



Estrategias sostenibles para minimizar el impacto ambiental en navegación aérea y su aplicación en Colombia

Mayor (FAC) Leidy Rocío Torres Torres

Artículo para optar al título profesional:

Magister en Estrategia y Geopolítica

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"
Bogotá D.C., Colombia
2025

DATOS GENERALES

Nombre del estudiante	:	Mayor (FAC) Leidy Rocío Torres Torres
Identificación	:	1130595872
Programa académico	:	Maestría en Estrategia y Geopolítica
Tutor metodológico	:	Mayor (R) Oscar Orlando Porras Rodríguez
Tutor temático	:	Andrea Katherinne Diaz Cante
Fecha de entrega	:	28 de agosto de 2025
Extensión	:	7.820 palabras

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS

El autor declara que este artículo fue escrito de acuerdo con la normatividad de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” (ESDEG) y no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con este. Las posturas y aseveraciones presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no representan la posición oficial ni institucional de la ESDEG, las Fuerzas Militares de Colombia o el Ministerio de Defensa Nacional.

Este artículo es enteramente mi propio trabajo y no ha sido presentado para la obtención de un título en esta u otra Institución de Educación Superior. Se han referenciado todos los trabajos y puntos de vista de otros autores, así como los datos de otras fuentes utilizadas. No se emplearon herramientas de generación de contenido por Inteligencia Artificial para su elaboración.

El autor acepta ceder los derechos de publicación en favor de la ESDEG y su Sello Editorial de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas.

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

El autor autoriza que este artículo sea publicado por el Sello Editorial ESDEG en su repositorio institucional y esté disponible bajo una modalidad de acceso abierto.

Estrategias sostenibles para minimizar el impacto ambiental en navegación aérea y su aplicación en Colombia

Sustainable strategies to minimize environmental impact in air navigation and their application in Colombia

Mayor (FAC) Leidy Rocío Torres Torres¹

Resumen: El presente artículo establece lineamientos de estrategia integradores de sostenibilidad ambiental y navegación aérea, derivados de la implementación del Combustible Sostenible de Aviación (SAF) como iniciativa ecológica viable para Colombia en reducción de emisiones CO₂. **Método:** los resultados se obtuvieron bajo las premisas del enfoque cualitativo-descriptivo y del prisma cribado de información con la selección de 20 fuentes especializadas provenientes de bases de datos como Scopus, Elsevier, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar. **Resultados:** 1. La implementación del SAF requiere incentivos fiscales, regulaciones claras y alianzas público-privadas para su desarrollo. 2. Las tecnologías complementarias como aeronaves eléctricas o de hidrógeno, mejoras del tráfico aéreo, electrificación aeroportuaria y mecanismos de compensación de carbono reducen emisiones carbono. 3. Alianzas entre la Aerocivil, Ecopetrol y LATAM Airlines demuestran factibilidad de producción y uso del SAF. **Conclusión:** Colombia tiene potencial como hub regional de aviación sostenible mediante la adopción de prácticas internacionales relacionadas con SAF.

Palabras clave: Navegación Aérea Sostenible, Combustible Sostenible de Aviación (SAF), Optimización de Rutas Aéreas, Electrificación Aeroportuaria, Descarbonización del Sector Aéreo (Thesaurus, 2015).

Abstract: This article establishes strategic guidelines integrating environmental sustainability and air navigation, derived from the implementation of Sustainable Aviation Fuel (SAF) as a viable ecological initiative for Colombia in reducing CO₂ emissions. **Method:** The results were obtained under the premises of a qualitative-descriptive approach and through an information screening framework, with the selection of 20 specialized sources from databases such as Scopus, Elsevier, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar.

¹ Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana. Candidata a magister en Estrategia y geopolítica, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. Ingeniera Mecánica, Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez”, Colombia. <https://orcid.org/0009-0000-7191-7631> - Contacto: leidy.torres@fac.mil.co

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

Results: 1. The implementation of SAF requires tax incentives, clear regulations, and public-private partnerships for its development. 2. Complementary technologies such as electric or hydrogen-powered aircraft, air traffic improvements, airport electrification, and carbon offsetting mechanisms contribute to reducing carbon emissions. 3. Partnerships between Aerocivil, Ecopetrol, and LATAM Airlines demonstrate the feasibility of SAF production and use. **Conclusion:** Colombia has the potential to become a regional hub for sustainable aviation through the adoption of international practices related to SAF.

Keywords: Sustainable Air Navigation, Sustainable Aviation Fuel (SAF), Air Route Optimization, Airport Electrification, Decarbonization of the Aviation Sector (Thesauro, 2015).

Introducción

En la actualidad, el crecimiento de la aviación internacional ha sido notable, convirtiéndose en un elemento clave para fomentar el desarrollo económico y mejorar la conectividad a nivel global. Este impulso se debe a la capacidad de incentivar el comercio, revigorizar el turismo, facilitar intercambios culturales y aumentar las oportunidades en un entorno donde la interdependencia entre países va en aumento. No obstante, este progreso también repercute de manera considerable en el medio ambiente, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias sostenibles que logren un equilibrio entre la competitividad del sector y la responsabilidad hacia el entorno. En este orden de ideas, a través del presente artículo se pretende analizar los factores más relevantes que afectan la aviación en el ámbito mundial y se sugieren directrices sostenibles que se pueden aplicar en Colombia, basadas en tecnologías innovadoras, políticas internacionales de enfoque ambiental y prácticas operativas eficientes con el propósito de disminuir la huella ecológica que deja el entramado de navegación aérea.

Investigadores como Lee, Fahey y Skowron en 2021 señalaron que el sector aéreo es responsable de aproximadamente entre el 2% y el 3% de las emisiones globales de dióxido de carbono (Camargo, Coral y Abril, 2025) y adicionalmente, las estelas de condensación dejadas por los aviones juegan un papel en el calentamiento global, lo que incrementa su influencia en el fenómeno del cambio climático (Lee, Faey, Skowron et. al, 2021). Estas repercusiones no solo afectan los sistemas climáticos y ambientales, sino que también tienen un impacto directo en la salud de las poblaciones que viven cerca de aeropuertos y campos de aviación, donde la exposición continuada a la contaminación del aire aumenta la

probabilidad de desarrollar enfermedades pulmonares y problemas del corazón. Por otra parte, avanzar hacia una aviación genuinamente sostenible también implica la integración de diversas estrategias complementarias que son igualmente cruciales, tales como la electrificación en los aeropuertos, la compensación de emisiones de carbono y la mejora en la eficiencia operativa.

La electrificación aeroportuaria se está estableciendo como una respuesta fundamental para disminuir el impacto ambiental de las actividades en tierra en los aeropuertos; proyectos como el del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas evidencian cómo la adopción de fuentes de energía renovable —como la energía solar y la climatización geotérmica—, junto con la electrificación de los equipos de soporte en tierra, pueden reducir significativamente tanto el uso de combustibles fósiles como las emisiones relacionadas (Moeve Global, 2025b). Asimismo, iniciativas en aeropuertos como el de San Francisco han fomentado la electrificación de su flota de vehículos terrestres, la creación de infraestructuras con energía de cero emisiones, lo que contribuye a mejorar la salud y el bienestar de los empleados del aeropuerto por medio de la disminución de la contaminación local (C40 Cities, 2022).

Con respecto a la eficiencia operativa, las estrategias abarcan la mejora de las rutas aéreas y la gestión del tráfico aéreo, logrando así reducir tanto los tiempos de vuelo como el consumo de combustible. Estas acciones no sólo ayudan a disminuir las emisiones, sino que también optimizan el uso de la capacidad de los aeropuertos y reducen los costos operativos para las aerolíneas (ICAO, 2018). Las compensaciones de carbono, a pesar de no disminuir directamente las emisiones desde la fuente, pueden servir como una estrategia adicional para cumplir con las metas de neutralidad de carbono, al canalizar inversiones en proyectos

ambientales que atrapan o minimizan el CO₂ en otras localizaciones. No obstante, es esencial que esta estrategia se aplique con rigor para garantizar tanto la transparencia como la efectividad de dichas compensaciones (Becken, 2020).

