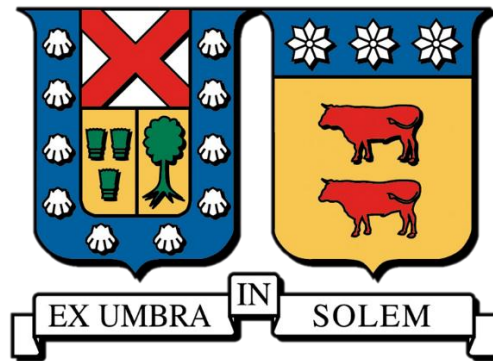


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA**

**SANTIAGO - CHILE**



**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE  
COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN SOSTENIBLE (SAF) CONSIDERANDO LA  
DEMANDA DE CHILE**

**EDGARD WLADIMIR VERA SILVA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL**

**PROFESOR GUÍA:**

**MARTINUS POTTERS**

**PROFESOR CORREFERENTE:**

**CRISTIAN CARVALLO**

**Agosto 2026**

# CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

## 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** Análisis de Prefactibilidad para la Producción Nacional de Combustible de Aviación Sostenible (SAF) Considerando la Demanda de Chile

**Nombre del candidato(a):** Edgard Wladimir Vera Silva

**Carrera / Grado:** INGENIERÍA EN AVIACIÓN COMERCIAL

**Campus:** Santiago Vitacura ; **Departamento:** AERONÁUTICA

## 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Martinus Potters, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

## 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

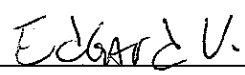
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

## 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 07/08/2026 ; **Firma:** 

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 07/08/2026 ; **Firma:** 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*



# Índice

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Índice de gráficos.....                                              | 4  |
| Índice de Figuras .....                                              | 4  |
| Índice de Tablas.....                                                | 4  |
| Resumen Ejecutivo .....                                              | 5  |
| Abstract.....                                                        | 7  |
| Introducción .....                                                   | 8  |
| 1    Antecedentes Generales.....                                     | 10 |
| 1.1    Justificación del tema.....                                   | 10 |
| 1.2    Objetivos.....                                                | 13 |
| 1.3    Metodología .....                                             | 14 |
| 1.4    Alcance .....                                                 | 15 |
| 2    Estado del arte .....                                           | 16 |
| 2.1    Antecedentes.....                                             | 16 |
| 2.1.1    Combustibles tradicionales .....                            | 16 |
| 2.1.2    Combustibles alternativos .....                             | 18 |
| 2.1.2.1    Combustible de sustitución directa (Drop-in).....         | 18 |
| 2.1.2.2    Combustibles de sustitución no directa (Non-Drop in)..... | 19 |
| 2.1.3    Métodos de conversión .....                                 | 21 |
| 2.1.3.1    Fisher-Tropsch (FT) .....                                 | 21 |
| 2.1.3.2    Alcohol – to – Jet (AtJ) .....                            | 22 |
| 2.1.3.3    Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados (HEFA) .....     | 23 |
| 2.1.4    Avances a nivel Internacional de SAF .....                  | 24 |
| 2.1.4.1    Principales empresas que producen de SAF.....             | 24 |
| 2.1.5    Evolución histórica y tecnología del SAF .....              | 26 |
| 2.1.5.1    Antecedentes históricos del desarrollo de SAF .....       | 26 |
| 2.1.5.2    Avances tecnológicos por etapas.....                      | 28 |
| 2.1.5.3    Perspectiva tecnológica actual .....                      | 29 |
| 2.1.5.4    Situación en Latinoamérica .....                          | 29 |



|           |                                                        |    |
|-----------|--------------------------------------------------------|----|
| 2.1.5.5   | Desafíos globales y regionales del SAF .....           | 36 |
| 2.1.5.5.1 | Infraestructura, almacenamiento y logística.....       | 41 |
| 2.2       | Marco teórico .....                                    | 43 |
| 2.2.1     | Combustible de aviación sostenible (SAF).....          | 43 |
| 2.2.2     | Criterios de sostenibilidad del SAF .....              | 44 |
| 2.2.3     | Evaluación de proyectos generales .....                | 46 |
| 2.2.3.1   | Estudio de viabilidad técnica .....                    | 46 |
| 2.2.3.2   | Viabilidad financiera .....                            | 47 |
| 2.2.3.3   | Viabilidad económica .....                             | 47 |
| 2.2.3.4   | Viabilidad ambiental .....                             | 48 |
| 2.2.3.5   | Viabilidad social .....                                | 49 |
| 2.3       | Propuesta metodológica .....                           | 50 |
| 3         | Desarrollo.....                                        | 52 |
| 3.1       | Investigación de materias primas en Chile .....        | 52 |
| 3.1.1     | Aceite de cocina usado .....                           | 52 |
| 3.1.1.1   | Estimación de potencial de Aceite de Cocina Usado..... | 54 |
| 3.1.2     | Biomasa forestal .....                                 | 56 |
| 3.1.3     | Residuos sólidos municipales .....                     | 57 |
| 3.2       | Capacidad de producción estimada de SAF .....          | 60 |
|           | Conclusiones .....                                     | 63 |
|           | Bibliografía.....                                      | 65 |

## Índice de gráficos

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1-1: Proyección del consumo de combustible de aviación y demanda total de pasajeros en Chile. Fuente: Hoja Ruta SAF..... | 11 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Índice de Figuras

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1:Ciclo de vida de las emisiones de CO2 de combustibles fósiles Fuente: ASE, JAC,2022.....                           | 17 |
| Figura 2-2:Ciclo de vida de las emisiones de CO2 con la producción de SAF. Fuente: ASE, JAC,2022.....                         | 19 |
| Figura 2-3: Proceso de producción HEFA, Fuente: Alan 2025 .....                                                               | 23 |
| Figura 3-1: Principales actores en la cadena de valor del aceite de cocina usado en Chile, Fuente: HINICIO .....              | 53 |
| Figura 3-2: Cobertura a nivel regional de las empresas recolectoras de Aceite de Cocina Usado en Chile, Fuente: HINICIO ..... | 54 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1: Tabla resumen de rendimiento porcentual de cada proceso de conversión, Fuente: elaboración propia .....                                                                                        | 60 |
| Tabla 3-2: Tabla resumen de rendimiento, disponibilidad de materia prima, producción esperada de SAF y porcentaje asociado a la demanda de combustible para el año 2035. Fuente: Elaboración propia ..... | 61 |
| Tabla 3-3: Tabla resumen de rendimiento, disponibilidad de materia prima, producción esperada de SAF y porcentaje asociada a la demanda de combustible para el año 2050. Fuente: Elaboración propia ..... | 61 |

## Resumen Ejecutivo

En la actualidad la industria aérea enfrenta proyecciones que anticipan un crecimiento en la demanda de pasajeros para las próximas décadas. Este fenómeno conlleva un incremento en el consumo de combustible, el cual se estima que alcanzará un alza del 129% entre los años 2019 y 2050.

Dicha tendencia generará un impacto en el medio ambiente, provocando que las emisiones de dióxido de carbono aumenten de forma proporcional, si se considera que, para el año 2024 Chile contribuyó en un 0,3% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial en el sector aeronáutico.

Ante este escenario, los combustibles de aviación sostenible (SAF) representan una solución viable y estratégica para mitigar y reducir las emisiones de dióxido de carbono en la industria aérea.

Estos biocombustibles, al ser producidos a partir de fuentes renovables y materias primas, tienen la capacidad técnica de disminuir la huella de carbono hasta en un 53%.

Por lo tanto, la adopción de los SAF no solo actúa como un pilar fundamental en la mitigación del cambio climático, sino que también funciona como un motor que promueve la innovación tecnológica y la sostenibilidad a largo plazo del sector aeronáutico.

Bajo este contexto, el propósito de este trabajo de investigación es evaluar la prefactibilidad técnica de producir este tipo de combustible en Chile.

Para alcanzar este objetivo, se llevará a cabo un estudio técnico que contempla el análisis de los recursos disponibles para su producción, la identificación de la infraestructura y tecnología necesaria para el proceso de refinamiento y finalmente, determinar la capacidad de producción que se puede obtener a partir de las materias primas seleccionadas.

Los resultados permitieron identificar que las materias primas con mayor potencial para la producción de SAF en Chile corresponden a la biomasa forestal y los residuos sólidos municipales. Para el escenario proyectado al año 2050, la biomasa forestal permitirá producir aproximadamente 617,5 millones de litros al año, cubriendo un 17,2% de la demanda nacional de combustible de aviación, mientras que los residuos sólidos municipales alcanzarían una producción de 511,3 millones de litros, equivalente al 14,2% de la demanda.

En el caso del aceite de cocina usado, debido a su menor disponibilidad, se estimó una producción de 137,8 millones de litros anuales, cubriendo un 3,8%.

Si bien las tres materias primas continúan representando una alternativa técnica para la producción de SAF, el incremento de la demanda de combustible hacia 2050 reduce su



porcentaje de cobertura, evidenciando la necesidad de complementar estas fuentes con otras materias primas y políticas públicas para alcanzar el objetivo fijado por la Mesa de trabajo público – privado.

## Abstract

Currently, the aviation industry faces projections that anticipate continued growth in passenger demand over the coming decades. This trend will lead to an increase in fuel consumption, which is estimated to rise by 129% between 2019 and 2050.

This trend will have an impact on the environment, causing carbon dioxide emissions to increase proportionally, considering that, in 2024, Chile contributed 0.3% of global greenhouse gas emissions in the aviation sector.

Under this scenario, Sustainable Aviation Fuels (SAF) represent a viable and strategic solution to mitigate and reduce carbon dioxide emissions in the aviation industry.

These biofuels, being produced from renewable sources and feedstocks, have the technical capacity to reduce the carbon footprint by up to 53%.

Therefore, the adoption of SAF not only serves as a fundamental pillar in mitigating climate change, but also acts as a driver for technological innovation and the long-term sustainability of the aviation sector.

Within this context, the purpose of this research is to evaluate the technical pre-feasibility of producing this type of fuel in Chile.

To achieve this objective, a technical study will be carried out, including an analysis of the resources available for its production, the identification of the infrastructure and technology required for the refining process, and, finally, the determination of the production capacity that can be achieved from the selected feedstocks.

