO<sub>2</sub> que los combustibles fósiles utilizados en aviones, desde su producción hasta su quema. Describe algunos desafíos que tiene el SAF en el mercado, empieza describiendo que es muy difícil que el SAF pueda igualar el precio de los combustibles con base al carbón, lo que dificulta que las aerolíneas opten de manera voluntaria por realizar la transición a los SAF. Asimismo, describe los criterios exigidos por OACI a través de los lineamientos del CORSIA: "*CORSIA sets voluntary standards in Phase 1 and mandatory ones in Phase 2*" (DOE, 2022, p. 49). En su artículo de revista, Bravo (2024) describe la viabilidad del SAF para disminuir las emisiones de la aviación en Perú. La metodología

se basa en un estudio de tipo cuantitativo y comparativo, el cual midió las emisiones de combustible convencional utilizado por la aviación y del combustible SAF para el año 2019. Para el comparativo de emisiones de GEI, se consideró el registro de estimación de consumo de combustible para el año 2019, tanto para la aviación civil nacional como internacional, proporcionado por el OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) y el Ministerio de Energía y Minas (Bravo Artica, 2024, pág. 3). Como resultado queda constatado el amplio potencial de los SAF frente a los combustibles tradicionales, con una reducción del 28% en la emisión de GEI. Sin embargo, como conclusiones destacan igualmente que uno de los desafíos que enfrenta el SAF son los altos costos de mercado, que no pueden rivalizar con los combustibles fósiles. De igual manera Parejo Navajas, (2020) describe el marco normativo aplicado a los SAF en España. Presenta una definición de SAF y su importancia en el marco del plan CORSIA. Parejo Navajas (2020) describe que el criterio para calificar al combustible como sostenible no es únicamente disminuir las emisiones de carbono, sino que también es importante reducir la cantidad de residuos existentes, a partir de la reutilización, es por esto que los SAF deben proceder de residuos ya existentes.

Teniendo en cuenta esta apreciación, algunas investigaciones se han abocado a investigar la viabilidad de los combustibles SAF y el cumplimiento de los mecanismos de certificación de la sostenibilidad (por sus siglas en inglés, SCS) los cuales permiten certificar los combustibles admitidos en el plan CORSIA si cumplen con los requisitos del documento de la OACI llamado "Marco de Admisibilidad en el CORSIA y Requisitos para los Esquemas de Certificación de Sostenibilidad". Estudios de este tipo se han adelantado en Colombia, tales como el realizado por López (2022), que presenta una revisión titulada: "El escenario actual, las principales incertidumbres y retos asociados al mercado colombiano de Biocombustible Aeronáutico o Combustible Sostenible de Aviación (SAF por sus siglas en inglés)" (p. 10). Este estudio busca identificar los retos existentes en la cadena de valor del SAF en Colombia. A través de una metodología cuantitativa de tipo experimental, en ese trabajo se plantea en un esquema de 6 pasos la identificación de una cadena de valor que dé

cumplimiento a las normas internacionales, incluidas las de OCAI, mediante el plan CORSIA, de tal manera que se pueda lograr un precio competitivo. De esta manera, deja un notable aporte al conocimiento, que, según, López puede ser utilizado para que técnicos y expertos comprendan mejor cuáles son las oportunidades y barreras de la utilización de SAF en las aerolíneas, demostrando además que estos tienen gran potencial en Colombia. Igualmente, el estudio realizado “*Decarbonizing Aviation in Latin America in a Sustainable way*” (2024) realizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) con el apoyo de LATAM Airlines y Airbus) afirma el potencial de producción de SAF que tienen las principales materias primas disponibles en Colombia. Figura. 1.

**Figura 1** Eficiencia de conversión de SAF por materia prima de acuerdo con el MIT (2024)



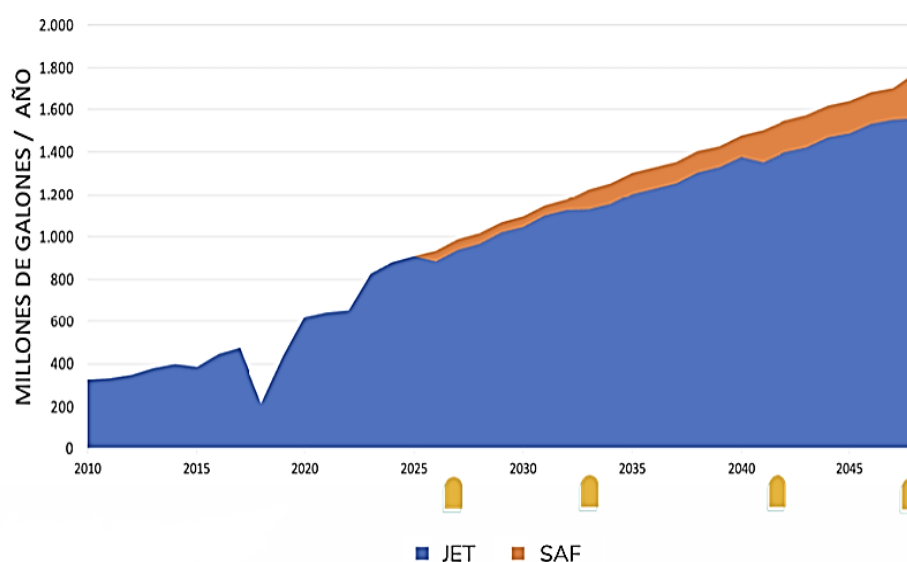
**Nota.** Adaptado de Hoja de Ruta de los Combustibles Sostenibles de Aviación en Colombia: Cielos limpios: aviación para la vida por Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2025. Copyright 2025 por Aerocivil.

En este mismo orden de ideas, Cuellar (2022) presenta cómo los aceites de palma pueden ser utilizados en la producción de SAF, concretamente enumera los criterios de disponibilidad del plan CORSIA que son cumplidos por los SAF elaborados de aceite de palma y cumple con el estándar de compensación de emisiones GEI, enfatizando en cómo es una gran oportunidad para Colombia.

Esto nos da un indicio de que en Colombia se tiene un potencial importante en el tema de la reducción de los GEI para la aviación, y por eso es fundamental que se realice el

análisis de ciclo de vida del SAF de palma en Colombia como un criterio importante para ingresar al estándar CORSIA. (Cuellar Sanchez, 2022, pág. 159) El mismo autor expone también que, en Colombia se está generando un panorama normativo que respalda la creación de SAF a partir del aceite de palma. Sin embargo, cabe aclarar que para los criterios Internacionales de sostenibilidad el aceite de palma podría no cumplir con algunos de los requisitos establecidos por CORSIA, actualmente aerolíneas como KLM, afirma, no utilizan aceite de palma y soya ya que estas fuentes pueden generar altos índices de deforestación y adicionalmente, a diferencia del combustible tradicional, el precio del SAF suele determinarse de acuerdo con la reducción de emisiones que este genera, de manera que puede existir una diferencia importante en el precio de un SAF proveniente de palma y uno proveniente de residuos forestales o de café. En la Imagen 2. Se proyecta entrada de plantas de producción de SAF (Eje horizontal: 2028-2035-2043 \*2050)

**Figura 2** Escenario JET y oferta de SAF-Colombia histórico (2012-2022) proyección (2023-2050) Ministerio de Minas y Energía.



**Nota.** Adaptado de *Equipo de Modelado* por Ministerio de Minas y Energía, 2023. y *Empresas del Sector Hidrocarburos JET SAF*, 2023. Copyright 2023 por Ministerio de Minas y Energía y *Empresas del Sector Hidrocarburos JET SAF*. Recuperado 21 de abril 2025, (<https://www.minenergia.gov.co/>).

La doctora en Ingeniería Química y profesora de la Universidad de los Andes, Rocío Sierra, explica que Europa y Estados Unidos lideran actualmente la producción global de SAF. En América Latina y el Caribe, solo Paraguay, Panamá y Brasil cuentan con proyectos activos para la producción de estos combustibles. Sierra también señala que, aunque en Colombia no existe un marco regulatorio específico para los SAF, el país tiene experiencia previa en la regulación de biocombustibles, basada en la producción de etanol y biodiésel, lo que proporciona una base sólida para desarrollar el marco normativo necesario. (Sierra, 2023).

El Ministerio de Minas y Energía en el documento "ABC Combustibles Sostenibles de Aviación SAF" (2023) cita los criterios de sostenibilidad ante las vías de producción de SAF en Colombia, como se listan a continuación:

- No se debe generar deforestación de bosques primarios.
- No debe existir una afectación a la calidad y disponibilidad del agua.
- Deben de realizarse mejores prácticas agrícolas.
- Se deben limitar las emisiones, ejemplo los GEI, a lo largo del ciclo productivos de los SAF.
- Debe de garantizarse la conservación de los recursos naturales.
- Debe de realizarse un adecuado manejo de residuos.
- Debe de garantizarse la protección de los derechos humanos y laborales,
- Debe de generarse el desarrollo local y social.
- Se debe garantizar la seguridad alimentaria.

Siendo así, que los anteriores podrían ser comparables con los criterios establecidos en el plan CORSIA, aplicables a los lotes de combustible de aviación con bajo carbono de CORSIA, producido por un fabricante de combustible certificado a partir del 1 de enero de 2024. CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels 2022. Sin embargo, para la comercialización de SAF a nivel internacional se requiere alcanzar certificados de sostenibilidad, tales como la Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC),

orientada a la producción de biomasa y bioenergía. Esta certificación se enfoca en la sostenibilidad del uso de la tierra, la trazabilidad y la verificación de GEI a lo largo de toda la cadena de suministro. También requiere la certificación Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB), considerada el documento central del marco de sostenibilidad de RSB, que establece los requisitos generales para las operaciones de producción, conversión y procesamiento de biomasa, combustibles avanzados, productos y biomateriales.