En el caso de Colombia, estas estrategias pueden ser adaptadas e implementadas para desarrollar un modelo sustentable que posicione al país como un centro estratégico en América Latina, equilibrando el crecimiento económico con la responsabilidad medioambiental (López, Melgar, Bakiu et. al. , 2023). Iniciativas de electrificación en aeropuertos nacionales, la incorporación progresiva de combustibles sostenibles para aviación (SAF), y la aplicación de políticas que fomenten la eficiencia operativa son acciones críticas para lograr este propósito (El Dorado Aeropuerto, 2021).

De este modo, el reto de la sostenibilidad en el sector aéreo demanda una perspectiva integral que vaya más allá de la mera dependencia en combustibles alternativos, fortaleciendo un enfoque multidimensional que incluya innovación tecnológica, desarrollo de nuevas políticas regulatorias y participación comunitaria para lograr un impacto ambiental efectivo y sostenible en el tiempo. Así las cosas, la necesidad de incorporar criterios de sostenibilidad ambiental en la navegación aérea adquiere cada vez mayor relevancia ante los desafíos globales del cambio climático y la presión por reducir las emisiones. Por tanto, la investigación se guía por la siguiente pregunta central: ¿Cómo puede Colombia desarrollar una estrategia geopolítica sostenible que minimice el impacto ambiental de la navegación aérea en su territorio, mientras fortalece su rol como hub estratégico en América Latina?

Con fundamento en lo anterior, a través del presente artículo se tiene previsto establecer lineamientos para una estrategia en Colombia que integre criterios de

sostenibilidad ambiental en la navegación aérea y fortalezca su competitividad como centro estratégico en América Latina.

En este orden de ideas, en primera medida se realizó una identificación de las estrategias actuales que permiten una conectividad sostenible en el país, encaminado a minimizar el impacto ambiental sin obstruir el desarrollo económico y social. Seguido a esto, se llevó a cabo un análisis comparativo de tecnologías, prácticas sostenibles y políticas exitosas implementadas en otros países, con el fin de comprender las acciones que se destacan para mitigar los efectos ambientales de la aviación y, por último, se propuso la selección de las mejores prácticas internacionales en materia de navegación aérea sostenible y su aplicabilidad en el contexto colombiano, para fomentar una conectividad eficiente y ecológica.

Metodología

Este artículo fue elaborado bajo los postulados de un enfoque cualitativo que buscó interpretar las estrategias sostenibles que se han puesto en práctica o que se están planeando para mitigar el impacto ambiental de la aviación, teniendo en cuenta tanto el entorno natural como la complejidad intrínseca del fenómeno, además de considerar las opiniones de los actores implicados y realizar un análisis de documentos técnicos, normativos y académicos (Creswell, 2014).

El tipo de investigación que se desarrolló fue descriptivo, lo que permitió identificar y sistematizar las estrategias sostenibles en el sector de la aviación, centrándose especialmente en tecnologías limpias, combustibles alternativos, mejoras en la eficiencia

operativa y la regulación vigente (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Esto proporcionó una comprensión exhaustiva de las iniciativas que podrían ser pertinentes en el contexto colombiano, sin intentar establecer relaciones de causa y efecto ni proponer hipótesis.

Se utilizó el análisis de contenido como el enfoque para examinar la información, a través de un proceso de codificación inductiva que facilitó la detección de tendencias, conceptos fundamentales y estrategias comunes en documentos científicos, informes globales, como los de la OACI, así como en regulaciones nacionales y trabajos académicos (Krippendorff, 2018).

El proceso de recopilación y selección de documentos se llevó a cabo mediante un enfoque de filtrado estructurado (prisma cribado de información) en cuatro etapas secuenciales, directamente relacionadas con los objetivos establecidos (Raimundo, Baltazar y Cruz, 2023). En primer lugar, el filtro de relevancia temática permitió identificar las iniciativas actuales que favorecen una conectividad sostenible en la aviación nacional, lo que redujo la cantidad de documentos de 67 a 42, en concordancia con el primer objetivo.

Luego, el filtro de validez proporcionó apoyo para un análisis comparativo entre tecnologías, políticas y prácticas sostenibles encontradas en la literatura académica y en documentos de instituciones, resultando en la selección de 31 textos que aseguraron un estándar de calidad riguroso, acorde al segundo objetivo. Posteriormente, el filtro de actualidad temporal (2015-2025) se encargó de que el examen se basara en tecnologías recientes y normativas actualizadas, mejorando la comprensión de experiencias internacionales pertinentes, en coordinación con el segundo y tercer objetivo, quedando finalmente con 24 documentos.

Por último, el filtro de aplicabilidad contextual se centró en identificar estrategias viables para su implementación en Colombia, reduciendo el total a 20 documentos que sustentaron mediante una codificación temática una propuesta de mejores prácticas internacionales para el contexto nacional, cumpliendo así con el tercer objetivo.

De esta manera, la metodología estableció de forma clara la conexión entre cada objetivo y las distintas fases del análisis. Esto garantizó un avance lógico y riguroso, permitiendo una respuesta completa a la cuestión de investigación: de qué manera Colombia puede adoptar una estrategia sostenible que reduzca el impacto ambiental de la aviación, al mismo tiempo que refuerza su papel como un centro regional.

Como consecuencia, el artículo propone directrices concretas para la incorporación de tecnologías limpias, el cumplimiento de normativas internacionales y la implementación de prácticas operativas eficientes adaptadas a la realidad colombiana, lo que promoverá un desarrollo económico y social equilibrado, con una huella ecológica reducida. De esta forma, se brinda un esquema viable para que Colombia progrese en la descarbonización y sostenibilidad del sector aéreo, alineándose con los compromisos globales y los desafíos locales.

Desarrollo

Identificación de lineamientos estratégicos para la aviación sostenible

Tomando como referencia los estándares y regulaciones internacionales de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la literatura especializada de la International Air Transport Association (IATA) y documentos técnicos que sustentaron la

selección de las estrategias sostenibles propuestas que documentan la creciente necesidad de reducir la huella de carbono y el enfrentamiento del cambio climático, la industria aeronáutica ha identificado diversas estrategias mitigadoras, como las que se relacionan a continuación.

Producción nacional de SAF en Colombia

El primer lineamiento a contemplar en la aviación sostenible en Colombia guarda relación con el auge de la industria dedicada a la producción de combustibles sostenibles (SAF) que son elemento esencial en la navegación aérea (Klimczyk, Jasiński, Niklas et. al., 2025), teniendo en cuenta que contribuye a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero y al impulso que puede generar en los escenarios agrícola, forestal y energético del país, combustible alternativo competitivo.

A la luz de los anteriores argumentos, el país posee altos volúmenes de biomasa residual provenientes del procesamiento de la caña de azúcar, palma de aceite, café, residuos forestales y aceites usados que sirven como base de la producción de biocombustibles considerados dentro de la categorización de combustibles limpios y ecológicos. Es de resaltar que, la implementación de biomasa forestal residual para la producción de SAF puede llegar a reducir en un 70% las emisiones de CO₂ (D’Ascenzo, Vinci, Savastano et. al., 2024), en comparación con el combustible fósil, teniendo presente las prácticas sostenibles de recolección y procesamiento (Romero, Mayorga, Gómez et. al., 2025).

A esto se suma que, Colombia con potencial para la producción de combustible ecológico puede llegar a ser a planificar como país la construcción de una hoja de ruta

nacional para la producción de SAF desde la articulación de tres ejes (López, Melgar, Bakiu, 2023; IATA, 2021): a. disponibilidad de materia prima variada y en grandes cantidades; b. fortalecimiento de la designación de recursos financieros a través de un marco legal y político que lo respalde y c. cooperación internacional para el acceso a tecnología de segunda y tercera generación como el *Power-to-Liquid* basado en hidrógeno verde y captura directa de CO₂ (Lee, Faey, Skrowron et. al, 2021; Bhatt, Zhang, Milbrandt et. al., 2023).

Por otra parte, es importante resaltar la importancia de una política clara de transición hacia combustibles alternativos, que permitan disminuir las emisiones del combustible de aviación al 2030 (Camargo, Coral y Abril, 2025), lo que contribuiría de manera ostensible en el establecimiento de plantas piloto y la integración con la infraestructura de biocombustibles existente para la reducción de importaciones (ICAO, 2025).