The results identified forest biomass and municipal solid waste as the feedstocks with the greatest potential for SAF production in Chile. Under the projected 2050 scenario, forest biomass would enable the production of approximately 617,5 million liters per year, covering 17,2% of the national aviation fuel demand, while municipal solid waste would reach a production of 511,3 million liters, equivalent to 14,2% of the demand.

In the case of used cooking oil, due to its lower availability, an annual production of 137,8 million liters was estimated, covering 3,8% of the projected demand.

Although all three feedstocks continue to represent technically viable alternatives for SAF production, the projected increase in fuel demand by 2050 reduces their percentage of demand coverage, highlighting the need to complement these resources with additional feedstocks and public policies in order to achieve the objective established by the Public–Private Working Group.

## Introducción

En el marco de la batalla contra el cambio climático, los países han adquirido compromisos para alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2050.

La aviación representa el 2.5% de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo y actualmente aporta un 4% al calentamiento global (Ritchie, 2024). A su vez durante la tercera conferencia sobre la aviación y combustibles alternativos de la Organización de Aviación Civil Internacional (2023), fijó un objetivo de reducir en un 5% las emisiones de CO<sub>2</sub> al año 2030 y llegar a cero emisiones en el año 2050, donde genera una canasta de medidas, las cuales consisten en avances tecnológicos que contribuyen en un 34% a la reducción de emisiones, en mejoras operacionales y de infraestructura que aporta un 7%, en medidas basadas en el mercado que aportan un 6% en la reducción de emisiones y por último, en combustible de aviación sostenible (SAF) contribuyendo en un 53%, dando cuenta que este último tiene mayor potencial para llegar a la neutralidad de carbono (OACI, 2022).

En línea con los compromisos internacionales de descarbonización del sector aeronáutico, Chile ha comenzado a desarrollar iniciativas destinadas a promover la producción y utilización de combustibles de aviación sostenible, como conformar una mesa de trabajo público-privada para el desarrollo de SAF, denominado mesa SAF, la cual está conformada por representantes de la Junta de Aeronáutica Civil, del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, del Ministerio de Energía, de la Agencia de Sostenibilidad Energética, de la Empresa Nacional de Petróleo y del Banco Interamericano de Desarrollo donde se propone una meta para el año 2050 que se ocupe un 50% de combustible de aviación sostenible, lo que corresponde en base a las proyecciones de la demanda de combustible para ese año en unos 1.840 millones de litros para la aviación nacional e internacional (Ministerio de Energía et al., 2024).

Por lo que esta memoria se enfocara en la factibilidad de producir combustible de aviación sostenible en Chile, por lo que se analizarán los factores necesarios ya sea cuantificando las mayores materias primas y analizando qué zona de Chile tiene más potencial para desarrollar algún tipo de estas, por ejemplo; aceites de cocina usados, biomasa forestal y/o residuos sólidos municipales.

La investigación corresponde a un estudio con enfoque descriptivo, desarrollado mediante el análisis de información secundaria proveniente de la literatura científica, organismos internacionales, instituciones públicas y documentos técnicos relacionados con la producción de combustible de aviación Sostenibles. Para el cumplimiento de los objetivos se emplearon



métodos de análisis documental y análisis comparativo y en función de los resultados se pretende concluir si es viable producir este combustible en Chile.

## 1 Antecedentes Generales

### 1.1 Justificación del tema

Al año 2024, en Chile, la totalidad del combustible utilizado en el sector de la aviación correspondió a combustible de origen fósil. Este tipo de combustible es obtenido ya sea a través de importaciones desde el extranjero o mediante su producción local, la cual se realiza a partir de la refinación del petróleo crudo en las instalaciones nacionales. Esta dependencia exclusiva de combustibles fósiles refleja una importante brecha en materia de sostenibilidad ambiental dentro del sector aéreo del país.

En este contexto, y considerando el crecimiento proyectado del tráfico aéreo tanto nacional como internacional, el equipo asesor de la Mesa de Combustible Sostenibles para la Aviación (Mesa SAF) ha desarrollado estimaciones respecto al comportamiento futuro de la demanda energética del sector. Según sus proyecciones, el consumo de combustible para la aviación en Chile podría experimentar un aumento del 129% en el periodo comprendido entre los años 2019 y 2050 (*Gráfico 1-1*). Este incremento responde a diversos factores, el desarrollo del turismo, y la expansión del comercio internacional, lo que representa un desafío en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de avanzar hacia alternativas más limpias y sostenibles como los combustibles de aviación sostenible. (Ministerio de Energía et al., 2024)

Este escenario se ve reforzado al considerar las proyecciones de crecimiento en la demanda de pasajeros en Chile durante las próximas décadas.

Según las estimaciones disponibles, el número total de pasajeros transportados pasará de aproximadamente 26 millones en el año 2019 a 43 millones en 2030, alcanzando los 66 millones en 2040 y llegando finalmente a los 97 millones en 2050. Estos aumentos reflejan un crecimiento sostenido en la actividad aérea nacional e internacional como la expansión del turismo, el aumento de la conectividad regional, la mayor accesibilidad al transporte aéreo y el desarrollo de nuevos mercados (Junta Aeronautica Civil, 2020).

Desde una perspectiva cuantitativa, estas cifras representan tasas de crecimiento promedio anual de un 5,2% durante la primera década (2019-2030), un 4,4% en la segunda (2030-2040) y un 3,9% en la última (2040-2050) (*Gráfico 1-1*). Si bien se observa una leve desaceleración progresiva en las tasas de crecimiento a lo largo del tiempo, el aumento absoluto en la cantidad de pasajeros continúa siendo considerable. Este crecimiento sostenido plantea importantes desafíos en términos de la sostenibilidad del sistema del transporte aéreo, dado el consecuente incremento en el consumo de combustible y las emisiones asociadas (Junta Aeronautica Civil, 2020).

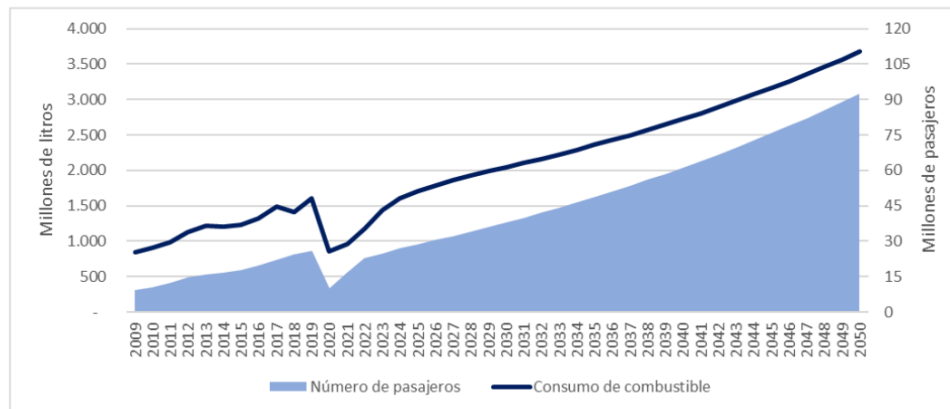


Gráfico 1-1: Proyección del consumo de combustible de aviación y demanda total de pasajeros en Chile. Fuente: Hoja Ruta SAF.

Como se puede apreciar en el *gráfico 1-1*, el incremento sostenido en la demanda de pasajeros está directamente relacionada con el aumento del consumo de combustible dentro del sector de la aviación. Dado que, actualmente, la totalidad de este combustible es de origen fósil, su uso conlleva a la generación de emisiones contaminantes, principalmente gases de efecto invernadero (GEI), que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. En este sentido, la aviación chilena representa una fracción dentro del panorama global de emisiones, aportando aproximadamente un 0,3% del total de GEI asociados a la actividad aérea (DGAC, 2022).

Este aporte, aunque puede parecer pequeño en términos absolutos, cobra importancia cuando se considera el crecimiento acelerado tanto en la cantidad de pasajeros como en el consumo de combustible proyectado para las próximas décadas. Sin una transición hacia fuentes de energía más limpias y tecnologías más eficientes, la huella ambiental del sector aéreo chileno podría expandirse, comprometiendo los objetivos nacionales e internacionales en materia de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental.

Por otro lado, el reemplazo de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles de aviación sostenible representa una oportunidad para reducir las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial. De acuerdo con estudios realizados por Air Transport Action Group indican que la utilización de SAF puede contribuir a una disminución de hasta un 53% en las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los combustibles convencionales (Group A. T., 2021). Esta reducción es importante para avanzar hacia la descarbonización del sector aéreo y cumplir con los compromisos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, la adopción de los combustibles de aviación sostenibles enfrenta una serie de barreras que dificultan su implementación.

En particular, en Sudamérica, uno de los principales desafíos es que actualmente no existe producción local de SAF, lo que obliga a importar este tipo de combustibles desde otros

mercados internacionales. Esta dependencia de importaciones se traduce en un costo más alto, situándose entre dos y cuatro veces el precio de los combustibles fósiles tradicionales (OACI, 2022).

Además, la materia prima necesaria para la producción de SAF presenta también limitaciones. Estos combustibles pueden elaborarse a partir de diversos recursos como biomasa forestal, aceites de cocina usados, residuos sólidos municipales, así como cultivos específicos y sus desechos agrícolas. Sin embargo, la disponibilidad, recolección y procesamiento eficiente de estos insumos constituye otra barrera para la producción local de combustibles de aviación sostenible (Ministerio de Energía et al., 2024).

Frente a este escenario, si bien Chile dispone de materias primas con potencial para la producción de SAF, existen escasos estudios de factibilidad técnica que evalúan de manera integral la disponibilidad de dichas materias primas, las tecnologías de producción aplicables a su capacidad para abastecer parte de la demanda nacional. En este contexto, el presente estudio busca contribuir a reducir la brecha mediante la evaluación de la factibilidad técnica para producir combustible SAF en Chile, considerando la disponibilidad de materias primas, las tecnologías de conversión y el potencial de producción asociado a cada alternativa.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo General

Analizar la factibilidad técnica de producir combustible de aviación sostenible (SAF) en Chile, con el fin de contribuir a la descarbonización del sector aéreo, llevándose a cabo mediante la evaluación de recursos naturales disponibles y tecnología de producción adecuada.