Estas certificaciones que han sido obtenidas por las grandes empresas de hidrocarburos, como Bp, que logró la certificación el 02 de marzo de 2023, anunciando la primera venta de SAF con ISCC en la Unión Europea. Fabricado por co-procesamiento de materias primas sostenibles junto con materias primas fósiles, el SAF procedente de la refinería de Bp en Castellón ha surtido un vuelo realizado por LATAM ruta Zaragoza (España) hacia Norteamérica. Por su parte Repsol, el 07 de febrero de 2024, obtuvo la certificación para operar con SAF dentro del sistema de contabilidad y reclamaciones de RSB. Esta certificación abre un mercado global más amplio para que Repsol comercialice SAF. En América Latina, aún no se registran empresas de producción de SAF que cuenten con estas certificaciones RSB aprobadas por el CORSIA. Como se ha mencionado anteriormente, en Colombia no se cuenta actualmente con una reglamentación técnica o estándar específico para la producción de SAF. Sin embargo, se han adelantado algunos trabajos de investigación y propuestas de reglamentación, como las hojas de ruta lideradas por entidades gubernamentales y expertos en el tema, que buscan aprovechar la experiencia previa del país en la regulación de biocombustibles como el biodiésel y el etanol. Estas iniciativas pretenden allanar el camino hacia la definición de criterios y condiciones específicas que permitan cumplir con los requisitos del plan CORSIA, garantizando que los SAF produzcan beneficios tanto ambientales como sociales y económicos. Este esfuerzo representa un paso fundamental para consolidar un marco normativo que permite fomentar la sostenibilidad y la competitividad del sector en Colombia, posicionándolo como actor clave en la transición energético global.

---

### 3.1. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se realizó un estudio cualitativo y descriptivo, utilizando principios de la investigación aplicada y del método deductivo. Este enfoque se organiza en tres fases principales:

La primera fase es una fase descriptiva-analítica: en esta etapa, se realizará la recopilación de datos a través de técnicas documentales, incluyendo las búsquedas bibliográficas en repositorios digitales, bases de datos científicas y bibliotecas físicas, así como la revisión de documentación técnica y estudios previos. La estrategia de búsqueda se centrará en identificar lineamientos, normativas y experiencias relevantes relacionadas con la producción de SAF a nivel nacional e internacional.

La segunda fase descriptiva-evaluativa: durante esta fase, se llevó a cabo una evaluación interna y externa mediante un análisis TOWS, que deriva del análisis DOFA. Aunque ambos métodos se centran en identificar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, el TOWS se distingue por su enfoque estratégico, al permitir combinar estos factores de forma cruzada para identificar acciones específicas que maximicen las oportunidades y minimicen los riesgos. La elección del TOWS sobre el DOFA en este proyecto se debe a que el TOWS ofrece una visión más proactiva y orientada a la toma de decisiones estratégicas, lo cual es crucial para formular criterios sostenibles en un contexto con el de los SAF en Colombia. Este análisis permite explorar tanto las fortalezas existentes, como las oportunidades del mercado global, mientras se mitigan las amenazas externas, como la falta de normativas específicas.

La Tercera fase Evaluativa-interpretativa: con base en los hallazgos de las dos fases anteriores, se desarrollan los criterios que habiliten la producción de SAF en Colombia. Esto incluye un análisis comparativo de los lineamientos internacionales y su adaptación al contexto nacional, asegurando que sean aplicables y viables dentro de las condiciones socioeconómicas y ambientales del país.

**Figura 3 Metodología**

Nota. Por la cual se presenta la metodología en una figura para mejor visualización.

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

### 4.1. Instrumentos normativos a nivel nacional e internacional establecidos para la producción y comercialización de SAF.

La producción y comercialización de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés) se encuentra en el centro de las estrategias internacionales para la descarbonización del sector aéreo, dado lugar a un marco normativo internacional cada vez más robusto y específico para promover el uso de SAF. Tanto la Unión Europea como Estados Unidos han adoptado marcos regulatorios que incluyen objetivos vinculantes, incentivos fiscales, criterios de sostenibilidad ambiental y mecanismos financieros para acelerar la adopción de SAF en el mercado. Algunos de estos referentes internacionales se describen en la Tabla 2.

**Tabla 2** Marco Normativo Internacional para la Producción de Combustibles de Aviación Sostenibles

Año	Documento	Tema principal	Observaciones clave	Referencia
2023	RED III (actualización de RED II)	Uso de energías renovables en el transporte, incluyendo SAF	Refuerza los criterios de sostenibilidad y establece subcuotas de SAF dentro del objetivo del 14,5% en transporte para 2030.	<i>European Parliament and Council (2023)</i>
2023	Reglamento (UE) 2023/2405	Parte del paquete “Objetivo 55” para reducción de GEI	Obliga a incluir SAF y combustibles sintéticos, asegurando cumplimiento climático al 2030.	Parlamento Europeo y del Consejo (2023)
2023	Iniciativa <i>ReFuelEU Aviation</i>	Aumento progresivo del uso de SAF en la UE	Metas obligatorias desde 2025 (2%) hasta 2050 (63%, incluyendo 28% sintético).	<i>European Commission (2023)</i>

<b>2022</b>	Ley de Reducción de la Inflación (IRA)	Incentivos fiscales para SAF	Hasta USD 1,75/galón de SAF y financiamiento federal para expansión productiva.	<i>Departamento de Agricultura de EE.UU. (2022)</i>
<b>2021</b>	Ley de Cielos Sostenibles de EE. UU.	Estímulo fiscal directo al uso de SAF	Crédito fiscal de hasta 2 USD/galón para SAF con reducción de GEI $\geq$ 50%; incorpora criterios de la OACI.	<i>U.S. Congress (2021)</i>
<b>2021</b>	Plan de Acción Climática de EE. UU.	Estrategia para aviación con cero emisiones netas en 2050	Impulsa producción de SAF, eficiencia operativa y tecnologías limpias.	<i>U.S. Department of Transportation (2021)</i>
<b>2021</b>	Objetivo SAF EE.UU. y Gran Desafío SAF	Escalamiento de producción de SAF	Meta de 3 mil millones de galones anuales para 2030, acompañada de créditos fiscales e incentivos.	<i>White House Fact Sheet (2021)</i>
<b>2019</b>	Actualización del LCFS – inclusión del SAF	Expansión de beneficios del LCFS a combustibles de aviación	SAF reconocido como elegible para generar créditos por reducción de intensidad de carbono.	<i>California Air Resources Board (2019)</i>
<b>2018</b>	RED II (Directiva 2018/2001)	Promoción de energías renovables en la UE	Introduce criterios de sostenibilidad obligatorios para biocombustibles, incluyendo SAF.	<i>European Parliament and Council (2018)</i>
<b>2007</b>	Ley de Independencia y Seguridad Energética (EISA)	Reforma del Estándar de Combustibles Renovables (RFS)	Permite generación de RINs por SAF bajo esquema voluntario; SAF recibe 1.6 RIN por galón.	<i>U.S. Environmental Protection Agency (2007)</i>
<b>2005</b>	Ley de Política Energética de EE.UU.	Creación del Estándar de Combustibles	Establece cuotas crecientes de biocombustibles,	<i>U.S. Congress (2005)</i>

		Renovables (RFS)	inicialmente para transporte terrestre.	
<b>2009</b>	Low Carbon Fuel Standard (LCFS – California)	Incentivos por reducción de emisiones en combustibles	Permite a productores de SAF generar créditos financieros por reducción de intensidad de carbono.	<i>California Air Resources Board</i>
<b>1944</b>	Convenio de Chicago (OACI)	Gobernanza internacional del transporte aéreo	Incluye objetivo de cero emisiones netas en aviación internacional al 2050 (LTAG).	Organización de Aviación Civil Internacional (2014)

Fuente. Elaboración propia con base en la bibliografía consultada 2025.

Una referencia esencial en la regulación internacional de la aviación es la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), que, desde el Convenio de Chicago (1944), lidera la gobernanza global de la aviación civil. Bajo su liderazgo, se han establecido metas climáticas como la neutralidad de carbono al 2050, Meta de aspiración a largo plazo (LATAG, por sus siglas en inglés) es un objetivo adoptado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para que el sector de la aviación internacional alcance emisiones netas de carbono iguales a cero en el año 2050. y el mecanismo de compensación CORSIA. Estas metas han servido de base para regulaciones más estrictas a nivel regional y nacional.

En la Unión Europea, dentro del paquete legislativo "*Fit for 55*", publicado por la Comisión Europea en julio de 2021, cuyo objetivo principal es reducir en al menos un 55% las emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2030, en comparación con los niveles de 1990, se destaca la Iniciativa *ReFuelEU Aviation* (2023), cuyo objetivo es fomentar la producción y consumo de SAF mediante mandatos de mezcla obligatorios.

A partir de 2025, los proveedores de combustible estarán obligados a asegurar un mínimo de 2% de SAF en el combustible de aviación suministrado en la UE, proporción que aumentará gradualmente hasta alcanzar un 63% para 2050.

Esta iniciativa se complementa con la actualización de la *Directiva sobre Energías Renovables*, RED II a RED III en 2023 refuerza el compromiso de la UE con las energías

renovables. *RED III* eleva el objetivo vinculante de energía renovable al 42,5% para 2030 (con una meta indicativa del 45%) y exige que el sector transporte alcance al menos un 14,5% de contenido renovable, incluyendo subcuotas específicas para combustibles de aviación sostenibles (SAF). Estados Unidos ha adoptado un enfoque predominantemente basado en incentivos económicos. El Estándar de Combustible Bajo en Carbono de California (*CA-LCFS*) permite generar créditos por reducción de emisiones mediante el uso de SAF, que pueden ser comercializados por los productores. A nivel federal, el *Estándar de Combustibles Renovables (RFS)* otorga a los productores de SAF la posibilidad de generar créditos de cumplimiento conocidos como RINs (1.6 RIN por galón), aunque su participación es voluntaria.

En mayo de 2021, se presentó la *Ley de Cielos Sostenibles*, que otorga créditos fiscales de entre 1.50 y 2.00 USD por galón de SAF que logre reducciones de gases de efecto invernadero superiores al 50%, además de establecer criterios de sostenibilidad alineados con la OACI. Esta ley se complementa con un fondo de 1000 millones de USD para impulsar la instalación de nuevas plantas productoras.