En definitiva, la producción de SAF en Colombia tendría un impacto positivo en el medio ambiente, en la economía y el respaldo social, debido a la generación de cadenas productivas en el ámbito rural (Prussi, Lee, Wang, Malina, Falterm, 2021), para la generación de empleos verdes, donde el país se convierte en un hub regional de combustibles sostenibles, pero para esto es necesario, que se asegure una evaluación del ciclo de vida (LCA) que permita la seguridad alimentaria y reduzca la deforestación (Okolie, Awotoye, Tabat et. al., 2023).

Incentivos regulatorios y financieros para el uso de SAF en Colombia

El diseño de un marco de incentivos regulatorios y financieros que permita el adecuado despliegue de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) podría ser el segundo

lineamiento que permita su producción en Colombia, teniendo en cuenta que permitiría regular de manera adecuada su producción y adopción, toda vez que sin ellos, podría oscilar entre 120% y 700% sobrepasando el valor del keroseno convencional y que garantizaría el éxito de su implementación para las aerolíneas y productores (Camargo, Coral y Abril, 2025).

Al respecto es importante enfatizar que, la ausencia de un marco regulatorio puede convertirse en el principal obstáculo, para lograr que existan precios diferenciados, exenciones de tipo fiscal o créditos verdes que permitan asegurar que el SAF alcance la competitividad real que requiere frente al combustible convencional (López, Posada, Silva et. al., 2023).

Es importante rescatar la necesidad de establecer una hoja de ruta normativa que, permita la alienación de los objetivos de sostenibilidad de la aviación con las políticas que a nivel nacional guardan relación con la transición energética (Ambrosio, de Sousa, Kanieski et. al., 2025), en especial, con la incorporación de estándares de trazabilidad, metodologías de análisis de ciclo de vida y criterios de elegibilidad de materias primas, las cuales deben mantenerse dentro de los límites de sostenibilidad social y ambiental.

La infraestructura y eficiencia operacional

Por su parte, el tercer lineamiento se relaciona con la infraestructura y eficiencia operacional constituyen otro pilar estratégico para una aviación sostenible. En Colombia, se requiere una modernización integral de la infraestructura aeroportuaria, como ejemplifica el Aeropuerto El Dorado en Bogotá, que ha incorporado energías renovables, iluminación natural y sistemas LED para optimizar el consumo energético. Asimismo, la actualización

tecnológica en la gestión del tráfico aéreo, mediante implementaciones como la Navegación Basada en Performance (PBN), sistemas Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) y plataformas de gestión colaborativa (CDM), permite una optimización de rutas y tiempos de vuelo, reduciendo emisiones contaminantes (EASA, 2024; Wu, Zhang, Zhu et. al., 2024). Estas mejoras incrementan la seguridad, la capacidad del sistema aeroportuario y apoyan el desarrollo económico regional sostenible.

Todo esto permite reducción de emisiones (CO₂ y NO_x) mediante operaciones más eficientes, mayor acceso a regiones remotas contribuyendo al desarrollo económico regional de manera sostenible (Yi, Zhong, Liu et. al., 2021). Estas transformaciones no solo mejoran la eficiencia operativa, disminuyendo emisiones y consumo de combustible, sino que también elevan los estándares de seguridad y capacidad del sistema aeroportuario (Capaz, 2020), contribuyendo al desarrollo económico regional de manera equilibrada con el medio ambiente.

Frente a esto, la electrificación de los aeropuertos emerge como una iniciativa crucial para reducir la dependencia de combustibles fósiles en las operaciones terrestres, impulsando el uso de vehículos eléctricos y energías renovables dentro de las infraestructuras aeroportuarias (Moeve Global, 2025; Alruwaili y Cipcigan, 2022). Paralelamente, el desarrollo de aeronaves eléctricas, híbridas y de hidrógeno representa un avance significativo hacia la reducción de emisiones (Huber, Birkelbach y Hofmann, 2024), especialmente en rutas cortas, aunque su adopción masiva depende de progresos en la densidad energética de baterías y la infraestructura de carga (Schäfer, Barrett y Doyme, 2019).

Asimismo, las compensaciones de carbono y las tecnologías de captura, almacenamiento y utilización de carbono (CCUS) ofrecen mecanismos complementarios para neutralizar las emisiones residuales del sector (Keiser, Schnoor, Pupkes, 2023), debido a que estos proyectos financian iniciativas locales de reforestación, conservación y energías renovables, contribuyendo al desarrollo social y económico de comunidades rurales y a la conservación de la biodiversidad en zonas estratégicas del país (Becken, 2020).

No obstante, la implementación de estas tecnologías y combustibles sostenibles enfrenta obstáculos significativos vinculados con la accesibilidad y el costo, lo que demanda la colaboración entre distintos actores sectoriales para superar barreras económicas y regulatorias, orientando la aviación hacia el objetivo global de emisiones netas cero para 2050 (Moeve Global, 2025; Teoh, Schumann y Gryspeerdt, 2022). En suma, el conjunto de estrategias conforma el marco esencial para el logro de una aviación sostenible que equilibre crecimiento económico, conectividad y responsabilidad ambiental, alineándose con los compromisos internacionales para un futuro carbono neutral (Zheng, Wang y Jiang, 2024).

En definitiva, el resultado del primer objetivo permite identificar que la estrategia más viable a nivel mundial y aún más para Colombia es el desarrollo del SAF, debido a que su implementación aparte de fortalecer el sector aeronáutico (Zengerling, Gesso, Linke et. al., 2024), fortalece el sector de la agricultura generando empleo y apoyaría una economía ambiental. Así mismo promueve la transición hacia tecnologías limpias apoyando la disminución de emisiones CO₂.

Tecnologías, prácticas sostenibles y políticas exitosas que mitigan el impacto ambiental de la navegación aérea

La aviación constituye un componente esencial para la conexión global, aunque también es uno de los sectores que genera más Gases de Efecto Invernadero por cada viajero-kilómetro. La presión, tanto social como regulatoria, para reducir las emisiones de carbono en esta industria está en aumento. En este panorama, la IATA desempeña un papel crucial, no solo como portavoz de la industria (IATA, 2025), sino también como promotora de estrategias que busquen equilibrar el crecimiento del transporte aéreo con la conservación del medio ambiente. Es importante destacar que la atención al Combustible Sostenible de Aviación no es fortuita (Calvo, 2023), sino que se presenta como una solución directa para aminorar las emisiones existentes sin la necesidad de realizar modificaciones drásticas en la flota actual.

Tecnologías sostenibles: foco en el Combustible Sostenible de Aviación -SAF-

El Combustible Sostenible para la Aviación, conocido como SAF, representa una opción viable ante el uso de combustibles fósiles convencionales (Aviaciononline, 2025). Ha sido diseñado con el propósito de ser plenamente compatible con la infraestructura de los aeropuertos y los motores aeronáuticos actuales, evitando la necesidad de realizar ajustes significativos en las aeronaves o en los sistemas de suministro (Dhar, Lee, Kajino et. al, 2022). Esta capacidad de funcionar como un combustible de reemplazo directo o "drop-in" permite que el SAF se mezcle fácilmente con el combustible Jet A1 tradicional y se incorpore de inmediato en la flota de aviones (Lee, Faey, Skrowron et. al, 2021), lo que a su vez simplifica su adopción generalizada sin afectar las operaciones.

En Colombia, el desarrollo del SAF ha cobrado especial relevancia, especialmente considerando que dos recursos locales están destacando: el aceite de palma y el etanol de la

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

caña de azúcar. No obstante, según el Cr (RA) Edgar Francisco Sánchez Canosa, Gerente de Seguridad y Operaciones de Vuelo de IATA, para 2025, el aceite de palma producido en Colombia aún no ha sido reconocido por CORSIA como un recurso acreditado. A pesar de que organizaciones como Fedepalma han presentado investigaciones sobre sostenibilidad ante la OACI, la aprobación de este reconocimiento todavía se encuentra pendiente, y el etanol de caña se presenta como una alternativa más factible en el corto plazo. Para que una materia prima sea considerada adecuada para la producción de SAF por CORSIA, es necesario que satisfaga criterios de sostenibilidad (Sanchez, 2025). Estos criterios incluyen la reducción verificable de emisiones de gases de efecto invernadero, el respeto a la seguridad alimentaria, la no competencia por el uso del agua y el suelo para otros propósitos vitales, así como el respeto a las comunidades locales.