### Objetivos específicos

1. Identificar los beneficios y desafíos asociados a la producción de SAF y cuantificar las principales materias primas disponibles para su producción.
2. Describir los métodos de conversión para obtener combustible SAF.
3. Analizar la demanda proyectada de combustible de aviación en Chile y el potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de SAF.
4. Evaluar la prefactibilidad técnica para producir combustible SAF.

### 1.3 Metodología

La metodología a utilizar para el análisis de factibilidad está asociada con:

- (1) Recopilar información bibliográfica (páginas web, artículos científicos) sobre los beneficios y desafíos que existen en la producción de combustible de aviación sostenible.
- (2) Investigar la situación actual en Chile sobre la producción de este tipo de combustible.
- (3) Describir los distintos procesos que existen para producir este tipo de combustible.
- (4) Identificar y cuantificar los distintos tipos de materia prima que existen para la producción de combustible sostenible en Chile.
- (5) Evaluar la viabilidad técnica de producir combustibles de aviación sostenible en Chile, considerando las tecnologías, disponibilidad de materia prima y potencial de producción.

## 1.4 Alcance

El alcance de esta memoria es de carácter exploratorio y descriptivo debido a que en el mercado europeo existe producción de combustible de aviación sostenible, mientras que en Chile existen limitadas investigaciones que exploren la viabilidad de producir SAF, además se describirán los procesos utilizados para la producción de este tipo de combustible.

Con respecto al alcance geográfico, este es en Chile ya que se analizará las distintas zonas que sean potenciales en materias primas para producir SAF y se tomarán en cuenta datos desde 2019 en adelante.

Por otro lado, esta investigación se limita a un estudio técnico para la producción de combustibles de aviación sostenible considerando la evaluación de materias primas, tecnologías disponibles y capacidad de producción.

No se desarrolla una evaluación económica, financiera o ambiental, debido a que requieren antecedentes de mayor nivel de detalle, tales como estimaciones de inversión, costos de operación, modelos de financiamiento y estudios específicos de impacto ambiental.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Antecedentes

Con el fin de comprender mejor el contexto de la evolución hacia combustibles más sostenibles es necesario proporcionar una visión general sobre los principales combustibles tradicionales que se utilizan actualmente en la aviación. Estos combustibles han sido la base de la industria aeronáutica durante décadas y siguen siendo la principal fuente de energía para las aeronaves en la actualidad.

A pesar de sus ventajas en términos de eficiencia y costo, los combustibles tradicionales también presentan importantes desventajas, especialmente en lo que respecta a sus impactos ambientales, lo que motiva la búsqueda de alternativas más sostenibles. A continuación, se aborda en detalle el uso y las características de estos combustibles convencionales.

#### 2.1.1 Combustibles tradicionales

Los combustibles tradicionales más utilizados en la aviación comercial corresponden al Jet Fuel que cuenta con dos variantes principales el Jet Fuel A-1 y el Jet B, cada uno con características específicas que lo hacen adecuado para diferentes condiciones y necesidades operativas. Ambos combustibles son derivados del petróleo y se someten a estrictos procesos de refinamiento para cumplir con los requisitos de rendimiento y seguridad establecidos para el transporte aéreo (European Aviation School, 2024):

- Jet A-1: es el combustible más utilizado a nivel mundial en la aviación comercial. Se caracteriza por su eficiencia energética y su capacidad para proporcionar una gran potencia con un consumo relativamente bajo, lo que lo convierte en la opción preferida para vuelos de larga distancia y operaciones comerciales regulares. Su fórmula química y características físicas le permiten un rendimiento óptimo en una amplia gama de temperaturas y altitudes, haciendo que sea adecuado para la mayoría de las rutas aéreas en todo el mundo.
- Jet B: está compuesto por una mezcla de nafta y queroseno, y se utiliza principalmente en regiones con climas extremadamente fríos, donde se requiere un combustible que ofrezca un mejor rendimiento en bajas temperaturas. Su composición química le permite mantener fluidez y evitar la congelación en condiciones ambientales adversas, lo que es esencial para vuelos en zonas polares o durante temporadas invernales severas. Sin embargo, debido a su mayor volatilidad y riesgos asociados, su uso está más restringido y es menos común en comparación con el Jet A-1.

Una característica que comparten estos combustibles tradicionales utilizados en la aviación, como el Jet A-1 y el Jet B, es que su ciclo de vida está asociado con la emisión constante de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones no se concentran exclusivamente en el momento de la combustión durante el vuelo, sino que se extienden a lo largo de toda la cadena de valor del combustible, generando impactos ambientales en cada una de sus etapas.

El ciclo comienza con la extracción del petróleo crudo, proceso que implica el uso de energía y maquinaria pesada, así como la emisión directa de GEI y otros contaminantes derivados de la perforación, transporte primario y tratamiento inicial del recurso. Posteriormente, el crudo extraído es sometido a procesos de transformación y el refinamiento, los cuales requieren altas temperaturas y consumen grandes cantidades de energía, principalmente de origen fósil.

Una vez refinado, el combustible debe ser almacenado, distribuido y transportado hasta los centros de consumo, frecuentemente a través de oleoductos, buques, camiones cisterna o trenes, todos los cuales también generan emisiones durante su operación. Finalmente, el combustible es consumido durante el vuelo, donde ocurre la emisión directa de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y otros contaminantes, liberados directamente en la atmósfera.

Esta situación se representa en la *figura 2-1*.

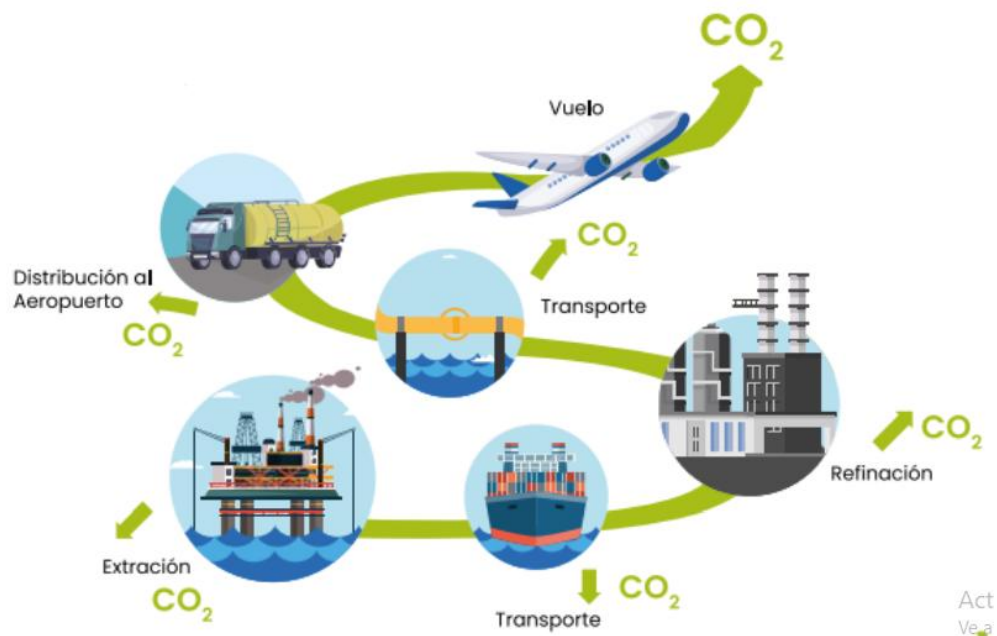


*Figura 2-1: Ciclo de vida de las emisiones de CO2 de combustibles fósiles Fuente: ASE, JAC, 2022.*

## 2.1.2 Combustibles alternativos

### 2.1.2.1 Combustible de sustitución directa (Drop-in)

Dentro de las alternativas a los combustibles tradicionales, una de las opciones viables para la aviación actual es el uso de combustibles de sustitución directa, también conocidos como drop-in fuels. Estos combustibles tienen la ventaja de poseer propiedades fisicoquímicas equivalentes al Jet Fuel convencional, lo que permite su uso inmediato en aeronaves existentes sin necesidad de modificar motores, sistemas de almacenamiento o infraestructura aeroportuaria.

Esta compatibilidad es clave, ya que permite avanzar hacia una reducción del impacto ambiental sin requerir una reconversión tecnológica costosa o disruptiva.

Gracias a esta flexibilidad, los drops-in fuels representan una herramienta estratégica para facilitar una transición progresiva hacia la sostenibilidad en la aviación, al poder mezclarse en distintos porcentajes con combustibles tradicionales. Estos combustibles se clasifican en dos categorías:

- **Combustible de aviación más bajos en carbono (LCAF)**

Los LCAF son producidos mediante procesos que resultan en una menor huella de carbono en comparación con los combustibles convencionales.

Esta reducción de emisiones se alcanza gracias a la aplicación de tecnologías específicas de mitigación, como la captura y uso de carbono, el empleo de energías renovables durante el proceso de refinamiento, o mejoras en la eficiencia energética. Por otra parte, se promueve la implementación de buenas prácticas en todas las etapas de la cadena de suministro, desde la producción y procesamiento hasta la distribución y el consumo final.

Aunque estos combustibles pueden seguir utilizando fuentes fósiles, su enfoque está puesto en optimizar el ciclo de vida del producto para minimizar el impacto ambiental, sin comprometer el rendimiento operativo que requiere la aviación.

- **Combustibles de aviación sostenible (SAF)**

Los SAF por su parte representan una alternativa desde el punto de vista ambiental. Se producen a partir de materias primas renovables o residuos, tal como aceites usados de cocina, residuos forestales, residuos agrícolas, algas, residuos sólidos municipales.

Su producción está sujeta al cumplimiento de criterios de sostenibilidad internacional reconocidos, establecidos en el Anexo 16, Volumen IV de la Convención de Chicago (OACI, CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels, 2021).

Estos criterios buscan garantizar que el ciclo de vida completo del combustible no solo genere una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que además se produzca bajo parámetros ambientales, sociales y económicos sostenibles.

En comparación con los combustibles tradicionales, los SAF permiten una reducción de las emisiones netas de GEI a lo largo de su ciclo de vida, debido a que el carbono emitido durante su combustión ya ha sido previamente capturado de la atmósfera por las materias primas renovables utilizadas en su elaboración.

Esta característica los posiciona como una herramienta esencial en la estrategia global de descarbonización del transporte aéreo, permitiendo avanzar hacia una aviación más limpia, como se muestra en la *figura 2-2*.