En el contexto colombiano se han formulado varias iniciativas que apoyan el marco legal en torno a los SAF, avanzado en la formulación de un marco normativo que, aunque aún disperso, comienza a consolidar las bases para la transición hacia combustibles más limpios en el sector aéreo. Diversas leyes y políticas públicas recientes han señalado la importancia de incorporar energías renovables, reducir emisiones contaminantes y diversificar la matriz energética del país. En este sentido, se destaca los documentos y leyes relacionados en la Tabla 3.

**Tabla 3** Marco normativo en Colombia para la producción de combustibles de aviación.

Año	Documento	Enfoque principal	Aspectos clave	Referencia
2008	CONPES 3510	Política de biocombustibles	Impulsar biocombustibles sostenibles, base conceptual para desarrollos futuros como el SAF.	Departamento Nacional de Planeación (2008)

<b>2010</b>	Resolución 180.919	Regulación técnica de combustibles líquidos	Establece requisitos técnicos para mezcla y calidad de combustibles líquidos; marco técnico de referencia para biocombustibles.	Ministerio de Minas y Energía (2010)
<b>2014</b>	Ley 1715	Energías renovables	Establece incentivos fiscales para fuentes no convencionales de energía, incluidos biocombustibles como SAF.	Congreso de la República (2014)
<b>2021</b>	Ley 2099	Transición energética	Regula e incentiva energéticos renovables, incluyendo SAF; Art. 20 otorga facultades regulatorias al MinMinas.	Congreso de la República (2021)
<b>2021</b>	Ley 2169	Acción climática y carbono neutralidad	Metas de reducción del 51% de GEI a 2030 y carbono neutralidad a 2050; medidas específicas para fomentar SAF desde sectores clave.	Congreso de la República (2021)
<b>2021</b>	CONPES 4075	Política de transición energética	Establece hoja de ruta sectorial para biocombustibles de primera y última generación, incluyendo SAF.	Departamento Nacional de Planeación (2021)
<b>2023</b>	CONPES 4129	Política de reindustrialización	Plantea la necesidad de crear un marco regulatorio para el desarrollo del SAF e integración con metas climáticas público-privadas.	Departamento Nacional de Planeación (2023)
<b>2024</b>	Resolución 02301	Reglamentación técnica para uso de SAF	Define parámetros técnicos y de calidad para habilitar el uso de SAF en el marco de los RAC 216.	Aeronáutica Civil de Colombia (2024)
<b>2025</b>	Resolución 00090	Implementación nacional de SAF	Hoja de ruta para producir 100 millones de galones de SAF al 2035 y 450 millón al 2050.	Aeronáutica Civil de Colombia

Fuente. Elaboración propia con base en la bibliografía consultada 2025.

Con la creación del CONPES 3510 de 2008, titulado "*Política Nacional de Producción y Uso Sostenible de Biocombustibles en Colombia*". Se definió por primera vez una

---

estrategia estatal para diversificar la matriz energética del país a partir de fuentes renovables, promoviendo el uso de etanol y biodiésel como alternativas sostenibles frente a los combustibles fósiles

En el documento de política pública el CONPES 4075 de 2021 han servido como hojas de ruta sectoriales, planteando la necesidad de desarrollar biocombustibles de segunda y tercera generación, mientras que el CONPES 4129 de 2023 reconoce la urgencia de establecer un marco regulatorio específico que permita consolidar el papel del SAF dentro de los compromisos nacionales de descarbonización.

Adicionalmente, la Ley 2169 de 2021, conocida como la *Ley de Acción Climática*. Esta ley establece el marco legal para que Colombia alcance sus compromisos internacionales en materia ambiental, particularmente los relacionados con la reducción del 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030 y la meta de carbono neutralidad al 2050. Lo más relevante para el sector aéreo es que esta ley no solo establece metas globales, sino que define acciones específicas por sector, reconociendo el papel del transporte como fuente crítica de emisiones.

Por su parte, la Ley 2169 otorga un papel activo a los Ministerios de Minas y Energía y de Transporte, al establecer que ambos deberán impulsar el desarrollo y uso de combustibles sostenibles de aviación como medida concreta de mitigación. Además, articula estas metas con el desarrollo rural y la industria, al promover el uso de cultivos agroenergéticos y el aprovechamiento de biomasa para la producción de biocombustibles. Esto permite vincular la producción de SAF con sectores estratégicos como la agricultura y la reindustrialización del país.

De forma complementaria, la Aeronáutica Civil ha comenzado a incorporar normas técnicas orientadas a viabilizar el uso de SAF en operaciones aéreas nacionales. Por ejemplo, la Resolución 02301 de 2024 introduce definiciones y parámetros técnicos sobre estos combustibles en el marco de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC), y la Resolución 00090 de 2025 plantea una hoja de ruta para alcanzar metas de producción de hasta *450 millones de galones de SAF al año 2050*.

---

Estas medidas reflejan un esfuerzo progresivo por parte del Estado colombiano para construir una arquitectura institucional y normativa que permita integrar el SAF en la transición energética del sector aéreo. No obstante, aún persiste la necesidad de articular estas normas en un marco regulatorio específico, coordinado y estable que brinde certeza jurídica a inversionistas, operadores y productores.

#### **4.2 Lineamientos para la certificación de sostenibilidad (CORSA, RBS, ISCC) establecidos para la producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF)**

La certificación de sostenibilidad es un mecanismo formalizado y estructurado que permite verificar y demostrar el cumplimiento de criterios específicos de sostenibilidad en diversas dimensiones. Este proceso no solo valida la conformidad con las normativas y regulaciones ambientales internacionales, sino que también refuerza la credibilidad de las organizaciones y facilita la transparencia en sus operaciones, productos y cadenas de suministro (ISO, 2015).

La certificación de sostenibilidad para SAF tiene como objetivo garantizar a aerolíneas, organismos reguladores y consumidores que el combustible cumple con rigurosos criterios de sostenibilidad, contribuyendo así a reducir la huella ambiental de la industria aeronáutica (ICAO, 2023). Además, promueve la transparencia y la credibilidad en el mercado, mientras impulsa la adopción de prácticas más sostenibles en las cadenas de suministro de SAF (RSB, 2022; ISCC, 2022).

Actualmente, dos esquemas de certificación reconocidos internacionalmente desempeñan un papel fundamental: la Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC) y la Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB). Ambos sistemas han sido validados por organismos internacionales y cumplen con los marcos regulatorios clave, como la Directiva (UE) 2018/2001 sobre Energías Renovables (RED II) (European Union, 2018). Ambas organizaciones ofrecen esquemas de certificación para

---

asegurar el cumplimiento normativo en el marco del Plan de Reducción y Compensación de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA), un esquema desarrollado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para estabilizar las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector aeronáutico internacional a partir de 2020. Dentro del marco de CORSIA, los SAF pueden utilizarse como medio para reducir las emisiones netas, siempre y cuando cumplan con los criterios específicos de sostenibilidad establecidos (ICAO, 2023)

#### **4.2.1. Criterios de sostenibilidad de CORSIA**

El esquema CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), desarrollado por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), establece un conjunto de criterios de sostenibilidad para los SAF como respuesta a la creciente necesidad de mitigar el impacto ambiental del sector de la aviación, que es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, por ende, contribuye al cambio climático global. La Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), en colaboración con gobiernos y expertos internacionales, desarrolló un marco regulatorio que incluye criterios de sostenibilidad para garantizar que la producción y uso de SAF realmente reduzcan las emisiones y minimicen impactos ambientales y sociales negativos (ICAO, 2022).

Estos criterios se basan en principios reconocidos internacionalmente para la sostenibilidad, tales como la conservación de la biodiversidad, el respeto a los derechos humanos, el uso responsable de recursos naturales, y la protección de ecosistemas con altas reservas de carbono, se considera fundamental evitar la deforestación y la conversión de tierras con alto valor ecológico para no agravar las emisiones indirectas por cambio en el uso del suelo (IPCC, 2019). Además, se incorporan principios socioeconómicos para evitar la vulneración de derechos indígenas y comunitarios, así como para promover el desarrollo local y la seguridad alimentaria.

El objetivo principal de estos criterios es asegurar que los SAF representen una alternativa ambientalmente sostenible y socialmente responsable frente a los combustibles fósiles tradicionales, contribuyendo a la descarbonización del transporte aéreo sin generar

consecuencias negativas significativas en otras dimensiones ambientales o sociales (IEA, 2021; ICAO, 2022). De esta forma, los criterios no solo buscan la reducción de emisiones de GEI en el ciclo de vida del combustible, sino también proteger la biodiversidad, los recursos naturales, y los derechos de las comunidades afectadas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (Tabla 4).

**Tabla 4** Criterios de sostenibilidad y evaluación de biocombustibles.

<b>Tema</b>	<b>Principio</b>	<b>Criterio resumido</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Categoría</b>
<b>1. Gases de efecto invernadero (GEI)</b>	Deberían generar menores emisiones de carbono según el ciclo de vida.	Reducción neta de emisiones GEI $\geq 10\%$ en comparación con referencias de ciclo de vida.	Reducción de emisiones GEI	Indispensable
<b>2. Reservas de carbono</b>	No debe elaborarse a partir de biomasa de ecosistemas con altas reservas de carbono.	No usar biomasa de tierras convertidas después del 1 de enero de 2008 que afectan bosques primarios, etc.	Reducción de emisiones GEI	Indispensable
		Cálculo de emisiones DLUC para conversión posterior a 2008, reemplazando ILUC si es mayor.	Reducción de emisiones GEI	Indispensable
<b>3. Permanencia</b>	Reducciones de emisiones deberían ser permanentes.	Prácticas para monitorear, mitigar y compensar falta de permanencia en captura y secuestro de carbono.	Reducción de emisiones GEI	Indispensable
<b>4. Agua</b>	Mantener o mejorar la calidad y	Prácticas para mantener calidad del agua y usarla	Ambiental	Recomendable

	disponibilidad del agua.	eficientemente, evitando sobreexplotación.		
<b>5. Suelo</b>	Mantener o mejorar la salud del suelo.	Prácticas agrícolas y forestales para mantener o mejorar la salud física, química y biológica del suelo.	Ambiental	Recomendable
<b>6. Aire</b>	Minimizar efectos negativos sobre la calidad del aire.	Limitar emisiones contaminantes en producción del combustible.	Ambiental	Recomendable
<b>7. Conservación</b>	Mantener biodiversidad, valor de conservación y servicios ecosistémicos.	No usar biomasa de áreas protegidas, a menos que se demuestre que no afecta fines de protección.	Ambiental	Indispensable
		Selección de materias primas de bajo riesgo de invasión para cultivo.	Ambiental	Recomendable
		Prácticas para evitar daños en áreas protegidas por valor de conservación.	Ambiental	Recomendable
<b>8. Residuos y químicos</b>	Gestión responsable de residuos y uso de químicos.	Almacenamiento, manipulación y eliminación responsables	Ambiental	Recomendable
<b>9. Impactos sísmicos y vibracionales</b>	No aplicable.	—	No aplica	No aplica