Los SAF tienen el potencial de disminuir las emisiones netas de dióxido de carbono en hasta un 80% en comparación con los combustibles fósiles convencionales, dependiendo de los insumos y técnicas de producción utilizados (Rodríguez y Lee, 2023). Esta notable disminución se logra porque el carbono liberado durante la combustión de los SAF proviene de fuentes renovables o recicladas, lo que equilibra el ciclo de carbono de manera más efectiva (Lee, Faey, Skrowron et. al, 2021). Además, en la fabricación de estos combustibles, hay múltiples enfoques tecnológicos certificados que utilizan diversas materias primas no alimentarias o desechos (Sanchez, 2025); entre los métodos aprobados se encuentran la transformación de residuos vegetales, grasas de cocina recicladas, grasas animales, desechos urbanos y biomasa lignocelulósica.

Los métodos más utilizados y respaldados abarcan enfoques como el proceso Fischer-Tropsch, la conversión de ésteres y ácidos grasos mediante hidrogenación -HEFA-, y las rutas que convierten alcohol en combustible para aeronaves (NREL, 2025). Cada uno de estos métodos posee características específicas en relación a la fabricación y la composición del combustible final. Por otra parte, los progresos recientes en el diseño de catalizadores y el aumento de la eficiencia en los procesos químicos han facilitado una mejor conversión y han reducido los costes de producción, lo que hace que el SAF sea cada vez más viable en comparación con los combustibles fósiles convencionales (University Sheffield, 2025).

En este sentido, el principal desafío en la actualidad radica en el precio, considerando que los SAF pueden tener un costo de tres a cinco veces superior al del combustible Jet A1, tanto por la materia prima certificada utilizada como por el método de producción (Lee, Fahey, Forster et al, 2009). No obstante, dado que son totalmente compatibles con la infraestructura ya instalada para el almacenamiento y distribución de combustibles, el SAF evita los elevados costos que implicaría el cambio hacia el hidrógeno o la aviación eléctrica.

Desde el punto de vista normativo, los estándares internacionales ASTM D7566 y D1655 establecen los porcentajes máximos permitidos de mezcla de SAF con combustible Jet A1 (ASTM International, 2024), los cuales varían generalmente entre el 10% y el 50%, dependiendo de la tecnología de producción utilizada (IATA, 2025b), lo que garantiza la seguridad, desempeño y compatibilidad del combustible mixto en condiciones reales de operación.

Prácticas sostenibles: experiencias internacionales

Los países líderes en la implementación de SAF han mostrado que una estrategia integrada, que combine incentivos fiscales, regulación clara y colaboración público-privada, es la fórmula más exitosa para escalar esta tecnología se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Experiencias internacionales en la implementación del SAF

Región	Prácticas sostenibles implementadas	Detalles y resultados
Europa (España y Unión Europea) (Agencia Europea de Seguridad Aérea, 2025)	Mandato ReFuelEU Aviation: mezcla obligatoria creciente de SAF (2% en 2025 hasta 70% en 2050). Producción local en plantas ejemplificada a través de Repsol en Cartagena (300,000 toneladas anuales). Uso frecuente por aerolíneas (Iberia, Vueling, Air Europa, Ryanair).	Reducción estimada en emisiones entre 70%-90%. Se convierte en impulso a inversiones en producción local y tecnologías avanzadas. Costos mayores al queroseno, con posibles soluciones a largo plazo.
América Latina (Colombia) (Air France Colombia, 2025)	Alianza Ecopetrol-LATAM Airlines para producción y uso de Jet A1 coprocesado con componentes renovables. Más de 700 vuelos comerciales con SAF coprocesado operados desde 2024. Existe el desarrollo de planta dedicada en	Estrategia de largo plazo para descarbonización aeroportuaria, fortaleciendo cadena productiva local. Reportes científicos avalan

	Barrancabermeja. Compensación de la competitividad y emisiones con créditos de carbono. potencial agrícola para SAF.
Estados Unidos (Fortune Business Insights, 2025)	Programa Sustainable Aviation Fuel Crecimiento acelerado de Grand Challenge: meta de 3 mil millones capacidad industrial y de galones de SAF para 2030. mercado con apoyo público- Incentivos fiscales vía Inflation Act. privados. Costos finales aún elevados, pero con perspectivas de reducción Contratos a largo plazo con aerolíneas líderes para asegurar la demanda. técnicas y de volumen. Desarrollo de infraestructura para producción masiva.
Reino Unido (Agencia Europea de Seguridad Aérea, 2025)	Estrategia Jet Zero con mandatos obligatorios de mezcla de SAF (22% en 2040). Mecanismos de soporte a ingresos para inversión privada. Colaboración seguridad regulatoria. pública-privada en corredores y plantas productoras de SAF. Fuerte enfoque en viabilidad financiera a largo plazo.
Asia-Pacífico (Fortune Business Insights, 2025)	Programas piloto de uso de SAF en aerolíneas (ej. Cathay Pacific, Singapore Airlines). Impulso regional con crecimiento gradual, alta colaboración entre sector público y privado. Proyectos de producción en China y Australia. Investigación conjunta con Foco también en

fabricantes en materias primas investigación tecnológica
novedosas. Certificación y plataformas para diversificar recursos y
regionales de mercado y trazabilidad. mejorar costos.

Fuente: construcción propia del investigador, agosto 2025.

Como se indica en la tabla 1, el interés en el SAF se basa en que es una solución realista y técnicamente practicable a corto y mediano plazo. A diferencia de otras tecnologías innovadoras, como la aviación eléctrica o el hidrógeno, que presentan importantes retos técnicos y de infraestructura, el SAF es un "combustible de reemplazo directo", lo que implica que puede ser utilizado de inmediato en aeronaves convencionales con la infraestructura existente, lo que permite una adopción más rápida y económica.

En este contexto, la mejora en la eficiencia operativa combina acciones que disminuyen la demanda energética de un vuelo y optimizan el uso del SAF. Es decir, no es suficiente con usar combustible sostenible; es esencial optimizar las rutas, los sistemas de aproximación y las operaciones en los aeropuertos para lograr la máxima disminución neta de las emisiones.

Políticas exitosas: rol normativo y de incentivos

En el contexto de las políticas relacionadas con la adopción de Combustible Sostenible de Aviación (SAF), la IATA reafirma la importancia de mantener un enfoque imparcial en cuanto a las tecnologías y las materias primas, evitando así favorecer ciertas rutas tecnológicas o insumos en particular (Sanchez, 2025). Esta imparcialidad posibilita el desarrollo de la innovación y que diversas regiones utilicen sus recursos y habilidades,

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

favoreciendo de este modo una transición equitativa y eficaz a nivel mundial. Además, la IATA subraya la relevancia de tener políticas alineadas entre las naciones, dado que la naturaleza global de la aviación demanda marcos normativos coherentes que garanticen la sostenibilidad y la eficacia operativa, evitando así la creación de obstáculos o distorsiones en el mercado (IATA, 2025).

Un aspecto fundamental de la estrategia es la creación de incentivos robustos, tales como subsidios, beneficios fiscales y el financiamiento de infraestructuras productivas, que contribuyen a mitigar los sobrecostos actuales del SAF en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Sin estos apoyos, ni la producción ni el consumo podrían llegar a la magnitud requerida para provocar efectos ambientales relevantes ni para hacer que este biocombustible sea competitivo en el corto y mediano plazo.