*Figura 2-2: Ciclo de vida de las emisiones de CO<sub>2</sub> con la producción de SAF. Fuente: ASE, JAC, 2022.*

### 2.1.2.2 Combustibles de sustitución no directa (Non-Drop in)

Los combustibles de sustitución no directa, conocidos como Non-Drop-In Fuels, son aquellos que no pueden ser utilizados directamente en los motores convencionales de las aeronaves actuales, ya que no son compatibles con las especificaciones técnicas, operativas y de seguridad.

Esto conlleva que, para su implementación efectiva, se requieren modificaciones sustanciales tanto en el diseño de los motores de las aeronaves como en la infraestructura de almacenamiento, distribución y suministro de combustible en los aeropuertos.

Este tipo de combustibles representa una opción a largo plazo dentro del proceso de descarbonización del sector aeronáutico. No obstante, su uso plantea desafíos técnicos y económicos, ya que exige la transformación integral del sistema aeronáutico tradicional, lo

que incluye no solo a las aeronaves, sino también a los sistemas logísticos, normativos y energéticos que las soportan.

Entre los principales ejemplos de combustible de sustitución no directa se pueden mencionar:

- **Electricidad**

Aplicada principalmente en aeronaves eléctricas o híbridas, la electricidad se perfila como una solución viable para vuelos de corta distancia y uso regional. Estas aeronaves funcionan a través de baterías de alta capacidad o mediante sistemas de propulsión híbridos.

Sin embargo, la densidad energética limitada de las baterías actuales y los retos asociados a su peso y autonomía limitan su alcance, siendo aun inviable para vuelos de media o larga distancia.

- **Gas licuado de aviación**

Aunque aún en etapa experimental y con aplicaciones limitadas, el uso de gases licuados como el gas natural licuado (GNL) o gases licuados de petróleo como el propano o butano podrían ser explorados como fuentes de energía alternativas para ciertos tipos de aeronaves.

Sin embargo, al igual que con la electricidad su implementación requeriría aeronaves especialmente diseñadas y sistemas de almacenamiento altamente seguros y eficientes en los aeropuertos.

- **Hidrogeno verde**

Considerado uno de los candidatos más prometedores para alcanzar una aviación libre de emisiones, el hidrogeno verde se obtiene a partir de fuentes de energía renovables mediante procesos como la electrolisis del agua.

Puede ser utilizado en celdas de combustible para generar electricidad a bordo o incluso como combustible directo en motores de combustión especialmente adaptados. A pesar de su gran potencial, el almacenamiento, transporte y manipulación del hidrogeno representa un desafío debido a su baja densidad volumétrica y la necesidad de almacenamiento a altas presiones o en estado líquido a temperaturas extremadamente bajas.

Este tipo de combustibles no pueden ser utilizados en motores convencionales de aeronaves por lo que se requiere cambios en la estructura y las formas de suministro.

Teniendo la contextualización de los combustibles que se utilizan en la aviación, se mencionaran los métodos de conversión respecto de los combustibles de sustitución directa, donde se encuentra el combustible de aviación sostenible (SAF).

### 2.1.3 Métodos de conversión

La producción de combustibles de aviación sostenibles puede llevarse a cabo mediante diversos procesos y tecnologías, los cuales varían en función del tipo de materia prima utilizada y el grado de madurez tecnológica alcanzado.

Algunos de estos procesos aún se encuentran en fase de investigación y desarrollo, mientras que otros ya han sido aprobados por organismos internacionales encargados de establecer los estándares de calidad y seguridad en la industria aeronáutica, como la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Dentro de los métodos que ya han recibido la aprobación por parte de la ASTM para la producción de SAF se encuentran tres procesos principales: Fisher-Tropsch (FT), Alcohol-to-Jet (AtJ) y Esteres y Ácidos Grasos Hidro procesados (HEFA).

Cada uno de estos métodos utiliza rutas tecnológicas distintas y está vinculado a un conjunto específico de materias primas, las cuales pueden incluir biomasa celulósica, aceite de cocina usados, grasas animales, residuos agrícolas y forestales, e incluso residuos sólidos municipales. (OACI, Conversion processes, s.f.)

A continuación, se describirán los tres procesos principales de conversión

#### 2.1.3.1 Fisher-Tropsch (FT)

El proceso Fischer-Tropsch es una tecnología termoquímica altamente avanzada que permite la conversión de materias biogénicas en combustibles líquidos sostenibles para la aviación.

Esta tecnología implica dos etapas fundamentales:

- **Gasificación de biomasa**

Es la cual se someten materiales orgánicos a altas temperaturas en un entorno controlado (con poco o nada de oxígeno), generando así un gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno.

- **Síntesis Fisher-Tropsch**

En esta etapa el gas de síntesis se convierte en hidrocarburos líquidos a través de una reacción catalítica, produciendo así combustibles líquidos como el queroseno sintético.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que los combustibles obtenidos tienen propiedades fisicoquímicas muy similares a los combustibles fósiles tradicionales, lo que permite su integración directa en motores sin necesidad de modificaciones.

Además, este proceso presenta beneficios medioambientales, ya que produce bajas emisiones de azufre, compuestos aromáticos y otras sustancias contaminantes.

Las materias primas que pueden ser utilizadas en el proceso FT incluyen una amplia gama de fuentes orgánicas, tales como:

- Biomasa lignocelulósica (madera, residuos de cosecha)
- Residuos agrícolas y forestales
- Residuos sólidos municipales
- Plásticos reciclados y otros residuos industriales no reciclables

El combustible resultante de este proceso puede ser mezclado con queroseno convencional hasta en un 50%, conforme a los estándares de la ASTM. (Okolie J, 2023)

### **2.1.3.2 Alcohol – to – Jet (AtJ)**

El proceso Alcohol-to-Jet (AtJ) constituye otra vía tecnológica aprobada para la producción de SAF.

Esta ruta se basa en la transformación de alcoholes ligeros, como el etanol o el butanol, en hidrocarburos de cadena larga que cumplen con las especificaciones requeridas para el uso en la aviación comercial.

El proceso incluye varias etapas técnicas bien definidas:

- Producción del alcohol, generalmente a partir de biomasa fermentable como residuos agrícolas o forestales.
- Deshidratación del alcohol, para eliminar las moléculas de agua y formar olefinas.
- Oligomerización, donde las olefinas se combinan para formar cadenas más largas.
- Hidrogenación e hidrotratamiento, para estabilizar y convertir las cadenas largas en hidrocarburos líquidos con propiedades similares al queroseno.

El producto final se denomina queroseno parafínico sintético y es adecuado para su uso en aeronaves comerciales.

Este proceso tiene la ventaja de ser versátil en cuanto a las materias primas utilizadas, ya que puede emplear una gran variedad de recursos renovables de origen biológico, incluyendo:

- Residuos agrícolas
- Biomasa lignocelulósica
- Desechos vegetales
- Cultivos energéticos no alimentarios

El combustible producido mediante la ruta AtJ también puede ser mezclado hasta en un 50% con combustible tradicional, cumpliendo con las especificaciones y certificaciones de seguridad exigidas en la aviación. (Okolie J, 2023)

### 2.1.3.3 Ésteres y Ácidos Grasos Hidro-procesados (HEFA)

El proceso HEFA es actualmente la tecnología más consolidada y ampliamente utilizada para la producción de SAF a escala industrial.

Esta tecnología se basa en la hidrogenación catalítica de lípidos, es decir, la transformación química de aceites y grasas en hidrocarburos, mediante la eliminación del oxígeno y el reordenamiento de las cadenas moleculares.

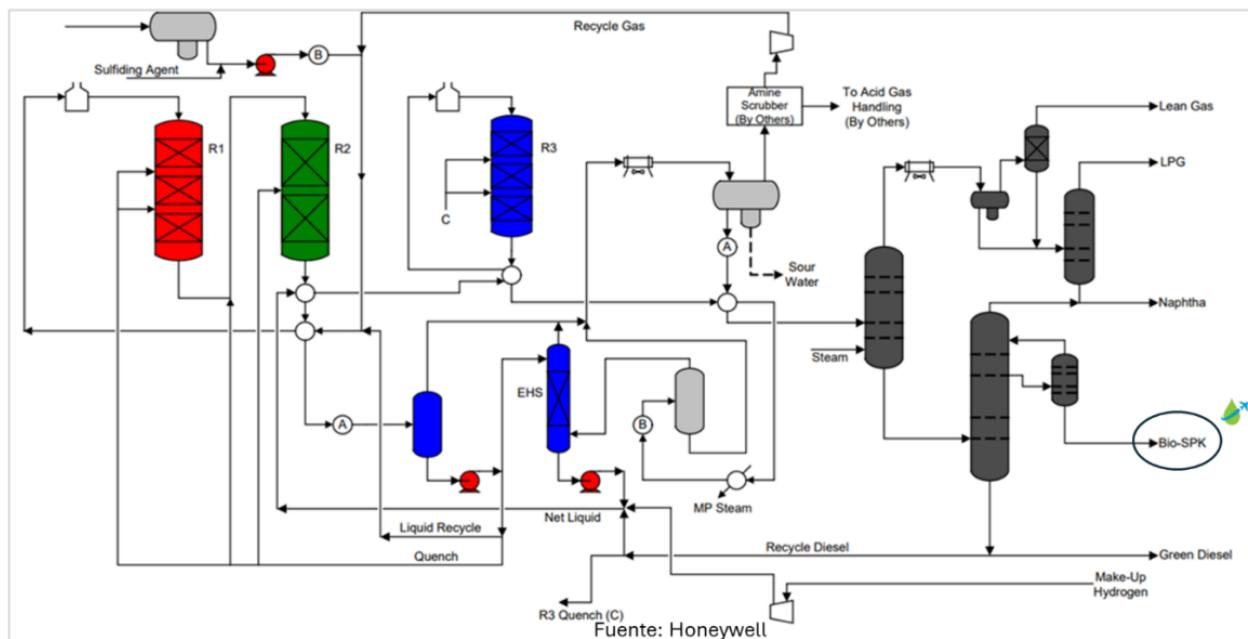


Figura 2-3: Proceso de producción HEFA, Fuente: Alan 2025

Las materias primas que se emplean en el proceso HEFA son de origen lipídico y pueden incluir:

- Aceites vegetales
- Grasas animales
- Aceite de microalgas
- Aceites de cocina usados

Durante el proceso, estos aceites son sometidos a un tratamiento de hidrogenación, en el que se eliminan compuestos oxigenados y se produce un combustible sintético parafínico con características muy similares al queroseno de aviación.