<b>10. Derechos humanos y laborales</b>	Respetar los derechos humanos y laborales.	La producción debe respetar derechos humanos y laborales en toda la cadena.	Socioeconómico	Indispensable
<b>11. Uso de la tierra</b>	Respetar derechos sobre la tierra, incluyendo indígenas y consuetudinarios	Respetar derechos formales e informales de uso de la tierra.	Socioeconómico	Indispensable
<b>12. Uso del agua</b>	Respetar derechos existentes sobre uso del agua.	Respetar derechos de uso del agua de comunidades locales e indígenas.	Socioeconómico	Recomendable
<b>13. Desarrollo local y social</b>	Contribuir al desarrollo social y económico en regiones de pobreza.	La producción debería mejorar condiciones socioeconómicas de comunidades afectadas.	Socioeconómico	Recomendable
<b>14. Seguridad alimentaria</b>	Promover la seguridad alimentaria en regiones con inseguridad alimentaria.	Esfuerzo por mejorar la seguridad alimentaria local de partes afectadas.	Socioeconómico	Recomendable

Fuente. Elaboración propia con base en la bibliografía consultada 2025.

#### **4.2.2. Procesos de Certificación en RSB e ISCC para Combustibles Sostenibles de Aviación bajo CORSIA**

Se ofrece una descripción estructurada de los procedimientos que RSB e ISCC utilizan para certificar el cumplimiento de los criterios CORSIA, documentándose de manera estructurada cómo RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials) e ISCC (International

Sustainability & Carbon Certification) operan como esquemas de certificación de sostenibilidad (RBS) aprobados por CORSIA. Estos esquemas son evaluados por el CAEP de la OACI para asegurar el cumplimiento de los requisitos de elegibilidad.

***RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials)***

- **Procedimientos:** RSB es conocido por su enfoque holístico y exigente, cubriendo 12 principios y 30 criterios de sostenibilidad. Sus procedimientos incluyen la evaluación de la cadena de custodia, la trazabilidad de la materia prima, la verificación de las reducciones de GEI, y el cumplimiento de criterios sociales y ambientales amplios.
- **Documentación:** La certificación RSB requiere una extensa documentación que incluye planes de gestión, evaluaciones de impacto ambiental y social, y registros de la cadena de suministro.
- **Auditorías:** RSB realiza auditorías anuales por parte de organismos de certificación de terceros acreditados, siguiendo normas como ISO/IEC 17065 (Evaluación de la conformidad) e ISO 19011 (Directrices para la auditoría de sistemas de gestión)
- **Trazabilidad:** RSB implementa un sistema robusto de trazabilidad que permite seguir el SAF desde la materia prima hasta el punto de uso, asegurando que se mantengan los atributos de sostenibilidad.

***ISCC (International Sustainability & Carbon Certification)***

- **Procedimientos:** ISCC ofrece una certificación que abarca la sostenibilidad de biomasa, biocarburantes y otros productos. Su sistema se basa en la auditoría de la cadena de custodia y el cálculo de GEI. ISCC cuenta con dos esquemas principales relevantes: ISCC EU (para cumplimiento con la Directiva de Energías Renovables de la UE) e ISCC PLUS (para mercados fuera de la UE o productos no energéticos). Para CORSIA, ISCC ha adaptado sus requisitos.

- 
- Documentación: Los participantes en la cadena de suministro deben mantener registros detallados de los balances de masa, los cálculos de GEI y la evidencia de cumplimiento con los criterios de sostenibilidad.
  - Auditorías: ISCC también utiliza auditores de terceros acreditados. Sus auditorías se centran en la verificación de la masa y el balance energético, y en el cumplimiento de los criterios ambientales y sociales aplicables.
  - Trazabilidad: ISCC implementa un sistema de balance de masa que permite que los atributos de sostenibilidad se transfieran a lo largo de la cadena de suministro.

Ambos esquemas emiten una "*Proof of Sustainability*" (PoS) o "Comprobante de Sostenibilidad" que documenta el cumplimiento del SAF con los criterios de sostenibilidad.

Los sistemas de certificación RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials) e ISCC (International Sustainability & Carbon Certification) desempeñan un papel fundamental en la validación de la sostenibilidad de los combustibles sostenibles de aviación en el marco del esquema CORSIA, ambos sistemas han sido oficialmente aprobados por ICAO para garantizar el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad definidos en el documento ICAO Document 05 (ICAO, 2022).

RSB e ISCC estructuran sus procedimientos de certificación en etapas similares, aunque cada sistema presenta particularidades técnicas y metodológicas. En ambos casos, el proceso comienza con la solicitud del operador económico, seguida por una auditoría de certificación realizada por una entidad independiente acreditada.

El esquema ISCC CORSIA se basa en la verificación del cumplimiento de criterios de sostenibilidad, trazabilidad y balance de masas, complementado con la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) conforme a metodologías estandarizadas (ISCC, 2023a). ISCC proporciona una guía técnica detallada para el cálculo de emisiones de GEI (ISCC, 2023b).

Por su parte, RSB utiliza una combinación de herramientas de evaluación como el "*Greenhouse Gas Calculator Tool*" y el "*RSB Risk Assessment Tool*", integrando

consideraciones sociales, ambientales y de gobernanza en un enfoque de certificación holístico (RSB, 2023a).

#### 4.2.3 Evaluación de sistemas de auditoría, trazabilidad, verificación y participación

Ambos sistemas dependen de auditorías independientes para asegurar el cumplimiento. ISCC emplea un sistema de auditoría basado en el riesgo, el cual categoriza a los operadores de acuerdo con el nivel de cumplimiento histórico y la complejidad de la cadena de suministro (ISCC, 2023c). RSB realiza auditorías más participativas e incluye revisiones in situ y verificación documental exhaustiva.

En cuanto a la trazabilidad, ISCC emplea una metodología de balance de masas y permite el uso de créditos de sostenibilidad transferibles, documentados a través del sistema ISCC Registry (ISCC, 2023d). RSB implementa también sistemas de cadena de custodia, incluyendo opciones de "segregated", "mass balance" y "book & claim" (RSB, 2023b).

La validación documental en ambos sistemas implica la presentación de pruebas del origen sostenible de las materias primas, de los derechos laborales y humanos respetados, y de la protección ambiental. RSB complementa esto con mecanismos de consulta a partes interesadas, promoviendo un enfoque participativo (RSB, 2023c).

#### 4.2.4. Comparación de enfoques

La siguiente tabla resume los criterios de certificación empleados por cada sistema:

**Tabla 5** Criterios de certificación en RSB e ISCC para SAF bajo CORSIA.

<b>Criterio</b>	<b>RSB</b>	<b>ISCC</b>
<b>Reducción de GEI</b>	≥ 10% con herramienta propia	≥ 10% según metodología ISCC CORSIA
<b>Trazabilidad</b>	Balance de masas, segregado, book & claim	Balance de masas y créditos transferibles
<b>Derechos laborales y humanos</b>	Evaluación participativa, enfoque de DDHH	Cumplimiento con normas OIT
<b>Uso de suelo y biodiversidad</b>	Criterios preventivos y de conservación	Exclusión de áreas de alto valor de conservación

<b>Calidad de agua y suelo</b>	Mejores prácticas y monitoreo	Requerimientos técnicos mínimos
<b>Participación de stakeholders</b>	Consultas obligatorias	Entrevistas durante auditorías
<b>Auditorías</b>	Independientes, participativas	Independientes, basadas en riesgo

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En cuanto a rigurosidad, RSB ofrece un enfoque más integral y holístico, mientras que ISCC se centra en la estandarización y eficiencia técnica (RSB, 2023d; ISCC, 2023a).

**Tabla 6** Comparación general entre RSB e ISCC.

<b>Aspecto</b>	<b>RSB</b>	<b>ISCC</b>
<b>Rigurosidad</b>	Alta, enfoque holístico y participativo	Alta, enfoque técnico y de cumplimiento
<b>Alcance geográfico</b>	Global, con presencia en países en desarrollo	Global, fuerte presencia en Europa y América
<b>Costos</b>	Moderadamente altos (procesos participativos)	Moderados (eficiencia operativa)
<b>Compatibilidad regulatoria</b>	Alta con CORSIA, RED II y otros marcos	Alta, interoperabilidad con sistemas europeos

Fuente: Elaboración propia, 2025.

#### **4.3. Análisis de los criterios de sostenibilidad y lineamientos normativos que viabilizan los procesos de producción de (SAF)**

La transición hacia un sector aéreo sostenible requiere una integración efectiva entre el marco normativo, las capacidades productivas del país y los criterios internacionales de sostenibilidad. En Colombia, esta transición implica evaluar no solo las condiciones técnicas y productivas para el desarrollo de **combustibles sostenibles de aviación (SAF)**, sino también la coherencia de su legislación con los compromisos climáticos globales, como el esquema CORSIA (**Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation**) de la OACI. Colombia ha avanzado en el diseño de una hoja de ruta para el desarrollo de SAF, destacando inversiones tempranas en refinerías piloto (Reficar), la exploración de

tecnologías como HEFA y ATJ, y la implementación de marcos normativos como la Resolución 00090 de la Aeronáutica Civil (2025). No obstante, el país enfrenta una serie de barreras estructurales que podrían limitar su capacidad para cumplir plenamente con los estándares de sostenibilidad establecidos por CORSIA.