La IATA también subraya que los "mandatos de mezcla" -es decir, la obligatoriedad legal de que una parte del combustible utilizado sea SAF- solo resultan eficaces si van acompañados de estrategias de mercado y apoyos financieros. En caso contrario, podrían generar efectos negativos, como el incremento de los precios de los boletos aéreos o desincentivar la participación de nuevos productores e inversores en el sector (IATA, 2025). De gran importancia científica y operativa son dos instrumentos que han sido recientemente creados por la IATA:

La IATA también enfatiza que los “mandatos de mezcla” -es decir, la obligatoriedad legal de que una parte del combustible utilizado sea SAF- solo son efectivos si se acompañan de estrategias de mercado y apoyos económicos, de lo contrario, podrían tener efectos contraproducentes, como encarecer los boletos aéreos o desalentar la participación de nuevos

productores e inversores en el sector (IATA, 2025). De particular relevancia científica y operativa resultan dos herramientas desarrolladas recientemente por la IATA:

SAF Registry de la IATA (2025): esta plataforma digital global brinda una completa trazabilidad de la adquisición, utilización y características ambientales del SAF. Este registro permite que aerolíneas, proveedores y autoridades informen y verifiquen con confianza las disminuciones de emisiones, evitando de este modo la doble contabilización o inconsistencias en la regulación (Rodriguez y Lee, 2023). El Registro de SAF proporciona claridad y permite que las ventajas ambientales del uso de SAF sean reconocidas y certificadas a nivel internacional.

Metodología estandarizada de accounting & reporting: emitida por la IATA en 2025, esta metodología reúne los estándares para el registro de los beneficios climáticos del SAF (IATA, 2025). Debido a esta normalización, las disminuciones de emisiones pueden ser comparadas y reconocidas de manera uniforme en varios sistemas regulatorios, lo que incluye la conformidad con el esquema internacional CORSIA de la OACI (ICAO), así como con las mejores prácticas del sector (Dhar, Lee, Kajino et. al, 2022; Sanchez, 2025). Esto genera confianza y seguridad en inversores, reguladores y operadores respecto al impacto real de la utilización de SAF.

En conjunto, el marco político y técnico promovido por la IATA favorece un despliegue global del SAF que sea claro, uniforme y respaldado por la ciencia, estableciendo las bases para una descarbonización eficiente de la aviación comercial a nivel internacional.

Mejores prácticas internacionales en materia de navegación aérea sostenible y su aplicabilidad en el contexto colombiano

En el contexto del aumento de la necesidad de una aviación que cuide más el medio ambiente, la adopción de prácticas internacionales más avanzadas en navegación aérea sostenible se muestra como una oportunidad clave para Colombia (OACI, 2025). Este país, con su diversa geografía y un crecimiento continuo en el tráfico aéreo, puede beneficiarse significativamente de la implementación de soluciones que han demostrado ser efectivas en otras regiones (Ecopetrol y LATAM Airlines, 2025; OACI, 2025). El objetivo es identificar, modificar y aplicar aquellas acciones que promuevan una conectividad aérea que sea más eficiente y respetuosa con el medio ambiente (IATA, 2024), en concordancia con los compromisos climáticos establecidos a nivel global.

Mejora de rutas y procesos de vuelo

Una de las tácticas más reconocidas mundialmente es la optimización de rutas y procedimientos de vuelo (NREL, 2025; Eurocontrol, 2025). En este ámbito, las Operaciones de Descenso Continuo (CDO) facilitan que las aeronaves realicen descensos suaves y constantes, minimizando el uso de los motores en las fases críticas del vuelo. Esta técnica reduce significativamente tanto el consumo de combustible como las emisiones de gases nocivos y el nivel de ruido (ICAO, 2023). Por otra parte, la Navegación Basada en el Rendimiento (PBN) emplea tecnologías satelitales como el GPS para definir trayectos más directos y eficientes (IATA, 2024), lo que facilita la disminución de los tiempos de vuelo, la congestión en el aire y el efecto sobre el medio ambiente.

Estas estrategias, implementadas en naciones como Estados Unidos y varios estados europeos, son especialmente importantes para Colombia, donde la geografía montañosa y el elevado volumen de tráfico en trayectos determinados demandan métodos nuevos (Aeronáutica Civil de Colombia., 2019). La implementación de CDO y PBN requerirá una

actualización de los sistemas de control del tráfico aéreo y una mejora en la capacitación de los controladores y pilotos (OACI, 2025), con el propósito de incrementar la seguridad, disminuir las esperas operativas y afrontar el consumo de combustible.

Una parte fundamental de la sostenibilidad en el sector de la aviación se encuentra en las operaciones en tierra (Moeve Global, 2025); a su vez, la electrificación de los equipos en los aeropuertos y la adopción de fuentes de energía renovable son medidas esenciales para reducir las emisiones indirectas (ANI Colombia, 2023). En este contexto, reemplazar los vehículos y maquinarias diésel por alternativas eléctricas, como se hace en aeropuertos reconocidos como el de Ámsterdam-Schiphol y el de Los Ángeles (Aeropuerto Internacional El Dorado, 2023), ha mostrado resultados positivos en la reducción de la huella ambiental.

Además, la implementación de paneles solares y la utilización de micro-redes en los aeropuertos permiten el acceso a energía renovable para las actividades en tierra (ArchDaily, 2019). En Colombia, aeropuertos con gran volumen de pasajeros como El Dorado en Bogotá y José María Córdova en Medellín podrían encabezar esta transformación (Celsia y Odinsa, 2018), creando empleos ecológicos (ANI Colombia, 2023), atrayendo inversiones sostenibles y mejorando la competitividad internacional del país.

Modernización del control de combustible y formación especializada

Las tecnologías modernas permiten recoger y analizar en tiempo real datos operativos, lo que posibilita optimizar el consumo de combustible sin comprometer la seguridad de los vuelos (Cámara de Representantes de Colombia, 2025). Estas herramientas se combinan con programas de entrenamiento dirigidos a los pilotos, centrados en mejorar la eficiencia energética, abordando puntos como la velocidad más adecuada (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2025), la administración del peso del avión y la elección de

rutas que minimicen el gasto de combustible. En Colombia, estas técnicas podrían ser fortalecidas mediante la cooperación entre aerolíneas, entidades reguladoras y escuelas de aviación (Infobae Colombia, 2025), promoviendo la creación de un sistema integral para supervisar y gestionar el consumo de combustible en todas las etapas de las operaciones aéreas.

Uno de los avances más prometedores para cambiar la descarbonización en la aviación es el uso de combustibles sostenibles (Sanchez, 2025). Esta fuente de energía, que proviene de residuos agrícolas o biomasa, podría reducir las emisiones hasta en un 80% (AmCham Colombia, 2025) en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.

El combustible sostenible para la aviación (SAF), producido a partir de residuos agrícolas o biomasa, presenta un potencial significativo para la disminución de emisiones de carbono en la industria de la aviación (Presidencia de la República de Colombia, 2025). Investigaciones y reportes actuales muestran que el SAF podría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta un 80% en comparación con los combustibles fósiles tradicionales, variando según el tipo de materia prima y el método de producción.

El SAF como estrategia clave de autosostenibilidad

En Colombia, la promoción de SAF se está convirtiendo en una estrategia fundamental para lograr los compromisos climáticos a nivel internacional y fomentar una aviación que sea más sostenible (Aerocivil, 2025). La administración colombiana ha trazado un plan para producir 100 millones de galones de SAF para el año 2035 y hasta 450 millones para 2050 (El Espectador, 2025), concentrándose principalmente en el uso de recursos agrícolas y desechos locales.

La colaboración entre Ecopetrol y la Aeronáutica Civil, mediante la iniciativa "SAF Vuela", fomenta la investigación, la producción y el uso gradual del SAF, con el objetivo de que Colombia se establezca como un líder regional en la elaboración de este biocombustible avanzado (Bloomberg Línea, 2025; Ebrahimi, Szmerekovsky, Golkar et. al. , 2023). Este proyecto destaca la utilización de materias primas como aceites reciclados, desechos agrícolas y grasas de origen animal, con el fin de asegurar la viabilidad técnica y la sostenibilidad medioambiental en el proceso de producción (Aerocivil y Ecopetrol, 2025). Con esta estrategia, la implementación de combustibles sostenibles para la aviación se presenta como una oportunidad real para disminuir de manera significativa las emisiones en el sector aeronáutico, promoviendo una transición energética equitativa, moderna y conforme a los criterios globales de sostenibilidad (Grimme, 2023).