El SAF obtenido mediante HEFA presenta varias ventajas ambientales y operativas, entre ellas:

- Reducción de azufre y compuestos aromáticos, lo que se traduce en una menor emisión de contaminantes atmosféricos.
- Disminución de las emisiones netas de CO<sub>2</sub> durante la combustión.
- Mayor índice de cetano, que mejora el rendimiento del motor y la eficiencia energética.

Este tipo de combustible también cumple con la normativa que permite su mezcla hasta en un 50% con combustible tradicional. (Okolie J, 2023)

Por otro lado, de todas las tecnologías actualmente aprobadas, HEFA representa la vía más madura y desarrollada, de acuerdo con datos del año 2024, este proceso fue responsable de aproximadamente el 85% del volumen total de SAF producido a nivel mundial, y se espera que esta proporción se mantenga o incluso aumente en los próximos cinco años. (IATA, 2023)

Esta ruta presenta diversas ventajas para su implementación en Chile, principalmente porque las plantas de producción pueden instalarse junto a refinerías existentes, permitiendo aprovechar la infraestructura disponible y reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento. Asimismo, las refinerías cuentan con sistemas consolidados para la recepción de materias primas a granel mediante camiones, trenes o embarcaciones, facilitando el abastecimiento continuo del proceso.

En cuanto a la distribución, la infraestructura existente permite transportar el combustible de aviación hacia los principales aeropuertos mediante ductos, ferrocarril o transporte terrestre, optimizando la logística a nivel nacional.

Además, el uso compartido de instalaciones simplifica los procesos de certificación y el mezclado del SAF con combustible convencional, favoreciendo una implementación más eficiente. (Alan, 2025)

## **2.1.4 Avances a nivel Internacional de SAF**

### **2.1.4.1 Principales empresas que producen de SAF**

A medida que la industria aeronáutica avanza hacia la descarbonización y la sostenibilidad ambiental, diversas empresas han tomado un rol protagónico en la producción de combustible de aviación sostenible.

Estas compañías lideran la innovación tecnológica y la implementación de procesos industriales para la generación de combustibles alternativos, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

A continuación, se presentan algunas de las principales empresas productoras de combustible de aviación sostenible a nivel mundial. La selección se realizó considerando su liderazgo en la producción y comercialización de SAF, su capacidad de producción y las alianzas estratégicas establecidas con aerolíneas, aeropuertos, organismos gubernamentales y actores relevantes de la cadena de valor del combustible de aviación sostenible.

- **Neste**

Es una empresa con sede en Finlandia, es ampliamente reconocida como el principal productor mundial de combustible de aviación sostenible, además de ser uno de los mayores fabricantes de diésel renovable. Tras su ampliación de su refinería de Rotterdam la empresa alcanzó una capacidad de producción de 1,5 millones de toneladas de SAF al año consolidando su liderazgo a nivel mundial.

Entre sus productos más destacados se encuentra Neste MY Sustainable aviation fuel, un tipo de combustible sostenible que se elabora a partir de desechos y residuos renovables de origen sostenible, tales como aceite de cocina usado, grasa animal residuales y otras materias primas no comestibles.

Este combustible cumple con los estándares internacionales de calidad y seguridad y esta comercialmente disponible en múltiples mercados a nivel mundial.

Actualmente, Neste cuenta con más de 70 clientes directos, entre los que se incluyen aerolíneas comerciales, operadores privados y empresas logísticas. Además, tiene presencia activa en más de 25 aeropuertos clave en todo el mundo, donde mantiene un suministro continuo y estable de SAF, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono (Neste, 2024).

- **World Energy**

Con base en los Estados Unidos, World Energy es una de las empresas pioneras en la producción de soluciones energéticas de bajo contenido de carbono, y fue la primera en llevar el SAF a escala comercial en Norteamérica.

Fundada con el objetivo de transformar la matriz energética a través del uso de recursos renovables, ha desempeñado un rol clave en el desarrollo temprano y en la expansión del mercado de combustibles sostenibles para la aviación.

El SAF producido por World Energy se elabora sin recurrir a materias primas fósiles, utilizando en su lugar recursos renovables y sostenibles, lo que permite una reducción en las emisiones netas de carbono en comparación con el combustible tradicional.

La empresa opera una de las instalaciones de producción de SAF más importantes de Estados Unidos, ubicada en California, y trabaja en estrecha colaboración con

actores clave del sector aéreo y posee una capacidad de producción cercana a 144 millones de litros de SAF al año.

Entre sus clientes más reconocidos se encuentran empresas de gran influencia como Amazon Air, United Airlines y JetBlue, las cuales han incorporado el SAF de World Energy en sus estrategias de sostenibilidad corporativa y reducción de emisiones (World Energy, 2023).

- **SkyNRG**

Empresa de origen neerlandés, se ha consolidado como una de las compañías más influyentes en el campo del desarrollo, producción y distribución de SAF en Europa y a nivel internacional. Su modelo de negocio se basa en el suministro de combustible de aviación sostenible, fomentando alianzas con aerolíneas, aeropuertos, gobiernos y otras organizaciones para promover la adopción masiva del SAF en el sector. Su capacidad de producción es de 100.000 toneladas de SAF anualmente.

La empresa utiliza una variedad de materias primas sostenibles, entre las cuales se incluyen:

- Aceites de cocina usados
- Grasas animales residuales
- Aceites vegetales no comestibles

SkyNRG cuenta con una amplia red de clientes y colaboradores, que abarca tanto aerolíneas comerciales como aeropuertos internacionales, lo cual le permite tener una presencia en diversas rutas aéreas y hubs de transporte.

Además, participa en proyectos de innovación y desarrollo tecnológico, con el fin de ampliar la disponibilidad de SAF y reducir su costo de producción (SkyNRG, s.f.).

## **2.1.5 Evolución histórica y tecnología del SAF**

### **2.1.5.1 Antecedentes históricos del desarrollo de SAF**

El desarrollo de los combustibles de aviación sostenibles surge como una respuesta a la creciente demanda global de reducción de emisiones de carbono en la industria aeronáutica.

Tradicionalmente, el combustible de aviación se deriva de combustibles fósiles son altos niveles de emisiones. La necesidad de alternativas con bajas emisiones llevó a la exploración de SAF.

Durante la década de 1990, la comunidad internacional comenzó a establecer las bases para la reducción de emisiones mediante instrumentos como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y posteriormente el protocolo de Kioto, los cuales reconocieron la necesidad de limitar las emisiones provenientes de la aviación.

En 2009, cuando la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) presentó en global Framework for Aviation and Alternative Fuels (GFAAF), estableciendo definiciones y lineamientos para los combustibles alternativo. Posteriormente, el Acuerdo de París en 2015 reforzó los compromisos internacionales para reducir emisiones y promovió la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles para sectores difíciles de descarbonizar, como el transporte aéreo.

A partir de 2016, el desarrollo del SAF se aceleró con la adopción del esquema Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviación (CORSIA) por parte de la OACI. Este mecanismo impulsó la incorporación de combustibles sostenibles como una herramienta clave para reducir la huella de carbono de la aviación. En 2017, la OACI definió formalmente el concepto SAF y planteó objetivos para incrementar su participación en el suministro mundial de combustible aeronáutico hacia 2050. Posteriormente, en 2018, se incorporaron estándares ambientales y criterios de sostenibilidad específicos para SAF dentro del Anexo 16 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

Desde el punto de vista tecnológico, las primeras investigaciones se concentraron en la producción de hidrocarburos sintéticos capaces de replicar las propiedades fisicoquímicas del combustible Jet A-1. Con el tiempo se desarrollaron diversas rutas de producción, entre las que destacan HEFA, FT y AtJ, varias de las cuales han sido certificadas por ASTM para su uso comercial en aeronaves.

La etapa de comercialización comenzó formalmente en 2021 con la fase piloto de CORSIA, permitiendo la incorporación progresiva de los SAF en operaciones aéreas comerciales. Desde entonces, gobiernos, aerolíneas y productores de combustible han incrementado sus inversiones para expandir la capacidad productiva y reducir los costos de producción. Actualmente, Europa y Estados Unidos lideran el desarrollo de este mercado mediante regulaciones específicas, incentivos económicos y objetivos obligatorios de mezcla de SAF en aviones (Bofan Wang, 2024).

### 2.1.5.2 Avances tecnológicos por etapas

El desarrollo tecnológico de los combustibles de aviación sostenible ha evolucionado progresivamente desde investigaciones experimentales centradas en biocombustibles hasta sistemas de producción industrial capaces de suministrar combustible certificado para la aviación comercial.

Esta evolución puede dividirse en tres etapas principales

- **Primera etapa: Investigación y demostración tecnológica (1990-2010)**

Durante esta etapa inicial, los esfuerzos se enfocaron en identificar materias primas renovables capaces de sustituir parcial o totalmente al combustible de aviación derivado del petróleo.

Las investigaciones se concentraron en aceites vegetales, grasas animales, residuos agrícolas y biomasa lignocelulósica. Paralelamente, se desarrollaron los primeros procesos de conversión termoquímica y bioquímica destinados a producir hidrocarburos con características similares al combustible Jet A-1.

Uno de los hitos fue la certificación en 2009 de la ruta Fischer-Tropsch por parte de ASTM, convirtiéndose en la primera tecnología aprobada para producir SAF a escala comercial.

- **Segunda etapa: Consolidación tecnológica y certificación industrial (2011-2020)**

Durante esta fase se produjo una rápida expansión de las tecnologías de producción. En 2011 fue certificada la ruta HEFA, la cual utiliza aceites vegetales, grasas animales y aceites de cocina usados como materia prima. Debido a su elevada madurez tecnológica y menores costos de producción, HEFA se convirtió en la principal tecnología utilizada a nivel mundial.

Durante este período también se fortalecieron los procedimientos de certificación ASTM, permitiendo validar la seguridad, compatibilidad y desempeño operacional de los combustibles SAF.

- **Tercera etapa: Comercialización y desarrollo de combustibles de nueva generación (2021-actualidad)**

A partir de 2021, con el inicio de la fase piloto de CORSIA, el SAF comenzó su incorporación sistemática en operaciones comerciales. En esta etapa, además de ampliar la producción de tecnologías maduras como HEFA o FT, se ha impulsado el desarrollo de combustibles sintéticos avanzados.