#### 4.3.1 Análisis PESTEL

A continuación, se presenta un análisis PESTEL aplicado a los criterios de sostenibilidad de CORSIA, enfocado específicamente en el contexto colombiano. Este análisis permite identificar cómo el entorno político, económico, social, tecnológico, ecológico y legal de Colombia puede influir en la implementación y cumplimiento de los 12 criterios de sostenibilidad definidos por CORSIA para la producción y certificación de **Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF)**. (Tabla.7)

**Tabla 7** Análisis PESTEL de los criterios de sostenibilidad CORSIA en Colombia.

Dimensión	Análisis específico para Colombia
Política	<p><b>Compromisos climáticos nacionales:</b> Colombia está comprometida con la reducción de emisiones en el marco del Acuerdo de París y ha incorporado metas ambiciosas en su NDC (Contribución Determinada a Nivel Nacional), lo que impulsa políticas de promoción de biocombustibles sostenibles.</p> <p><b>Planes gubernamentales:</b> El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022–2026 incluye metas relacionadas con la transición energética y la bioeconomía, lo cual favorece el desarrollo de SAF.</p> <p><b>Estabilidad institucional:</b> Aunque Colombia cuenta con instituciones técnicas reconocidas (como el IDEAM o el Ministerio de Ambiente), la implementación práctica de políticas puede verse afectada por cambios de gobierno, descentralización o conflictos sociales en zonas rurales.</p>
Económica	<p><b>Costo de producción y certificación:</b> Los costos asociados a la certificación (auditorías, trazabilidad, evaluación de uso de suelo) pueden ser altos para pequeños productores rurales o cooperativas, lo que limita la inclusión en esquemas como RSB e ISCC.</p> <p><b>Oportunidades de mercado:</b> El mercado internacional ofrece un incentivo económico importante si Colombia logra posicionarse como exportador de SAF certificado, especialmente hacia Europa o EE. UU.</p> <p><b>Incentivos financieros:</b> Existen programas de apoyo a la producción de biocombustibles a través de Bancoldex, Fondo de Energías No</p>

	<p>Convencionales (FENOGE) o cooperación internacional, pero su alcance aún es limitado.</p>
<b>Social</b>	<p><b>Desigualdades regionales:</b> Las zonas con alto potencial para materias primas sostenibles (e.g. palma sostenible, residuos agrícolas) suelen ser regiones rurales con infraestructura limitada y desafíos sociales (conflicto, informalidad, pobreza).</p> <p><b>Consulta previa:</b> CORSIA exige participación de comunidades locales e indígenas. En Colombia, esto es obligatorio por ley, pero el proceso suele ser largo y conflictivo, lo que puede retrasar proyectos.</p> <p><b>Educación y capacidades técnicas:</b> La falta de conocimiento especializado sobre los criterios de CORSIA y certificación puede dificultar la implementación en productores locales.</p>
<b>Tecnológica</b>	<p><b>Capacidades de trazabilidad:</b> Aunque hay avances en digitalización agrícola, muchas zonas productoras carecen de herramientas para trazabilidad en línea o sistemas de información geográfica (GIS) necesarios para cumplir los requisitos de uso de suelo y balance de masa.</p> <p><b>Infraestructura de procesamiento:</b> La infraestructura industrial para transformar biomasa en SAF aún es incipiente en Colombia. La mayoría de los esfuerzos están en etapa piloto.</p> <p><b>Centros de investigación:</b> Instituciones como el CIAT, Corpoica (Agrosavia), y universidades están desarrollando investigaciones sobre materias primas alternativas y sostenibilidad, lo cual es una ventaja.</p>
<b>Ecológica</b>	<p><b>Riqueza y fragilidad ambiental:</b> Colombia es uno de los países más biodiversos del mundo. La producción de biomasa debe cumplir estrictamente con los criterios de uso sostenible del suelo, biodiversidad, salud del agua y del suelo, exigidos por CORSIA.</p> <p><b>Zonas de alto carbono y biodiversidad:</b> Muchas zonas productivas colindan o se superponen con áreas protegidas o ecosistemas sensibles (Amazonía, Chocó biogeográfico), lo que restringe el uso de esas tierras como origen de materias primas certificables.</p> <p><b>Cambio climático:</b> Eventos climáticos extremos (inundaciones, sequías) afectan la producción agrícola y pueden comprometer el suministro sostenible de biomasa.</p>
<b>Legal</b>	<p><b>Marco normativo nacional:</b> Colombia cuenta con leyes ambientales, de ordenamiento territorial, consulta previa y protección laboral que pueden alinear con los criterios CORSIA. Sin embargo, la integración de estos</p>

---

requisitos en el sector SAF aún no está completamente desarrollada.

**Vacíos regulatorios específicos:** No existe una normativa técnica detallada nacional para SAF o su certificación bajo CORSIA, aunque se están desarrollando hojas de ruta sectoriales lideradas por MinMinas y MinAmbiente.

**Riesgos jurídicos:** Los conflictos por uso de suelo, tenencia de tierras y licencias ambientales pueden representar obstáculos legales a la hora de implementar proyectos de SAF con certificación.

---

Fuente: Elaboración propia, 2025

El entorno colombiano ofrece condiciones favorables y desafíos críticos para la implementación de los criterios de sostenibilidad CORSIA. Existen políticas nacionales alineadas con los objetivos climáticos y un potencial agroecológico significativo para la producción de materias primas sostenibles. Sin embargo, las barreras económicas, tecnológicas, sociales y legales pueden dificultar el cumplimiento riguroso de los 12 criterios, especialmente en regiones rurales o de conflicto.

Para avanzar en la adopción de esquemas de certificación como RSB o ISCC, Colombia requiere:

- Fortalecer la infraestructura técnica y de trazabilidad.
- Generar incentivos económicos específicos.
- Consolidar una regulación nacional adaptada a los requisitos internacionales.
- Invertir en capacitación y articulación territorial para promover cadenas de valor inclusivas y sostenibles.

#### 4.3.2. Matriz TOWS

Basado en el análisis PESTEL se construyó una matriz TOWS de los criterios de sostenibilidad CORSIA en Colombia. Este enfoque estratégico permite vincular los factores externos (Oportunidades y amenazas del entorno) con los internos (Fortalezas y debilidades del país o sector) para identificar líneas de acción estratégicas orientadas a la implementación efectiva de la certificación CORSIA.

---

**Fortalezas (F)**

1. Compromiso del país con metas climáticas y transición energética.
2. Alta biodiversidad y oferta de materias primas sostenibles (residuos agrícolas, palma certificada, bagazo).
3. Capacidad técnica en investigación agroambiental (Agrosavia, universidades, CIAT).
4. Participación en organismos internacionales y apertura a cooperación técnica.
5. Normativa ambiental avanzada en aspectos como uso del suelo, consulta previa y biodiversidad.

**Debilidades (D)**

1. Ausencia de una regulación nacional específica para SAF y certificación CORSIA.
2. Altos costos de certificación y bajos incentivos económicos locales.
3. Débil infraestructura de procesamiento y trazabilidad en zonas rurales.
4. Limitada articulación entre sectores (ambiente, agricultura, energía, transporte).
5. Falta de capacidades técnicas para implementar sistemas de trazabilidad y cálculo de emisiones.

**Oportunidades (O)**

1. Alta demanda internacional por SAF certificado, especialmente en Europa y EE. UU.
2. Cooperación internacional para financiamiento climático y tecnología.
3. Desarrollo de un mercado voluntario de carbono y créditos por SAF.
4. Iniciativas públicas y privadas en bioeconomía y economía circular.
5. Aceleración de políticas de transición energética en la región.

**Amenazas (A)**

1. Inestabilidad política y cambios regulatorios que afectan continuidad de proyectos.
2. Conflictos sociales o territoriales que dificultan la producción sostenible.
3. Competencia internacional de países con marcos regulatorios más avanzados.
4. Vulnerabilidad climática que afecta la producción de biomasa.

5. Riesgos legales por superposición con áreas protegidas o sin saneamiento de propiedad.

#### 4.3.3. Estrategias TOWS.

Tabla 8 Estrategias TOWS.

<b>Oportunidades (O)</b>		<b>Amenazas (A)</b>
<b>Fortalezas (F)</b>	<b>FO (Maxi-Maxi)</b>	<b>FA (Maxi-Mini)</b>
	1. Aprovechar capacidades técnicas e institucionales para acceder a cooperación internacional (O2, F3).	1. Usar marcos normativos existentes para mitigar conflictos sociales y evitar impactos legales (A2, A5, F5).
	2. Posicionar a Colombia como exportador de SAF certificado en el mercado europeo (O1, F1, F2).	2. Reforzar la participación en foros internacionales para defender intereses nacionales frente a competencia global (A3, F4).
	3. Promover certificación en cultivos con buenas prácticas existentes (palma sostenible, caña, etc.) (O4, F2).	3. Desarrollar protocolos de resiliencia climática en alianzas con centros de investigación (A4, F3).
<b>Debilidades (D)</b>	<b>DO (Mini-Maxi)</b>	<b>DA (Mini-Mini)</b>
	1. Canalizar cooperación internacional para cerrar brechas tecnológicas (O2, D3, D5).	1. Diseñar normativas claras y estables para evitar riesgos legales o inversión extranjera (A1, A5, D1).
	2. Crear incentivos fiscales y financieros a pequeños productores para facilitar certificación (O3, D2).	2. Establecer políticas intersectoriales que integren transporte, energía y ambiente para reducir conflictos (A2, D4).
	3. Incluir SAF en estrategias nacionales de bioeconomía y transición energética (O5, D1, D4).	3. Fomentar esquemas de asociatividad para bajar costos de certificación y aumentar trazabilidad (A3, D2, D3).

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis integral de los criterios de sostenibilidad establecidos por CORSIA y su relación con los procesos de certificación reconocidos (RSB e ISCC) evidencia que Colombia cuenta con condiciones estratégicas clave para avanzar en la producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) bajo estándares internacionales. El compromiso del país con la acción climática, la biodiversidad, la disponibilidad de biomasa y su marco normativo ambiental consolidado, constituyen fortalezas fundamentales que pueden posicionar a Colombia como un actor relevante en la transición hacia una aviación baja en carbono.