La conexión de Colombia con mecanismos internacionales representa otro elemento crucial para una aviación sostenible. Es fundamental que el país participe de manera activa en iniciativas como CORSIA, impulsada por la Organización de Aviación Civil Internacional, que tiene como objetivo compensar y disminuir las emisiones del sector aéreo (ICAO, 2025; Teoh, Schumann, Voigy et. al., 2022). Involucrarse en estos foros garantiza no solo que las políticas locales estén alineadas con los estándares internacionales, sino que también abre puertas a financiamiento y tecnología (Secchi, Barchi, Macii et. al., 2021). Además, fortalecer las colaboraciones y el apoyo técnico con otras naciones permitirá a Colombia compartir conocimientos, obtener ayuda especializada y acelerar su integración en la transición global hacia una aviación más ecológica.

Para asegurar que estas metodologías tengan éxito, es necesario implementar una serie de acciones que se apoyen mutuamente. En primer lugar, es fundamental establecer un

marco normativo que se alinee con los estándares internacionales, lo que facilitará la adopción de innovaciones y tecnologías. Asimismo, es vital promover la inversión en infraestructuras avanzadas para la aviación, enfocándose en la electrificación de aeropuertos y en la creación de combustibles sostenibles. Fomentar la colaboración entre el sector público y el privado será esencial en este proceso, así como el perfeccionamiento de competencias técnicas en todos los niveles del sector (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2025b). Finalmente, la participación activa de Colombia en iniciativas y acuerdos internacionales, como CORSIA, contribuirá a garantizar la disponibilidad de recursos y la alineación con los objetivos globales.

Conclusiones

La rápida adopción a nivel mundial del Combustible Sostenible de Aviación (SAF) ha sido impulsada por una combinación de regulaciones avanzadas, incentivos económicos bien pensados y acuerdos contractuales sólidos. Europa, con su normativa como ReFuelEU y un fuerte enfoque en la producción y el uso local de SAF, junto con Estados Unidos, que se apoya en subsidios fiscales y grandes compromisos de compra a largo plazo, han liderado el camino, estableciéndose como modelos en términos de volumen y regulación. A la luz de este panorama, la unión de políticas visionarias y mercados activos han hecho posible no solo aumentar la disponibilidad de SAF, sino también sentar las bases para su futura expansión.

Es importante señalar que áreas como América Latina y Asia-Pacífico, aunque todavía tienen un nivel de desarrollo inferior en cuanto a volumen, están mostrando esfuerzos conjuntos y específicos, enfocándose en la innovación y la creación de cadenas productivas a nivel local. Ejemplos como el de Colombia, con la colaboración entre Ecopetrol y LATAM

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

y su eficaz utilización de SAF coprocesado, así como los proyectos piloto en aumento en Asia, han evidenciado un deseo activo de participar en esta transformación estructural hacia una aviación más sostenible.

Sin embargo, hay obstáculos frecuentes como los que se derivan de los gastos de producción del SAF, los cuales tienden a ser mayores en comparación con el combustible de aviación convencional, además es importante referir que la infraestructura en todo el mundo todavía necesita ser desarrollada y actualizada. A pesar de esto, el avance tecnológico y la economía de escala son elementos alentadores que, junto con el aumento de la demanda inducida legalmente, pueden ayudar a disminuir de manera notable estos costos adicionales en un periodo de tiempo medio y largo.

Otro aspecto clave es la incorporación de sistemas de compensación ambiental (por ejemplo, los créditos de carbono) y metodologías de seguimiento claro, además de potenciar las cadenas productivas en las regiones. Estas acciones no solo contribuyen a una disminución efectiva de las emisiones, sino que también aseguran la viabilidad social y económica del SAF en el futuro, previniendo desajustes o repercusiones adversas.

Desde la perspectiva político-institucional, la IATA promueve la existencia de políticas globales coherentes que no favorecen una tecnología en particular, lo que posibilita que cada área use sus recursos y ventajas, fomentando la innovación y la competencia. Entre estas directrices, la imparcialidad tecnológica y el refuerzo de estímulos financieros, como ayudas económicas directas, beneficios fiscales y apoyo en la financiación de infraestructuras productivas, son elementos cruciales en el plan para que el SAF crezca a nivel mundial.

Además, la IATA enfatizó que las obligaciones de mezcla de SAF deben ser acompañadas por planes de mercado y ayudas financieras; de lo contrario, se podrían incrementar los costos para el consumidor final o desincentivar la inversión. Por esta razón, la entidad creó herramientas técnicas de gran efecto:

- SAF Registry de la IATA (2025). Esta plataforma global en línea garantiza el seguimiento, la integridad y la claridad en la adquisición y uso del SAF, facilitando que los beneficios ecológicos sean informados, validados y reclamados sin posibilidad de fallos o duplicaciones en los registros. Esta novedad ha fortalecido la confianza de las autoridades, los operadores y los consumidores en el nuevo mercado del SAF.
- Metodología estandarizada de accounting & reporting (2025). La estandarización de los procedimientos para medir y reportar la disminución de emisiones vinculadas al SAF, permitió la compatibilidad entre diversas normas nacionales e internacionales, garantizando la conformidad con pautas globales como CORSIA (OACI/ICAO) y los estándares más elevados de la industria. Lo que ha proporcionado validez y capacidad de comparación a los resultados ambientales de cada participante en el sector.

En síntesis, todas las estrategias mencionadas demuestran que la transición hacia la descarbonización del sector aéreo mediante el SAF es un fenómeno mundial que se adapta a diferentes condiciones regionales, pero tiene un objetivo común: conseguir una disminución efectiva de emisiones y cumplir con los compromisos de neutralidad climática para 2050. Las bases para una aviación sostenible, competitiva y realmente orientada hacia el futuro se establecieron a través del marco político-tecnológico liderado por la IATA y fortalecido por

regulaciones a nivel nacional y regional, además de instrumentos para la estandarización y la transparencia.

Para reducir el impacto ambiental de la aviación, es esencial una navegación aérea sostenible, la cual se logra mejorando las operaciones aéreas con tecnologías, políticas y procedimientos que reducen el uso de combustible y la emisión de gases de efecto invernadero. Colombia, que cuenta con una amplia conectividad aérea y posee una posición geopolítica privilegiada, a su vez que una geografía complicada, tiene la oportunidad de poner en marcha estas prácticas sostenibles para mejorar la eficiencia operativa y ayudar a disminuir su huella ambiental, cumpliendo así con los compromisos internacionales de descarbonización.

Referencias

- Aerocivil. (23 de Enero de 2025). *Colombia producirá 100 millones de galones de combustible sostenible de aviación para 2035 y 450 millones para 2050*. Obtenido de *Ámbito Jurídico*: <https://www.ambitojuridico.com/noticias/mercantil/mercantil-propiedad-intelectual-y-arbitraje/colombia-producira-100-millones-de>
- Aerocivil y Ecopetrol. (10 de Julio de 2025). *Aerocivil y Ecopetrol firman Memorando de Entendimiento para impulsar desarrollo de los combustibles sostenibles de aviación en Colombia*. Obtenido de Aerocivil & Ecopetrol: <https://aviationclubcenter.com/index.php/2025/07/10/aerocivil-y-ecopetrol-firman-alianza-para-promover-combustibles-sostenibles-de-aviacion-en-colombia/>
- Aeronáutica Civil de Colombia. (2019). *Reglamento Aeronáutico Colombiano RAC 216: Normas Ambientales para la Aviación Civil*. Obtenido de Organismo de Aviación Civil e Infraestructura Aérea: <https://repositorio.utp.edu.co/bitstreams/42068886-14fb-4ea8-b552-daca030177>
- Aeropuerto Internacional El Dorado. (23 de Agosto de 2023). *El Dorado connects with its neighbors consolidating employability initiatives, solar panel systems in schools and parks made from recycled plastic*. Obtenido de Aeropuerto Internacional El Dorado: <https://eldorado.aero/comunicados/el-aeropuerto-el-dorado-connects-with->

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

its-neighbors-consolidating-employability-initiatives-solar-panel-systems-in-schools-and-parks-made-from-recycled-plastic

Agencia Europea de Seguridad Aérea. (2025). *Informe Medioambiental de la Aviación Europea 2025*. Obtenido de Agencia Europea de Seguridad Aérea:

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_BROCHURE_WEB_es_v2.pdf

Agencia Europea de Seguridad Aérea. (2025). *Informe Medioambiental de la Aviación Europea 2025*. Agencia Europea de Seguridad Aérea.