Entre las tecnologías emergentes destaca la ruta Power to Liquid (PtL), que utiliza hidrógeno verde obtenido mediante electrolisis y dióxido de carbono capturado

directamente del aire para producir combustible con potencial de neutralidad de carbono. Asimismo, continúan desarrollándose procesos basados en microalgas, residuos sólidos y captura directa de carbono (Bofan Wang, 2024).

### **2.1.5.3 Perspectiva tecnológica actual**

Actualmente, la tecnología de SAF está en un período de transición hacia la madurez y ampliación comercial. Rutas como HEFA han alcanzado niveles tecnológicos cercanos a la plena comercialización, mientras que otras, como AtJ, continúan en etapas de desarrollo o demostración debido a sus mayores costos y complejidades.

El enfoque tecnológico se orienta hacia la optimización de procesos, incremento de la eficiencia energética y diversificación de materias primas, especialmente mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos sólidos, promoviendo una economía circular y reducción de impactos ambientales.

Las políticas públicas y regulaciones internacionales fomentan el establecimiento de metas claras de mezcla y uso obligatorio, con incentivos que impulsen la inversión en infraestructura y desarrollo tecnológico. Además, se reconoce la necesidad de armonizar estándares internacionales y facilitar la adopción global para evitar disparidades regionales.

La aplicación de SAF también contribuye a mejorar la calidad del aire reduciendo emisiones particuladas. En conjunto, la perspectiva es que, mediante la cooperación técnica, regulatoria y económica, los SAF jugarán un papel en la transición energética de la aviación, apoyando metas globales de descarbonización. (Bofan Wang, 2024)

### **2.1.5.4 Situación en Latinoamérica**

La región latinoamericana está en una fase inicial, pero con un crecimiento constante en el desarrollo de combustible de aviación sostenible.

Posee ventajas clave, como abundancia de biomasa, experiencia en biocombustibles y condiciones climáticas favorables para la producción. Sin embargo, la transición hacia una industria de SAF plenamente consolidada enfrenta desafíos técnicos, regulatorios y de inversión, así como la necesidad de fortalecer marcos normativos e incentivos económicos.

De acuerdo con un estudio realizado por la comunidad Montgomery Group países como Brasil, Colombia, Chile y México lideran avances desarrollando proyectos y políticas que buscan posicionar a la región como un actor estratégico en el mercado global de SAF (Group M. , 2024).

A continuación, se presenta el estado actual, avances y retos en los principales países de Latinoamérica.

- **Brasil: Liderazgo emergente**

Brasil es el país más avanzado de Latinoamérica en materia de biocombustibles, lo que le otorga una sólida base industrial para avanzar en la producción y escalamiento de combustible de aviación sostenible.

Su extensa y desarrollada industria azucarera, junto con la producción consolidada de etanol, establece una relación natural con las rutas tecnológicas de SAF basadas en biocombustibles, como el Alcohol-to-Jet (AtJ) y Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (HEFA).

En 2024, Brasil dio un paso decisivo introduciendo el primer mandato regional para el uso obligatorio de SAF, con un inicio formal previsto para el año 2027.

Este mandato forma parte del Programa Nacional de Combustibles Sostenibles de Aviación (ProBioQAV), cuyo objetivo es incentivar la investigación, producción y uso masivo de SAF en el país. El programa establece una reducción gradual anual de emisiones de gases de efecto invernadero, comenzando con el 1% en 2027 y alcanzando un 10% para 2037 en vuelos nacionales. Además, la regulación está alineada con las directrices internacionales de la OACI, asegurando la trazabilidad y certificación de las rutas de producción sostenibles.

A pesar de la fortaleza agrícola y las oportunidades para producir SAF a bajo costo a partir de materias primas como soja, etanol de caña y residuos, Brasil aún enfrenta retos asociados a la volatilidad del mercado, la inversión en infraestructura y la consolidación de políticas públicas que apoyen esta transición energética. Sin embargo, el marco regulatorio y la articulación multisectorial entre gobierno, industria y academia generan optimismo sobre el potencial de Brasil para liderar la producción y consumo regional de SAF.

Además, se estima que Brasil requerirá inversiones de alrededor de 84 mil millones de dólares hasta 2050 para desarrollar la industria del SAF (Paltsev, 2024), por lo que el país apunta a aprovechar su infraestructura de refinerías existentes para adaptarlas o coprocesarlas para producción de SAF, reduciendo los costos de capital inicial. (Group M., 2024)

- **Colombia: Hoja de ruta y proyectos piloto**

Colombia ha adoptado una estrategia cautelosa pero sólida para impulsar el desarrollo de los SAF, reconociendo su importancia como herramienta clave para la descarbonización.

En 2022, el Ministerio de Minas y Energía lanzó una Hoja de Ruta SAF con horizonte hasta 2030, elaborada con el apoyo de organismos internacionales como la OACI y entidades de financiamiento para el desarrollo.

Esta iniciativa busca las bases técnicas, regulatorias y económicas necesarias para fomentar una industria nacional de SAF.

La hoja forma parte del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y contempla metas progresivas para incrementar la producción de SAF en el país.

Entre sus objetivos de largo plazo se encuentra alcanzar una producción aproximada de 100 millones de galones anuales para 2035 y cerca de 450 millones de galones para 2050. Estas metas buscan reducir la dependencia de combustible fósiles en la aviación, fortalecer la seguridad energética y posicionar a Colombia como un actor relevante en el mercado regional de combustible sostenible.

Asimismo, el documento *“Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America”* identifica diversas materias primas con potencial para la producción de SAF, desatacando los residuos sólidos agrícolas, palma de aceite y los aceites de cocina usados. (Paltsev, 2024)

La selección de estas materias primas responde a la disponibilidad de recursos en el país a la posibilidad de aprovechar residuos que actualmente poseen un bajo valor económico, promoviendo así principios de economía circular y sostenibilidad.

La estrategia colombiana también contempla el desarrollo de proyectos piloto entre los años 2026 y 2028, orientados a validar tecnologías de producción, evaluar la viabilidad económica de los procesos y generar experiencia operativa a nivel local.

Se espera que los resultados de estas iniciativas permitan avanzar hacia una etapa de producción comercial durante la próxima década, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes del transporte aéreo y al desarrollo de nuevas oportunidades de inversión.

Colombia ha adoptado una estrategia cautelosa pero sólida para el desarrollo de SAF. En 2022, el Ministerio de Minas y Energía lanzó una Hoja de Ruta SAF con horizonte hasta 2030, diseñada con el apoyo de organizaciones internacionales como la OACI y el Banco de Desarrollo.

Esta hoja de ruta forma parte del plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y establece metas escalonadas para la producción progresiva de SAF, apuntando a alcanzar 100

millones de galones en 2035 y 450 millones para 2050. Además, identifica como materias primas viables los residuos agrícolas, palma de aceite y aceites usados.

La estrategia colombiana incluye la implementación de proyectos piloto entre los años 2026 y 2028, con el objetivo de alcanzar producción comercial en la próxima década. (Paltsev, 2024)

- **Argentina: enfoque agroindustrial y desarrollos iniciales**

Argentina posee un potencial biológico para la producción de combustibles de aviación sostenibles, debido a la amplia disponibilidad de recursos biológicos provenientes de su sector agropecuario.

La producción de oleaginosas, especialmente soja y girasol, junto con la biomasa residual, constituye una base sólida para el suministro de materias primas destinadas a la fabricación de biocombustibles.

Esta disponibilidad de recursos posiciona al país como uno de los principales candidatos de América Latina para desarrollar una industria nacional de SAF en el largo plazo.

Durante los últimos años, el interés institucional por los combustibles sostenibles ha aumentado, impulsado tanto por los compromisos internacionales como por la necesidad de diversificar la matriz energética nacional.

En este contexto, distintos organismos públicos y privados han promovido iniciativas de investigación y desarrollo orientadas a evaluar viabilidad técnica y económica de la producción de SAF.

Los planes estratégicos nacionales han comenzado a considerar la incorporación progresiva de estos combustibles en el sector aeronáutico, reconociendo su potencial para contribuir a la descarbonización.

Entre las instituciones relevantes en esta materia destaca YPF Tecnología (Y-TEC) y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), las cuales han desarrollado estudios enfocados en diversas rutas aprobadas para producción de SAF. Entre ellas HEFA y AtJ.

Sin embargo, a pesar de los avances en investigación y planificación, actualmente aun no cuentan con instalaciones comerciales dedicadas a la producción de SAF. Esta situación explica diversos factores, entre los que destacan la ausencia de un marco regulatorio, dificultades para acceder a financiamiento de gran escala y la necesidad de fortalecer la coordinación entre sector público, industria energética, empresas aéreas y productores agrícolas.

Asimismo, la incertidumbre económica y los altos costos asociados a las tecnologías de producción han limitado la concreción de proyectos industriales de mayor envergadura.

A nivel internacional, Argentina mantiene una participación en iniciativas regionales destinadas a promover el desarrollo de biocombustibles y la transición energética. El país forma parte de foros y acuerdos de cooperación enfocados en la definición de estrategias conjuntas para la producción y utilización de SAF, incluyendo encuentros como la Cumbre Panamericana de Biocombustibles y otras instancias de colaboración técnica regional.

Estos aspectos facilitan el intercambio de conocimiento, la armonización de marcos regulatorios y la identificación de oportunidades de inversión, contribuyendo a la construcción de un mercado latinoamericano más integrado para los SAF. (IICA, s.f.)

- **México y otros países emergentes**

México ha avanzado de manera gradual en el desarrollo de los Combustibles de Aviación Sostenible, consolidándose como uno de los países latinoamericanos con mayor interés en explorar alternativas para la descarbonización del transporte aéreo.

Aunque sus iniciativas aun no alcanzan el grado de madurez y escala observado en países como Brasil, el país ha desarrollado experiencias relevantes que han permitido generar conocimiento técnico y fortalecer las capacidades institucionales necesarias para impulsar esta industria emergente.

Entre los hitos más destacados se encuentran los vuelos de demostración realizados por Aeroméxico en colaboración con Boeing y otros actores de la industria aeronáutica. Estas pruebas emplearon mezclas de combustibles sostenible producidas mediante la ruta HEFA.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar la compatibilidad de estos combustibles con las aeronaves comerciales existentes y evidenciaron su potencial para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sin modificaciones en la infraestructura aeroportuaria o en los motores de las aeronaves.