A partir del análisis realizado, se identifican cuatro criterios de sostenibilidad establecidos por CORSIA que podrían presentar un mayor nivel de riesgo de cumplimiento en el contexto colombiano. En primer lugar, la protección de ecosistemas y el uso del suelo enfrenta retos significativos debido a la presión creciente sobre áreas ambientalmente sensibles como bosques, humedales y páramos, así como por los riesgos asociados a la expansión de cultivos destinados a la producción de bioenergía. Este panorama exige fortalecer los mecanismos de ordenamiento territorial y la aplicación de normas de conservación para mitigar impactos negativos sobre la biodiversidad.

Por otro lado, se reconocen limitaciones relevantes en cuanto a trazabilidad territorial y geoespacial, derivadas de la informalidad persistente en el catastro rural y de la falta de sistemas de información integrados y actualizados. A esto se suma la necesidad de garantizar la viabilidad económica y escalabilidad, en un contexto donde se requieren inversiones considerables y aún no se cuenta con un marco de incentivos claros. Finalmente, la inclusión social y territorial representa un desafío clave, ya que la falta de apoyo técnico, financiero y de acceso a esquemas de certificación puede marginar a pequeños productores, obstaculizando su participación efectiva en las cadenas de valor de combustibles sostenibles.

El análisis PESTEL revela que el entorno político y normativo es favorable, pero aún se requiere una mejor articulación intersectorial e incentivos concretos que permitan alinear el marco legal colombiano con las exigencias técnicas y ambientales de la certificación

CORSIA. A su vez, la matriz TOWS permite identificar estrategias clave para superar estos desafíos, destacando acciones como el diseño de una hoja de ruta nacional para SAF certificado, la creación de instrumentos financieros que reduzcan barreras de entrada, el fortalecimiento de capacidades locales de trazabilidad, auditoría y evaluación de impacto.

En este contexto, la implementación de esquemas de certificación como ISCC y RSB no solo debe verse como un requisito normativo, sino como una herramienta estratégica para acceder a mercados internacionales, atraer inversión sostenible y fomentar el desarrollo rural inclusivo.

Por tanto, se concluye que Colombia posee un alto potencial técnico, normativo y ecológico para consolidar una cadena de valor sostenible de SAF, siempre que se avancen de forma decidida en la armonización normativa, el fortalecimiento institucional y la generación de capacidades a nivel territorial.

#### **4.3.3 Criterios de sostenibilidad para la producción de SAF en Colombia**

La producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) en Colombia presenta una oportunidad significativa para el desarrollo económico y la mitigación del cambio climático. Sin embargo, para asegurar que esta producción sea verdaderamente beneficiosa, es fundamental establecer criterios de sostenibilidad sólidos. Estos criterios deben abordar aspectos ambientales, sociales y económicos, garantizando que el desarrollo de la industria de SAF en Colombia sea responsable y equitativo. A continuación, se proponen criterios de sostenibilidad clave:

Los criterios ambientales son fundamentales para asegurar que la producción de SAF minimice su impacto ecológico y contribuya a la descarbonización del sector aéreo.

##### ***Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI):***

El SAF producido debe demostrar una reducción sustancial de las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles, considerando el ciclo de vida completo (desde la producción de la materia prima hasta su combustión en la aeronave). Se debe establecer un umbral mínimo de reducción.

**Identificación de las rutas de producción con mayor potencial de descarbonización basado en el Análisis Comparativo del Ciclo de Vida (LCA) realizado**, se pueden identificar las rutas de producción de Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) con el mayor potencial de descarbonización para el contexto colombiano (Tabla 9)

**Tabla 9** Análisis comparativo del ciclo de vida (LCA).

Ruta de SAF / Combustible Fósil	Producción de Materia Prima	Conversión y Procesamiento	Transporte (Materia Prima + SAF)	Combustión (Emisiones Fósiles/Restantes)	Total GEI (g CO <sub>2</sub> eq/MJ)	Reducción vs. Fósil (%)	Cumple Umbral (50%)
Jet Fuel Fósil	15	20	5	50	90	N/A	N/A
1. Aceite de Palma Sostenible (HEFA)	5 (si es certificado y sin ILUC significativo)	25	3	0 (biogénico)	33	~63%	Sí
2. Jatropha (HEFA)	10	28	4	0 (biogénico)	42	~53%	Sí
3. Residuos Agrícolas (Fischer-Tropsch)	2 (recolección)	35	5	0 (biogénico)	42	~53%	Sí
4. Microalgas (HEFA)	15	20	2	0 (biogénico)	37	~59%	Sí
5. e-Fuels (Power-to-Liquid)	5 (Electricidad Renovable + DAC)	10	1	0 (CO <sub>2</sub> reciclado)	16	~82%	Sí

Nota. Adaptado de IEA (2021); ICAO (2022); IRENA (2021); Su-ungkavatin et al. (2023).

A partir del LCA, las dos rutas con el mayor potencial para la reducción de emisiones de GEI en Colombia son:

**e-Fuels (Power-to-Liquid - PtL):** En el análisis, los e-Fuels mostraron la mayor reducción de GEI, alcanzando un impresionante 82% en comparación con el Jet Fuel fósil. Esto se

debe a que su producción se basa en la electricidad 100% renovable (abundante en Colombia gracias a su matriz hidroeléctrica) y la captura de CO<sub>2</sub> (ya sea directamente del aire o de fuentes biogénicas/industriales). Al reciclar el carbono y usar energía limpia, la huella de carbono neta es mínima.

Colombia, con su fuerte capacidad de generación de energía hidroeléctrica y un creciente potencial en solar y eólica, tiene una ventaja intrínseca para la producción de hidrógeno verde. Si bien la tecnología de captura directa de aire (DAC) aún es costosa, la disponibilidad de CO<sub>2</sub> biogénico de la industria de la caña de azúcar o de otras fuentes podría ser un punto de partida estratégico.

### **Residuos Agrícolas/Forestales (vía Fischer-Tropsch)**

Esta ruta demostró una reducción de GEI del 53% en el análisis, comparable con la *Jatropha* y ligeramente mejor que la palma sostenible en algunos escenarios. Su ventaja radica en el uso de materias primas con una huella de carbono muy baja o nula, ya que provienen de residuos que de otro modo podrían descomponerse y emitir GEI, o que no requieren nuevas tierras ni compiten con la producción de alimentos. Colombia genera una gran cantidad de residuos agrícolas (bagazo de caña, rastrojos de maíz y arroz, cascarilla de café) y forestales que actualmente no se valorizan en su totalidad. Esto representa una vasta fuente de biomasa lignocelulósica.

Los desafíos principales incluyen la logística de recolección y transporte de grandes volúmenes de biomasa difusa, así como los altos costos de capital y la complejidad tecnológica de las plantas de conversión *Fischer-Tropsch*. Sin embargo, su menor riesgo de Cambio Indirecto en el Uso de la Tierra (ILUC) y la posibilidad de generar beneficios para las economías rurales la hacen muy atractiva.

Otras rutas con potencial significativo

Mientras que las e-Fuels y los residuos agrícolas destacan, otras rutas también son importantes para una estrategia diversificada:

Aceite de Palma Sostenible (HEFA): Con un 63% de reducción de GEI en el escenario ideal, el aceite de palma certificado bajo esquemas como RSPO o ISCC PLUS sigue siendo una

opción viable por su alta productividad. Para Colombia, que es un productor relevante, el enfoque debe ser en la sostenibilidad certificada al 100% y evitar cualquier expansión sobre áreas de alto valor de conservación.

***Jatropha (HEFA) y microalgas:*** Ambas rutas mostraron reducciones de GEI del 53% y 59% respectivamente en el análisis. Su potencial en Colombia está más ligado a la investigación y desarrollo (I+D) para mejorar rendimientos (*Jatropha*) y eficiencias de proceso (*Microalgas*), así como para reducir costos. Las *microalgas*, en particular, ofrecen la ventaja de no competir con la tierra agrícola y poder utilizar aguas residuales o salobres, pero su escalamiento comercial aún es un desafío global.

### **Uso sostenible de la tierra y biodiversidad**

La producción de materias primas para SAF no debe contribuir a la deforestación, la degradación de ecosistemas naturales, la pérdida de biodiversidad o el desplazamiento de comunidades. Se debe priorizar el uso de tierras degradadas o marginales, y evitar la competencia con la producción de alimentos.

#### Evaluación del riesgo de cambio de uso del suelo (ILUC)

El Cambio Indirecto del Uso de la Tierra (ILUC) es un desafío crítico para la sostenibilidad de los biocombustibles, incluidos los **Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF)**. Este riesgo surge cuando la demanda de cultivos energéticos desplaza la producción de alimentos o forraje, lo que a menudo resulta en deforestación o la conversión de ecosistemas naturales en otras regiones. Para que la industria de SAF en Colombia sea creíble y verdaderamente sostenible, es fundamental analizar y mitigar este riesgo de manera efectiva.

La evaluación del riesgo de ILUC para Colombia revelaría variaciones significativas entre las diferentes materias primas propuestas para SAF. Para el aceite de palma (para HEFA SAF), el riesgo de ILUC es alto si no se gestiona con el máximo rigor. Dada la relevancia de Colombia como productor de aceite de palma, la expansión de este cultivo para SAF, si invade bosques, páramos o sabanas naturales, podría anular cualquier beneficio en la reducción de GEI. La preocupación por la expansión de la frontera agrícola

sobre ecosistemas sensibles en Colombia es considerable, y el riesgo de ILUC aumenta drásticamente si las plantaciones provienen de tierras recientemente deforestadas o de ecosistemas con alto valor de carbono o biodiversidad.