Air France Colombia. (2025). *Combustibles de Aviación Sostenibles*. Obtenido de Air France Colombia: <https://www.airfrance.com.co/information/developpement-durable/carburants-aviation-durables>

Alruwaili y Cipcigan. (2022). Airport electrified ground support equipment for providing ancillary services to the grid. *Electric Power Systems Research*.

Ambrosio, de Sousa, Kanieski et. al. (2025). Sustainable Aviation Fuels: Opportunities, Alternatives and Challenges for Decarbonizing the Aviation Industry and Foster the Renewable Chemicals. *General Economics*.
doi:<http://doi.org/10.48550/arXiv.2504.03880>

AmCham Colombia. (10 de Julio de 2025). *Aerocivil y Ecopetrol firman Memorando de Entendimiento para impulsar desarrollo de los combustibles sostenibles de aviación en Colombia*. Obtenido de AmCham Colombia:
<https://amchamcolombia.co/noticias-afiliados/aerocivil-y-ecopetrol-firman-memorand>

ANI Colombia. (2023). *La sostenibilidad: eje fundamental de la operación del sector aéreo en Colombia*. Obtenido de Agencia Nacional de Infraestructura:
<https://www.ani.gov.co/la-sostenibilidad-eje-fundamental-de-la-operacion-del-sector-aereo-en-colombia>

ArchDaily. (2019). *Aeropuerto de Bogotá contará con el sistema de paneles solares más grande de Latinoamérica*. Obtenido de ArchDaily:
<https://www.archdaily.co/co/905135/aeropuerto-de-bogota-contara-con-el-sistema-de-paneles-solares-mas-grande-de-latinoamerica>

ASTM International. (2024). *ASTM D7566-24: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons (ASTM D7566-24)*. ASTM International. . Obtenido de ASTM International:
<https://www.astm.org/standards/d7566.html>

Aviaciononline. (26 de Junio de 2025). *"Hay más de quince proyectos en Latinoamérica para producir SAF", afirma ejecutivo de IATA*. Obtenido de Aviaciononline:

<https://www.aviacionline.com/pendiente-pedro-de-la-fuente-expone-desafios-climaticos-y-oportunidades-para-la-aviacion-en-america-latina>

- Becken, S. (2020). Carbon offsetting in aviation: Environmental and social challenges. *Journal of Sustainable Tourism*, 28(8), 1161-1179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.10.023>
- Bhatt, Zhang, Milbrandt et. al. (2023). Evaluation of performance variables to accelerate the deployment of sustainable aviation fuels at a regional scale. *Energy Conversion and Management*, volume 275, 1-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116441>
- Bloomberg Línea. (2025). *La estrategia de Ecopetrol y Aerocivil para impulsar combustibles sostenibles de aviación*. Obtenido de Bloomberg Línea: <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/colombia/la-estrategia-de-ecopetrol-y-aerocivil-para-impulsar-combustibles-sostenibles-de-avia>
- C40 Cities. (2022). *Estrategia Carbono Neutral del Aeropuerto Internacional de San Francisco*. Obtenido de C40 Cities: <https://www.c40.org/es/case-studies/sfo-carbon-neutral/>
- Calvo. (18 de Septiembre de 2023). *Aprobado el ReFuelEU Aviation sobre SAF*. Obtenido de Fly news Información aeroespacial y de defensa Español: <https://fly-news.es/sostenibilidad/aprobado-el-refueleu-aviation-sobre-saf>
- Cámara de Representantes de Colombia. (2 de Abril de 2025). *Avanzó proyecto de combustibles sostenibles de aviación*. Obtenido de Cámara de Representantes de Colombia: <https://www.camara.gov.co/avanzo-proyecto-de-combustibles-sostenibles-de-aviacion>
- Camargo, Coral y Abril. (2025). Aeronautical emissions in Colombia: Assessment of past emissions and projected emissions by 2030. *Cleaner Engineering and Technology*, 22, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2025>
- Camargo, Coral, Abril. (2025). Aeronautical emissions in Colombia: Assessment of past emissions and projected emissions by 2030. *Cleaner Engineering and Technology*, 22, 101051, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2025>
- Capaz, G. S. (2020). Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. *Modeling and Analysis*. doi:<https://doi.org/10.1002/bbb.2168>
- Celsia y Odinsa. (2018). *Inician en El Dorado el proyecto de energía solar más grande de América Latina*. Obtenido de <https://www.celsia.com/es/noticias/celsia-y-odinsa-inician-en-el-dorado-el-proyecto-de-energia-solar-en-aeropuertos-mas-grande-de-america-latina/>

Continuous climb and descent operations (CCO / CDO). (2025). Obtenido de Eurocontrol:
<https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

Creswell. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). *SAGE Publications*.

D’Ascenzo, Vinci, Savastano et. al. (2024). Comparative Life Cycle Assessment of Sustainable Aviation Fuel Production from Different Biomasses. *Sustainability, MDPI*, 1-21. doi:<https://doi.org/10.3390/su16166875>

Dhar, Lee, Kajino et. al. (2022). Chapter 10. Transport. En Jaramillo, Kant y Newman, *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change* . IPCC AR6 WGII.

EASA. (2024). *European aviation environmental report 2025*. Obtenido de European Union Aviation Safety Agency: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_Book_v4

Ebrahimi, Szmerekovsky, Golkar et. al. . (2023). Designing a Renewable Jet Fuel Supply Chain: Leveraging Incentive Policies to Drive Commercialization and Sustainability. *Mathematics 2023, 11(24), 4915*.
doi:<https://doi.org/10.3390/math11244915>

Ecopetrol y LATAM Airlines. (2025). *Ecopetrol y LATAM impulsan la aviación sostenible en Colombia*. Obtenido de Ecopetrol y LATAM Airlines:
<https://latamobility.com/ecopetrol-latam-aviacion-sostenible-colombia/>

El Dorado Aeropuerto. (2021). *Proyectos para la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental*. Obtenido de El Dorado Aeropuerto:
<https://eldorado.aero/comunicados/el-dorado-aeropuerto-destacado-en-la-region-por-combatir-el-cambio-climatico-y-reducir-la-huella-de-carbono-en-medio-de->

El Espectador. (22 de Enero de 2025). *Aerocivil traza el plan para la producción de combustible sostenible para aviación*. . Obtenido de El Espectador:
<https://www.elespectador.com/economia/aerocivil-traza-el-plan-para-la-produccion-de-combustible-sostenible-para-aviacion-noticias-colombia>

Eurocontrol. (2025). *Continuous climb and descent operations (CCO / CDO)*. Obtenido de Eurocontrol: <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

Fortune Business Insights. (2025). *Sustainable Aviation Fuel Market Report*. Obtenido de Fortune Business Insights: <https://www.fortunebusinessinsights.com/es/sustainable-aviation-fuel-saf-market-111563>