Diversas instituciones académicas y centros de investigación mexicanos han impulsado estudios orientados a identificar materias primas locales aptas para producción de SAF. Destacan en este ámbito la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), entidades que desarrollan investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de residuos agrícolas, biomasa lignocelulósica, aceites vegetales y residuos sólidos municipales.

Estas investigaciones buscan evaluar la viabilidad técnica de los procesos de conversión y el potencial económico de una futura industria nacional de combustible SAF.

A pesar de estos avances México aún enfrenta desafíos asociados a la creación de marcos regulatorios específicos, la atracción de inversiones y el desarrollo de cadenas de suministro capaces de garantizar una producción sostenible y competitiva a gran escala. No obstante, el creciente interés de las aerolíneas, la industria energética y las instituciones gubernamentales ha permitido sentar las bases para futuros proyectos comerciales que podrían acelerar la adopción de SAF durante las próximas décadas.

En la región del Caribe y Centroamérica también se observan iniciativas orientadas al desarrollo de SAF. Países como Costa Rica han impulsado proyectos piloto con el apoyo de organismos internacionales, entre ellos la OACI y Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Estas iniciativas buscan evaluar la factibilidad técnica económica y ambiental de distintas rutas de SAF, utilizando principalmente residuos agrícolas, biomasa residual y aceites de cocina usados como materias primas. Asimismo, estos proyectos contribuyen al fortalecimiento de capacidades locales y a la generación de información estratégica para el diseño de futuras políticas relacionadas con la transición energética.

Por otra parte, Panamá ha sido identificado como un actor clave dentro de la futura cadena de suministro regional de SAF. Gracias a su ubicación geográfica estratégica, que conecta América del Norte, América del Sur y el Caribe, junto con la presencia de una infraestructura aeroportuaria de alto tráfico internacional, el país posee condiciones favorables para convertirse en un centro logístico de referencia para la mezcla, almacenamiento y distribución de SAF.

Esta posición podría permitirle desempeñar un papel relevante en la articulación de mercados regionales y en el abastecimiento de SAF para aerolíneas que operan en distintos puntos de Latinoamérica. (Paltsev, 2024)

- **Chile: Oportunidad estratégica, inicios y desafíos**

Chile aun no cuenta con producción comercial de combustibles de aviación sostenibles, sin embargo, durante los últimos años se han registrado avances institucionales, regulatorios y técnicos que podrían facilitar el desarrollo de esta industria en el mediano y largo plazo.

El creciente interés por la descarbonización del transporte aéreo, sumado a las ventajas comparativas que posee el país en materia de recursos energéticos renovables, ha

impulsado diversas iniciativas orientadas a evaluar la factibilidad de producir SAF a nivel nacional.

Un hito relevante en este proceso fue la creación de la Mesa SAF Chile, instancia de coordinación interinstitucional que reúne a representantes del Ministerio de Energía, Junta Aeronáutica Civil, Empresas del sector aeronáutico y organismos internacionales.

El principal objetivo de esta iniciativa es de elaborar una hoja de ruta nacional que permita establecer lineamientos estratégicos para la producción, distribución y utilización de SAF en el país, promoviendo además la colaboración entre actores públicos y privados para acelerar el desarrollo del sector.

Por otro lado, se han llevado a cabo diversos estudios destinados a identificar y cuantificar las materias primas disponibles para la producción de SAF. Entre los recursos con mayor potencial destacan los residuos forestales, los aceites de cocina usado y residuos sólidos municipales (Lecocq, 2025).

Asimismo, Chile presenta una oportunidad en el desarrollo de rutas sintéticas de producción de SAF basadas en hidrógeno verde, debido a sus excepcionales condiciones para la generación de energía renovable a partir de fuentes solares y eólicas. Esta ventaja podría permitir la producción de e-fuels o electrocombustibles destinados al sector aeronáutico, posicionando al país como un potencial proveedor de combustibles sostenibles.

El compromiso del sector aeronáutico también ha contribuido a impulsar el interés por esta tecnología. En 2023, LATAM Airlines realizó su primer vuelo utilizando SAF importado, convirtiéndose en una de las primeras aerolíneas de la región en incorporar este tipo de combustible en sus operaciones. Además, la compañía ha establecido metas de sostenibilidad que contemplan la incorporación progresiva del SAF, con el objetivo de alcanzar una participación cercana al 5% de este combustible en sus operaciones para el año 2030.

Estas iniciativas reflejan el creciente compromiso de la industria aérea con la reducción de emisiones y la transición hacia alternativas más sostenibles.

No obstante, uno de los principales desafíos para la implementación de SAF en Chile continúa siendo su costo de producción. Diversos estudios estiman que los costos asociados a rutas como HEFA y Fisher-Tropsch podrían situarse entre USD 1,68 y 2,53 por litro, dependiendo de la disponibilidad de materias primas, la escala de producción y el nivel de madurez de la tecnología.

Estas cifras son superiores al precio promedio del combustible de aviación convencional Jet-A-1, que en la región suele situarse en torno a USD 0,70 por litro. Esta diferencia representa una barrera para la competitividad económica del SAF y evidencia la necesidad de implementar mecanismos de apoyo, incentivos regulatorios y economías de escala que permitan reducir los costos de producción. (Paltsev, 2024)

#### **2.1.5.5 Desafíos globales y regionales del SAF**

A pesar del creciente interés por los Combustibles de Aviación Sostenibles su adopción y escalamiento a nivel comercial enfrenta múltiples desafíos. Estas barreras abarcan aspectos técnicos, económicos, regulatorios, institucionales y de mercado.

Si bien muchos de estos desafíos son comunes a nivel mundial, su impacto en regiones en desarrollo como América Latina, donde existe limitaciones adicionales relacionadas con el acceso a financiamiento, la disponibilidad de infraestructura especializada, la ausencia de marcos regulatorios consolidados y la necesidad de fortalecer las capacidades tecnológicas locales.

En este contexto, resulta fundamental analizar los factores que actualmente limitan la expansión de la industria del SAF y que deberán ser abordados para alcanzar una producción sostenible y económicamente competitiva.

En esta sección se examina los principales desafíos asociados al desarrollo e implementación de estos combustibles, organizándolos en dimensiones clave que permitan comprender su alcance e impacto.

- **Costos de producción y prima verde**

Uno de los desafíos para la masificación de los combustibles de aviación sostenible es su elevado costo de producción en comparación con el combustible convencional. A pesar de los avances tecnológicos y del creciente interés por reducir las emisiones del transporte aéreo, la diferencia de costos entre ambas alternativas continúa siendo una de las principales barreras para su adopción a gran escala.

En la mayoría de las rutas tecnológicas actualmente aprobadas, el costo por litro de SAF puede duplicar o incluso triplicar el precio del combustible fósil, generando lo que se conoce como una “prima verde”, es decir, el sobre costo asociado a la utilización de una alternativa más sostenible desde el punto de vista ambiental.

Esta situación representa un desafío particularmente relevante para las aerolíneas, ya que el combustible constituye un componente de sus costos operacionales más importantes. En consecuencia, la incorporación de SAF sin mecanismos de apoyo

adecuados puede afectar la competitividad de las compañías aéreas, especialmente en mercados altamente sensibles a las variaciones de precio.

Como resultado, muchas aerolíneas enfrentan dificultades para aumentar el porcentaje de SAF utilizado en sus operaciones, aun cuando exista un compromiso corporativo con la sostenibilidad y la reducción de emisiones (Carlyle, 2024).

En América Latina, los costos de producción estimados reflejan una realidad similar a la observada a nivel global. De acuerdo con el informe desarrollado por el Consortium for Clean Skies (CS3) del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), los costos de producción de SAF varían según la tecnología empleada, la disponibilidad de materias primas y condiciones locales de cada país.

En el caso de Brasil, se estima que los costos pueden fluctuar entre USD 1,11 y USD 1,77 por litro, mientras que en Chile los valores proyectados se sitúan entre USD 1,68 y USD 2,53 por litro. Estas cifras superan el precio promedio del combustible Jet A-1, evidenciando la brecha económica que aún debe ser superada para alcanzar una adopción masiva de estos combustibles de aviación sostenibles (Paltsev, 2024).

La magnitud de esta diferencia de costos se explica por diversos factores, entre ellos la limitada escala de producción actual, los elevados costos de inversión asociados a las plantas de procesamiento, la complejidad tecnológica de algunas rutas de conversión y la disponibilidad restringida de ciertas materias primas.

Además, al tratarse de una industria aun en proceso de consolidación, los productores de SAF no han alcanzado las economías de escala necesarias para reducir los costos de producción.

En este contexto, diversos organismos internacionales y especialistas coinciden en que la competitividad económica del SAF dependerá, en gran medida, de la implementación de políticas públicas que permitan reducir la denominada prima verde.

Para ello, se requiere una intervención estatal activa mediante instrumentos de apoyo económico y regulatorio, tales como subsidios directos a la producción, incentivos tributarios, mecanismos de fijación o valorización del carbono, cuotas obligatorias de mezcla y acuerdos de compra a largo plazo que otorguen certidumbre a los inversionistas.

Estas herramientas contribuyen a disminuir el riesgo financiero asociado a los proyectos, facilitar el acceso al financiamiento y estimular el desarrollo de nuevas capacidades productivas (Ambrosio, 2025).

A largo plazo, se espera que la expansión de la industria, el perfeccionamiento de las tecnologías de conversión y el aumento de la demanda global permitan reducir progresivamente los costos de producción del SAF. Sin embargo, mientras esta convergencia de precios no se materialice, la prima verde continuará siendo uno de los obstáculos más importantes para la transición hacia una aviación sostenible, especialmente en países en desarrollo donde las restricciones financieras y regulatorias suelen ser más pronunciadas (Ambrosio, 2025).

- **Disponibilidad y competencia por materias primas**

La disponibilidad de materias primas sostenibles constituye uno de los factores más importantes para el desarrollo y expansión de la industria de los combustibles de aviación sostenibles.

Actualmente, diversas rutas tecnológicas utilizan recursos como aceites de cocina usados, grasas residuales, residuos agrícolas, biomasa lignocelulósica, residuos forestales y desechos sólidos municipales como insumo para la producción de SAF.