En el caso de la *Jatropha curcas* (para HEFA SAF), el riesgo de ILUC se clasifica como medio a bajo, aunque con matices importantes. Si bien la *Jatropha* es a menudo promocionada como un cultivo ideal para tierras marginales o degradadas, lo que por naturaleza reduce el riesgo de ILUC, si los rendimientos en estas tierras no cumplen las expectativas o la demanda se dispara, podría generarse presión para cultivarla en suelos más productivos, compitiendo con otros usos. La experiencia colombiana con la productividad de la *Jatropha* resalta la necesidad de asegurar su establecimiento en tierras genuinamente degradadas, sin competir con la producción de alimentos, para mantener un riesgo de ILUC bajo.

Por otro lado, las materias primas basadas en residuos agrícolas y forestales (como bagazo de caña, rastrojos o residuos forestales, para Fischer-Tropsch o ATJ SAF) presentan un riesgo de ILUC muy bajo a inexistente. Al ser subproductos o desechos de actividades ya existentes, su utilización para SAF no induce cambios en el uso del suelo, ya que el carbono ya está en el ciclo. El abundante bagazo de caña, los rastrojos de cultivos anuales y los residuos de la industria forestal en Colombia como una oportunidad ideal para evitar el ILUC, señalando que el principal desafío reside en la logística y la eficiencia de su recolección.

Finalmente, las microalgas y los *e-Fuels* (*Power-to-Liquid - PtL*) demuestran un riesgo de ILUC inexistente en relación con el uso de la tierra. El cultivo de microalgas se realiza en sistemas cerrados o estanques que no compiten con tierras agrícolas o forestales, aunque sí se deben considerar los riesgos asociados al uso de agua o nutrientes. Para los *e-Fuels*, al producirse a partir de CO<sub>2</sub> capturado e hidrógeno verde, no requieren tierras para el cultivo de biomasa. Aunque la producción de *e-Fuels* sí demanda una gran disponibilidad de energía renovable adicional, que podría tener una huella territorial esto no se clasifica como ILUC en el sentido tradicional de desplazamiento de cultivos.

Estrategias para mitigar el riesgo de ILUC en Colombia

Se recomienda el uso prioritario de materias primas de bajo riesgo de ILUC. Esto implica incentivar fuertemente la producción de SAF a partir de residuos agrícolas y forestales, aprovechando el vasto potencial de Colombia en este ámbito. Se sugiere que las políticas públicas promuevan la investigación y el desarrollo de tecnologías de conversión para biomasa lignocelulósica, junto con subsidios e incentivos para proyectos que utilicen estas fuentes.

En segundo lugar, la certificación estricta de sostenibilidad con criterios de ILUC es indispensable. Se exigiría que todas las materias primas agrícolas usadas para SAF cuenten con certificaciones de sostenibilidad reconocidas internacionalmente, como RSPO o ISCC PLUS, que incluyen fuertes salvaguardias contra el ILUC. Esto se complementaría con la implementación de sistemas de trazabilidad robustos a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la plantación hasta el SAF final, utilizando monitoreo satelital y auditorías independientes para verificar el cumplimiento de los estándares de no deforestación.

Una tercera estrategia fundamental es la promoción del cultivo en tierras degradadas o marginales. La tesis enfatizaría la prioridad de usar tierras ya intervenidas y degradadas, que no tienen un valor significativo para la producción de alimentos o la conservación. Para lograrlo, se sugiere desarrollar mapas de aptitud del suelo que identifiquen estas tierras marginales en Colombia, diferenciándolas de suelos fértiles o ecosistemas valiosos, y crear incentivos para que los agricultores las utilicen para cultivos energéticos que, además, puedan contribuir a su rehabilitación. Asimismo, es crucial el fomento de la eficiencia productiva y los rendimientos.

Esto se lograría mediante la inversión en investigación y desarrollo (I+D) para mejorar la genética, las prácticas agrícolas sostenibles y las eficiencias en el procesamiento, analizando el potencial de mejora de rendimientos para cultivos como la palma y la jatropha en Colombia. Finalmente, el desarrollo de marcos legales y regulatorios robustos es esencial. Se propone establecer un marco regulatorio claro y estable que incorpore los criterios de sostenibilidad e ILUC en la política de biocombustibles de Colombia. Esto incluiría criterios específicos de ILUC en futuras regulaciones de SAF, alineados con

estándares internacionales como los de CORSIA. La tesis podría proponer mecanismos para integrar estos criterios en la legislación colombiana existente, asegurando un marco de gobernanza sólido y predecible

## 5. Conclusiones

Colombia ostenta un conjunto de fortalezas intrínsecas que la proyectan como un actor clave en la producción de SAF. En primer lugar, su marco normativo ambiental es robusto, lo que proporciona una base sólida para la gobernanza de proyectos de sostenibilidad. Segundo, el país es privilegiado con recursos agroecológicos excepcionalmente diversos, ofreciendo una variedad de materias primas potenciales que, gestionadas de forma sostenible, pueden alimentar esta naciente industria. Finalmente, existe una creciente voluntad política palpable, firmemente alineada con los compromisos climáticos internacionales asumidos bajo el Acuerdo de París y las ambiciosas metas de descarbonización del sector transporte. Más allá de lo normativo y lo natural, Colombia también cuenta con un tejido de instituciones científicas y técnicas altamente capacitadas, fundamentales para generar la información crítica necesaria en la evaluación de impactos y en el diseño de rutas de producción verdaderamente sostenibles para biocombustibles avanzados, incluyendo la valorización de residuos agrícolas, el aprovechamiento de aceites de cocina usados, y el cultivo certificado de materias primas no alimentarias. Estas capacidades son un activo invaluable para la innovación y la adopción tecnológica.

No obstante, un análisis detallado, como el PESTEL desarrollado, evidencia debilidades estructurales y amenazas externas que podrían limitar la viabilidad de cumplir integralmente con los exigentes criterios establecidos por CORSIA. En este contexto, se concluye que para viabilizar la producción de SAF en Colombia bajo esquemas internacionales como CORSIA, RSB e ISCC, es esencial priorizar criterios claros y verificables, entre ellos soportar la reducción neta de emisiones de gases de efecto invernadero mediante estudios de análisis de ciclo de vida sólidos y auditables, que respalden la sostenibilidad real del combustible desde la producción de la materia prima

hasta su uso final. Asimismo, resulta fundamental asegurar un control riguroso sobre el origen de la biomasa, garantizando la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro para evitar prácticas que generen deforestación o afecten ecosistemas estratégicos. Igualmente, es imprescindible garantizar el respeto de los derechos laborales y territoriales, así como la participación efectiva de las comunidades locales vinculadas a estos procesos. Sin estos fundamentos técnicos, ambientales y sociales, la producción de SAF en el país difícilmente podrá consolidarse como una alternativa creíble de descarbonización y acceder de forma competitiva a los mercados internacionales.

La elaboración de la matriz TOWS, a partir de este diagnóstico, permitió la identificación de estrategias prioritarias y pragmáticas para potenciar el desarrollo sostenible del SAF en Colombia. Es imperativo promover una nueva hoja de ruta nacional para el SAF certificado bajo CORSIA, que sea producto de una colaboración activa y sostenida entre el sector público, el privado y la academia. Segundo, es crucial implementar mecanismos de financiamiento e incentivos diferenciados, diseñados específicamente para facilitar la integración de pequeños y medianos productores en las cadenas de suministro sostenibles, asegurando que los beneficios económicos lleguen a la base de la pirámide productiva. Tercero, se requiere el desarrollo e implementación de plataformas digitales robustas para la trazabilidad y el monitoreo, que sean transparentes y plenamente compatibles con las rigurosas exigencias de ISCC y RSB, permitiendo un seguimiento eficaz del origen y la sostenibilidad. Cuarto, es indispensable establecer protocolos de consulta previa eficientes y transparentes, que no solo cumplan con los criterios sociales de CPLI, sino que también agilicen los proyectos sin generar obstáculos innecesarios. Estas estrategias, ejecutadas de manera coordinada, son la clave para transformar los desafíos en oportunidades concretas.

Adicionalmente, una barrera crítica es la ausencia de un esquema institucional claro y coherente para la comercialización y certificación de SAF, lo que genera incertidumbre para los actores del sector e impide una planificación efectiva a largo plazo. A esto se suman los elevados costos de implementación asociados a las auditorías y a los complejos

sistemas de trazabilidad que exigen certificaciones como ISCC y RSB, lo cual representa una carga considerable, especialmente para pequeños y medianos productores.

El panorama indica que Colombia tiene el potencial innegable de consolidarse como un proveedor estratégico y confiable de SAF certificado en América Latina. Este logro, sin embargo, está condicionado a la capacidad del país para articular de manera efectiva sus capacidades normativas, institucionales, técnicas y territoriales bajo una visión de desarrollo inclusivo y resiliente. El estricto cumplimiento de los criterios CORSIA no debe ser percibido meramente como una exigencia regulatoria impuesta, sino como una oportunidad transformadora. Es una vía para diversificar la matriz productiva nacional, impulsar una nueva rama industrial con alto valor agregado, y catalizar la contribución del país a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La transición hacia un modelo de producción de SAF certificado bajo CORSIA exige acciones concretas: consolidar una gobernanza institucional centralizada con un liderazgo claro y una coordinación interministerial efectiva, fomentando un diálogo público-privado constante; desarrollar un marco regulatorio vinculante que sea flexible y se acompañe de incentivos financieros, fiscales y logísticos para todos los actores de la cadena de valor; fortalecer la infraestructura tecnológica para una trazabilidad territorial avanzada, integrando datos satelitales, catastrales y ambientales en plataformas abiertas y accesibles; e implementar políticas públicas diferenciales que garanticen la inclusión de pequeños productores en las cadenas de valor certificadas, promoviendo la justicia social, la transparencia y la equidad territorial. La armonización de la normativa nacional con los estándares internacionales es, sin lugar a duda, un paso urgente y decisivo para asegurar la competitividad de Colombia en la transición energética del sector aéreo global.