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

- Grimme. (2023). The Introduction of Sustainable Aviation Fuels—A Discussion of Challenges, Options and Alternatives. *German Aerospace Center (DLR)*. doi:<https://doi.org/10.3390/aerospace10030218>
- Hernández Sapiere, R. (2014). Metodología de la investigación. En R. Hernández Sampieri, *Parte 3. El proceso de la investigación cualitativa* (págs. 355-528). Mc Graw Hill.
- Hernández, Fernández y Baptista. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). Mexico: McGraw-Hill Education.
- Huber, Birkelbach y Hofmann. (2024). Evaluating synthetic fuel production: A case study on the influence of electricity and CO2 price variations. *Arxiv*. doi:[arXiv:2310.14792](https://arxiv.org/abs/2310.14792)
- IATA. (2021). *Annual review 2021*. Obtenido de International Air Transport Association : <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2021>
- IATA. (2024). *Optimizing operational efficiency in aviation*. Obtenido de International Air Transport Association: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/operational-efficiency/>
- IATA. (2024). *Optimizing operational efficiency in aviation*. Obtenido de International Air Transport Association: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/operational-efficiency/>
- IATA. (Enero de 2025). *SAF Accounting & Reporting Methodology*. Obtenido de IATA: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/reports/saf-accounting-reporting-methodology>
- IATA. (2025b). *Sustainable aviation fuels fact sheet*. Obtenido de International Air Transport Association: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-and-sustainability.pdf>
- ICAO. (2018). *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. Obtenido de International Civil Aviation Organization: <https://www.icao.int/environmental-protection/sustainable-aviation-fuels-saf>
- ICAO. (2023). *Continuous Descent Operations (CDO) Manual*. Obtenido de International Civil Aviation Organization : https://applications.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/102600063919931_en.pdf

- ICAO. (2025). *Colombia se posiciona como líder en combustibles de aviación sostenibles*. Obtenido de International Civil Aviation Organization: <https://www.icao.int/es/news/colombia-advances-leader-sustainable-aviation-fuels>
- ICAO. (2025). *Guide on environmental assessment of operational changes in aviation*. Obtenido de International Civil Aviation Organization: https://www.icao.int/sites/default/files/2025-04/10031_es_0
- Infobae Colombia. (10 de Julio de 2025). *Ecopetrol y la Aeronáutica Civil acuerdan impulsar combustible sostenible de aviación: buscan producir 450 millones de galones SAF para 2050*. Obtenido de Infobae Colombia: <https://www.infobae.com/colombia/2025/07/10/ecopetrol-y-la-aeronautica-civil->
- International Air Transport Association. (4 de Abril de 2025). *IATA Launches Global SAF Registry: Driving Aviation’s Green Transition*. Obtenido de International Air Transport Association: <https://asune.com/us/blog/iata-launches-global-saf-registry-driving-aviations-green-transition>
- Keiser, Schnoor, Pupkes. (2023). Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. *Journal of Air Transport Management*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102418>
- Klimczyk, Jasiński, Niklas et. al. (2025). Sustainable Aviation Fuels: A Comprehensive Review of Production Pathways, Environmental Impacts, Lifecycle Assessment, and Certification Frameworks. *Energies*, 1-35. doi:<https://doi.org/10.3390/en18143705>
- Krippendorff. (2018). *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology (4th ed.)*. SAGE Publications.
- Kvale, S. (2011). *Las entrevistas en investigación cualitativa*. Madrid, España: Morata.
- Lee, Faey, Skrowron et. al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 1-17.
- Lee, Fahey, Forster et al. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 3520-3537.
- López, Melgar, Bakiu. (2023). Roadmap towards sustainable aviation fuel (SAF) in Colombia through an in-depth analysis of essential topics. *Energies*, 16(15), 5667, 1-25. doi:<https://doi.org/10.3390/en16155667>
- López, Melgar, Bakiu et. al. . (2023). Roadmap towards sustainable aviation fuel (SAF) in Colombia through an in-depth analysis of essential topics. *Energies*, 16(15), 5667, 1-25. doi:<https://doi.org/10.3390/en16155667>

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

- López, Posada, Silva et. al. (2023). Diagnosis of Challenges and Uncertainties for Implementation of Sustainable Aviation Fuel (SAF) in Colombia, and Recommendations to Move Forward. *Energies*, 1-25.
doi:<https://doi.org/10.3390/en16155667>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2025). *Inicia la transición energética en los cielos de Colombia con ruta hacia la descarbonización del transporte aéreo*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía de Colombia:
<https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/inicia-la-transici%C3%B3n->
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (1 de Enero de 2025b). *Minenergía abre la puerta al Combustible Sostenible de Aviación*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía de Colombia: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/minenergia-abre-la-puerta-al-combustible-sostenible-de-aviacion-saf>
- Moeve Global. (4 de Marzo de 2025). *Aeropuertos del futuro: Sostenibles y inteligentes*. Obtenido de Moeve Global: [v}https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/aeropuertos-sostenibles-inteligentes-digitalizacion](https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/aeropuertos-sostenibles-inteligentes-digitalizacion)
- Moeve Global. (2025b). *Aeropuertos sostenibles e inteligentes: Innovaciones y digitalización*. Obtenido de Moeve Global:
<https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/aeropuertos-sostenibles-inteligentes-digitalizacion>
- NREL. (22 de Abril de 2025). *Aviation Energy Futures*. Obtenido de NREL: https://www-nrel-gov.translate.goog/transportation/aviation-energy-futures?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- OACI. (2025). *Colombia se posiciona como líder en combustibles de aviación sostenibles*. Obtenido de Organización de Aviación Civil Internacional:
<https://www.icao.int/es/news/colombia-advances-leader-sustainable-aviation-fuels>
- Okolie, Awotoye, Tabat et. al. (2023). Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways. *iScience*, 1-24.
doi:[10.1016/j.isci.2023.106944](https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106944)
- Presidencia de la República de Colombia. (29 de Enero de 2025). *Colombia definió hoja de ruta para producir combustible sostenible de aviación*. Obtenido de Presidencia de la República de Colombia:
<https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Colombia-definio-hoja-de-ruta-para-producir-combustible-sostenible-de->
- Prussi, Lee, Wang, Malina, Falterm. (2021). CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle greenhouse gas emissions for aviation fuels.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111398, 1-9.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>
- Raimundo, Baltazar y Cruz. (2023). *Sustainability in the airports ecosystem: a literature review*. *Sustainability*, 15(12), . doi:<https://doi.org/10.3390/su151212325>
- Rodriguez y Lee. (2023). Contrail radiative dependence on ice particle. *Environmental research*, 1-8.
- Romero, Mayorga, Gómez et. al. (2025). Life Cycle Assessment (LCA) of the Production of Sustainable Aviation Fuels (SAF) in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, Vol, 117,, 343-348. doi:10.3303/CET25117058
- Sanchez. (15 de Abril de 2025). Contexto general del SAF. (Torres, Entrevistador)
- Schäfer, Barrett y Doyme. (2019). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 160–166. doi:DOI: 10.1038/s41560-018-0294-x
- Secchi, Barchi, Macii et. al. (2021). Multi-objective battery sizing optimisation for renewable energy communities with distribution-level constraints: A prosumer-driven perspective. *Applied Energy*.
- Teoh, Schumann y Gryspeerdt . (2022). Aviation contrail climate effects in the North Atlantic from 2016 to 2021. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 10919–10935.
doi:<https://doi.org/10.5194/acp-22-10919-2022>
- Teoh, Schumann, Voigy et. al. (2022). Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate. *Environmental Science y Technology*, 17246-17255.
- Thesauro. (2015). *Entrada “aeronave”*. En *Glosario de términos aeronáuticos (Edición 07)*. Obtenido de Aeronáutica Civil de Colombia: <https://www.aac.gob.sv/wp-content/uploads/2022/06/RAC-01-Rev.07.pdf>
- University Sheffield. (2025). Investigating the Impact of Reducing the Aromatic Content of Kerosene. *University Sheffield*, 1-18. Obtenido de University Sheffield.
- Wu, Zhang, Zhu et. al. (2024). Experimental performance of a low-grade heat driven hydrogen production system by coupling the reverse electrodialysis and air gap diffusion distillation methods. *Energy Conversion and Management*, Volume 301, 117994. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117994>
- Yi, Zhong, Liu et. al. (2021). Emissions of air pollutants from sintering flue gas in the Beijing-Tianjin-Hebei area and proposed reduction measures. *Journal of Cleaner Production*, Volume 304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126958>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods*. Sage.

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
Bogotá D.C., Colombia

Zengerling, Gesso, Linke et. al. (2024). Operational Improvements to Reduce the Climate Impact of Aviation—A Comparative Study from EU Project ClimOP. *Applied Sciences*. doi:<https://doi.org/10.3390/app13169083>

Zheng, Wang y Jiang. (2024). Carrot or stick? Environmental and welfare implications of sustainable aviation fuel policies. *Transportation Research Part B: Methodological*.