---

## Referencias

- Aeronáutica Civil. (2025). Resolución 00090 de 2025: Hoja de ruta para la producción de SAF. <https://www.aerocivil.gov.co/>
- Aeronáutica Civil de Colombia. (2025, 21 de enero). Desde ahora, Colombia cuenta con una hoja de ruta para la implementación de combustibles sostenibles de aviación - SAF. [enlace sospechoso eliminado]
- Amjith, L., & Bavanish, B. (2022). A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. *Chemosphere*, 293, 133579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>
- Banco Mundial. (2023). Evaluación del ciclo de vida para la producción de biocombustibles en Colombia. <https://www.worldbank.org/>
- BioD. (2025). Proyecto SAF BioD + LanzaJet: Ficha técnica y plan de factibilidad. <https://www.biod.com.co/>
- Boly, M., & Sanou, A. (2022). Biofuels and food security: Evidence from Indonesia and Mexico. *Energy Policy*, 163, 112834. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112834>
- BP. (2022). What is Sustainable Aviation Fuels (SAF)? Recuperado de <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/what-is-sustainable-aviation-fuel-saf-and-why-is-it-important.html>
- Bravo Artica, J. L. (2024). Combustible de Aviación Sostenible (SAF), como alternativa para la reducción de gases de efecto invernadero en el sector aeronáutico en el Perú. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr*, 1-7.
- Cambiocolombia. (2025). Colombia le apuesta a los combustibles sostenibles de aviación. <https://www.cambiocolombia.com/>
- Congreso de Colombia. (2017). LEY 1844 DE 2017 por medio de la cual se aprueba el "Acuerdo de París", adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia.
- Congreso de Colombia. (2021). Ley No. 2169 del 22 de diciembre de 2021 "por medio de la cual se impulsa el desarrollo en carbono bajo del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono, neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones".
- Congreso de la República. (2021). Ley 2099 de 2021 por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones.
- Cuellar Sanchez, M. (2022). Oportunidades del aceite de palma en la producción y uso de biocombustibles avanzados (DR y SAF). (Publicación de Fedepalma con base en presentación del L Congreso Nacional). *Revista Palmas*, 150-159. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13937/13714>
- Departamento de Agricultura de EE.UU. (2022). Ley de reducción de la inflación. <https://www.usda.gov/es/about-usda/general-information/initiatives-and-highlighted-programs/ley-de-reduccion-de-la-inflacion#:~:text=La%20Ley%20de%20Reducuci%C3%B3n%20de,la%20Ley%20de%20Infraestructura%20Bipartidista>.

- 
- El Espectador. (2025). Inversiones necesarias para producción de SAF en Colombia superan USD 1.000 millones. <https://www.elespectador.com/>
- El Tiempo. (2024). Prueba piloto de SAF en Reficar abasteció más de 700 vuelos. <https://www.eltiempo.com/>
- European Commission. (2023). ReFuelEU Aviación. [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en)
- European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
- FAO. (2021). Cultivos energéticos no alimentarios para tierras marginales en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fedebiocombustibles. (2023). Normatividad de la Agroindustria de los Biocombustibles. Recuperado de <https://fedebiocombustibles.com/normatividad/>
- García, A., & Hernández, J. (2021). Challenges in the production of sustainable aviation fuels. *Journal of Environmental Research*, 25(3), 567-579.
- Garzón, M., & Leal, C. (2023). Consulta previa en Colombia: Retos en la transición energética. Fundación Ideas para la Paz.
- GIZ Colombia. (2022). Potencial de biomasa residual para combustibles sostenibles de aviación en Colombia. GIZ Colombia.
- Gómez, P. (2021). Raw materials for sustainable aviation fuels: A review. *Bioenergy and Sustainability*, 19(1), 45-60.
- Gómez, P., & López, M. (2022). The future of sustainable aviation fuels: A comprehensive review. *Renewable Energy Journal*, 45(2), 210-230.
- IATA. (2022). Sustainable Aviation Fuel: Reducing emissions for the future. International Air Transport Association.
- ICAO. (2019). CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICAO. (2021). Evolution of CORSIA regulations. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmentalprotection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICAO. (2022). Sustainability criteria for CORSIA eligible fuels (Document 05). International Civil Aviation Organization. Recuperado el 12 de marzo de 2025, de <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents>
- ICAO. (2023). CORSIA sustainability criteria. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICCT. (2020). The Role of Waste and Residue-Based Biofuels in Reducing Emissions from Aviation. International Council on Clean Transportation.

- 
- IEA. (2021). *Sustainable Aviation Fuels*. Recuperado el 15 de febrero de 2025, de <https://www.iea.org/reports/sustainable-aviation-fuels>
- IEA. (2023). Aviation. Recuperado de <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/>
- IRENA. (2021). *Reaching Zero with Renewables: Biojet fuels*. International Renewable Energy Agency.
- ISCC. (2020). *International Sustainability & Carbon Certification System Handbook*. ISCC System GmbH. <https://www.iscc-system.org/>
- ISCC. (2022). *ISCC System Basics*. International Sustainability and Carbon Certification. <https://www.iscc-system.org>
- ISCC. (2023a). *ISCC CORSIA Certification Scheme*. International Sustainability and Carbon Certification. <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-certification-schemes/iscc-corsia/>
- ISCC. (2023b). *ISCC 205: GHG Emissions*. International Sustainability and Carbon Certification. <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-documents/>
- ISCC. (2023c). *ISCC 204: Audit Requirements and Risk Management*. International Sustainability and Carbon Certification. <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-documents/>
- ISCC. (2023d). *ISCC Registry and Chain of Custody*. International Sustainability and Carbon Certification. <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-documents/>
- ISO. (2015). *ISO 14001:2015 - Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- LanzaJet. (2024). *Sustainable Fuels*. Recuperado de <https://www.lanzajet.com/sustainable-fuels>
- Lemus Cortes, L. (2023). *Caracterización de la Logística de Abastecimiento de la Mezcla de Biocombustible de Aviación en la Fuerza Aérea Colombiana*. [Tesis de pregrado/posgrado, Repositorio FAC].
- López Gómez, M. (2022). *Cadena de Valor para la Implementación y Uso de SAF en Colombia*. (Ponencia en Seminario Evento de Socialización Investigación). Universidad ECCI. [https://www.ecci.edu.co/wp-content/uploads/2022/11/Seminario\\_Biocombustibles-2-de-nov-EDITORIAL-ECCI.pdf#page=17](https://www.ecci.edu.co/wp-content/uploads/2022/11/Seminario_Biocombustibles-2-de-nov-EDITORIAL-ECCI.pdf#page=17)

- 
- López Gómez, M., Posada, J., Silva, V., Martínez, L., Mayorga, A., & Álvarez, O. (2023). Diagnosis of challenges and uncertainties for implementation of Sustainable Aviation Fuel (SAF) in Colombia, and recommendations to move forward. *Energies*, 16(15), 5667. <https://doi.org/10.3390/en16155667>
- Martínez-Valencia, L., & Valderrama-Rios, C. (2024). Sustainable aviation fuel production in Colombia: Opportunities and challenges. Washington State University. <https://doi.org/10.7273/000006281>
- Neste. (2023). Sustainable Aviation Fuels - Neste. Recuperado de <https://www.neste.com/products-and-innovation/sustainable-aviation/sustainable-aviation-fuel>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2014). Objetivos estratégicos. <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/ES/Strategic-Objectives.aspx>
- Organización de Aviación Civil Internacional [OACI]. (2022). Criterios de sostenibilidad CORSIA para combustibles elegibles. <https://www.icao.int/>
- Parlamento Europeo y del Consejo. (2023). Reglamento (UE) 2023/2405 del Parlamento Europeo y del Consejo del 18 de octubre de 2023 sobre la garantía de igualdad de condiciones para el transporte aéreo sostenible (ReFuelEU Aviation). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2405/2023-10-31>
- Pérez, A., & Sánchez, J. (2019). HEFA process in sustainable aviation fuel production: Current status and future trends. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 25(4), 567-579.
- Peterson, R., Smith, J., & Miller, T. (2020). Policy support for sustainable aviation fuel: Impacts and opportunities. *Renewable Energy Policy Journal*, 35(6), 1023-1037.
- Presidencia de Colombia. (2025). Plan nacional de descarbonización: 2025–2050. <https://www.presidencia.gov.co/>
- Reuters. (2025). Ecopetrol invertirá hasta USD 700 millones en planta de SAF en Barrancabermeja. <https://www.reuters.com>
- Rojas, C. (2024, septiembre 26). El SAF, una oportunidad para la reactivación económica de Colombia con energía limpia. 360 Radio. <https://360radio.com.co/el-saf-una-oportunidad-para-la-reactivacion-economica-de-colombia-con-energia-limpia/162984/>
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB). (2022). RSB Certification System. <https://rsb.org>
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB). (2023a). RSB CORSIA Certification Scheme. <https://rsb.org/certification/certification-schemes/rsb-corsia-certification/>
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB). (2023b). RSB Chain of Custody Procedure. <https://rsb.org/certification/>
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB). (2023c). Stakeholder Engagement and Social Responsibility. <https://rsb.org/certification/>
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB). (2023d). RSB Principles and Criteria. <https://rsb.org/the-rsb-standard/>

RSB. (2021). Roundtable on Sustainable Biomaterials: Global certification for sustainable fuels. <https://rsb.org/>

Rueda, M., Rodríguez, M.O., & Medellín, S. (2024). Palma de aceite colombiana: Sostenible e innovadora en conservación y desarrollo social. *Revista Nacional de Agricultura*, Edición 1052, octubre 2024. Sociedad de Agricultores de Colombia – SAC.

Sierra, R. (2023). El inmenso potencial de Colombia para producir combustibles sostenibles de aviación. *El Tiempo*.

Smith, M. (2021). Advancements in sustainable aviation fuels: A review of current technologies. *Aviation & Environment Journal*, 17(3), 231-245.

Su-ungkavatin, P., Tiruta-Barna, L., & Hamelin, L. (2023). Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen?: A review of current and emerging sustainable aviation systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 96, 101073. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101073>

U.S. Department of Energy. (2022). Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>

U.S. Department of Transportation. (2021). U.S. Releases First-Ever Comprehensive Aviation Climate Action Plan to Achieve Net-Zero Emissions by 2050. <https://www.transportation.gov/briefing-room/us-releases-first-ever-comprehensive-aviation-climate-action-plan-achieve-net-zero>