La disponibilidad de estos recursos condiciona directamente la capacidad de producción, los costos asociados y la sostenibilidad ambiental del combustible obtenido (Net Zero Insights, 2025).

Si embargo, la creciente demanda de estas materias primas ha generado una competencia entre distintos sectores económicos.

Recursos como los aceites de cocina usados, la biomasa agrícola y los residuos orgánicos son utilizados también en la producción de biodiesel, generando energía eléctrica, calefacción industrial y fabricación de productos químicos, entre otros usos.

Esta competencia puede provocar escasez relativa de las materias primas, incrementos en los costos de abastecimiento y una mayor volatilidad en los precios, afectando la volatilidad económica de los proyectos de producción de SAF.

Asimismo, una demanda creciente por biomasa puede generar presión sobre el uso y la gestión sostenible del suelo, especialmente cuando existe riesgo de competencia con la producción de alimentos o con otros usos productivos del territorio (Net Zero Insights, 2025).

En América Latina, la situación presenta características particulares debido a la abundancia de recursos agrícolas, forestales y agroindustriales disponibles.

La región cuenta con un potencial para el aprovechamiento de residuos provenientes de cultivos como caña de azúcar, maíz, soja, palma aceitera y diversas actividades forestales, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de una industria regional del SAF (Sustainable Aviation Futures, 2024).

No obstante, la existencia de una elevada disponibilidad teórica de biomasa no garantiza necesariamente su aprovechamiento efectivo. La recolección, almacenamiento, transporte y procesamiento de los residuos continúan representando desafíos importantes para numerosos países latinoamericanos.

En muchos casos, las fuentes de biomasa se encuentran dispersas geográficamente, lo que incrementa los costos logísticos y dificulta el establecimiento de cadenas de suministro eficientes y confiables (Group M. , 2024).

Adicionalmente, aspectos relacionados con el control de calidad, la trazabilidad de las materias primas y la falta de infraestructura especializada pueden limitar la capacidad de abastecimiento de proyectos de producción de SAF a escala.

A esto se suman desafíos institucionales vinculados a la coordinación entre productores agrícolas, empresas energéticas, gestores de residuos y organismos gubernamentales responsables de la regulación y certificación de sostenibilidad (Paltsev, 2024).

Por lo tanto, garantizar el suministro estable, sostenible y económicamente competitivo de materias primas constituye uno de los principales desafíos para la expansión del SAF tanto a nivel mundial como en América Latina.

La superación de estas barreras requerirá fortalecer las cadenas logísticas, mejorar los sistemas de gestión de residuos e implementar políticas públicas que promuevan el aprovechamiento eficiente y sostenible de los recursos disponibles (Sustainable Aviation Futures, 2024).

- **Escalabilidad tecnológica e incertidumbre en el despliegue**

El desarrollo de los SAF ha experimentado avances durante la última década, impulsados por la necesidad de reducir las emisiones contaminantes del sector aeronáutico.

Actualmente existen diversas rutas tecnológicas aprobadas para la producción de SAF, entre ellas destacan HEFA, Fischer-Tropsch y alcohol to jet. Estas tecnologías permiten transformar distintos tipos de materias primas en combustible compatible con la infraestructura aeronáutica.

Sin embargo, a pesar de los avances alcanzados, gran parte de estas tecnologías aun se encuentra en fase piloto, de demostración o de escalamiento inicial, existiendo un umero limitado de instalaciones comerciales operativas a nivel mundial.

Esta situación genera incertidumbre respecto a su desempeño técnico, costos de operación, eficiencia productiva y viabilidad económica cuando son implementadas a gran escala (Hundt, 2025).

Por otra parte, la transición hacia rutas tecnológicas de nueva generación también presenta incertidumbres.

Tecnologías emergentes como Power to Liquid, basadas en la utilización de hidrogeno verde y dióxido de carbono para producir combustible sintético, son consideradas alternativas con un elevado potencial de reducción de emisiones a largo plazo.

Asimismo, existen investigaciones avanzadas relacionadas con biología sintética, conversión termoquímica avanzada y procesos de gasificación de biomasa de alta eficiencia.

No obstante, estas tecnologías aun requieren importantes esfuerzos de investigación, desarrollo y validación antes de alcanzar una adopción comercial masiva.

La dependencia futura de un número reducido de tecnologías emergentes puede limitar la resiliencia del mercado, aumentar la exposición a riesgos tecnológicos y retrasar la expansión hacia soluciones más sostenibles y escalables (IATA, 2025).

La incertidumbre tecnología también influye en las decisiones de inversión. Los proyectos de producción del SAF requieren instalaciones industriales complejas, equipamiento especializado y procesos de conversión altamente sofisticados, lo que implica elevados costos de capital desde las etapas iniciales de desarrollo.

Dependiendo de la tecnología utilizada y de la capacidad de producción proyectada, las inversiones necesarias pueden alcanzar cientos de millones de dólares, constituyendo una barrera para nuevos actores del mercado (Carlyle, 2024).

Además, muchos proyectos deben superar las denominadas “zonas de riesgo”, etapas críticas del proceso de innovación en las que los costos de desarrollo, construcción y validación tecnológica son elevados, mientras los retornos económicos permanecen inciertos.

Durante estas fases, los proyectos suelen enfrentar dificultades para acceder a financiamiento privado debido a la falta de antecedentes operaciones, la incertidumbre

sobre la rentabilidad futura y los riesgos asociados a tecnologías aun no completamente consolidadas. Como resultado, numerosos proyectos experimentan retrasos o incluso son cancelados antes de alcanzar la etapa comercial.

En este contexto, diversos organismos internacionales destacan la necesidad de implementar mecanismos de apoyo que permitan reducir el riesgo financieros asociado al desarrollo de nuevas tecnologías de SAF. (Carlyle, 2024)

#### **2.1.5.5.1 Infraestructura, almacenamiento y logística**

La infraestructura necesaria para la producción, distribución y utilización de SAF constituye uno de los principales desafíos para su adopción a gran escala.

Aunque el SAF ha sido diseñado para ser compatible con las aeronaves e infraestructura de abastecimiento existentes mediante el concepto de drop-in fuels, su incorporación masiva requiere adaptaciones en distintos eslabones de la cadena de suministro.

Actualmente, gran parte de los aeropuertos, terminales de combustible, centros de almacenamiento y sistemas de distribución fueron desarrollados para operar exclusivamente con combustible convencional, por lo que no siempre cuentan con la infraestructura necesaria para gestionar de manera eficiente mezclas que incorporan SAF.

La disponibilidad limitada de instalaciones especializadas para la recepción, almacenamiento, mezcla y distribución del SAF pueden generar restricciones operacionales que afecten la continuidad del suministro.

En muchos casos, los combustibles sostenibles deben ser transportados desde plantas de producción ubicadas a grandes distancias de los centros de consumo, lo que incrementa los costos logísticos y reduce la competitividad económica frente al combustible convencional.

Asimismo, la ausencia de redes de distribución adecuadamente desarrolladas dificulta la expansión del mercado y limita la disponibilidad del SAF en numerosos aeropuertos alrededor del mundo.

Otro aspecto relevante corresponde a las inversiones necesarias para adaptar la infraestructura existente.

La incorporación de SAF puede requerir la construcción de nuevas instalaciones de almacenamiento, sistemas de mezcla, equipos de monitoreo de calidad y modificaciones en terminales de abastecimiento. Además, es necesario desarrollar procedimientos operativos específicos y capacitar al personal encargado de la manipulación y distribución del combustible para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y calidad exigidos por la industria aeronáutica.

Estas inversiones representan costos adicionales que, en muchos casos, no se encuentran contemplados dentro de los planes de desarrollo de la infraestructura aeroportuaria o energética.

Como consecuencia, la falta de infraestructura adecuada aumenta el riesgo financiero para los distintos actores involucrados en la cadena de valor del SAF, incluyendo productores, refinadores, operadores logísticos, distribuidores y aerolíneas.

La incertidumbre respecto al crecimiento futuro de la demanda puede desincentivar la realización de inversión de gran escala, generando un círculo de retroalimentación donde la limitada infraestructura restringe el consumo de SAF y al mismo tiempo, la baja demanda dificulta justificar nuevas inversiones.

En América Latina, estos desafíos adquieren una relevancia aun mayor debido a factores estructurales propios de la región. La limitada disponibilidad de capital para proyectos de infraestructura, las brechas existentes en las redes de transporte terrestre y ferroviario, y la dispersión geográfica de las fuentes potenciales de materias primas, dificultan el desarrollo de cadenas logísticas eficientes.

Adicionalmente, muchos mercados aeronáuticos de la región presentan una menor densidad de tráfico en comparación con Europa o Norteamérica, lo que reduce las economías de escala y eleva los costos unitarios asociados al almacenamiento y distribución del combustible.

A pesar de estas limitaciones, diversos estudios destacan que la expansión de la infraestructura para SAF constituye un elemento para acelerar la transición hacia una aviación más sostenible.

La planificación coordinada entre gobiernos, aeropuertos, productores de combustibles, aerolíneas e inversionistas será esencial para desarrollar redes de abastecimiento eficientes y seguras.

En este sentido, la implementación de estrategias de largo plazo orientadas a modernizar la infraestructura energética y aeroportuaria permitirá reducir costos logísticos, mejorar la disponibilidad del combustible y facilitar la adopción progresiva del SAF en los mercados latinoamericanos e internacionales. (Surgenor, 2025)

## 2.2 Marco teórico

En este capítulo se expone los principales antecedentes teóricos y conceptuales que sustentan el desarrollo de esta investigación.

### 2.2.1 Combustible de aviación sostenible (SAF)

El combustible de aviación sostenible es una categoría de combustible diseñado específicamente para su uso en aeronaves, cuyo principal beneficio es su capacidad para reducir el impacto ambiental de la aviación. A diferencia de los combustibles tradicionales, que se obtienen de fuentes fósiles no renovables como el petróleo, los SAF son producidos utilizando fuentes renovables y sostenibles, lo que los convierte en una alternativa más ecológica y menos perjudicial para el medio ambiente.

El proceso de producción del SAF implica el uso de materias primas biológicas, como aceites vegetales, residuos orgánicos, biomasa, e incluso desechos de grasas animales o residuos agrícolas, que son convertidos mediante procesos avanzados de conversión. Estos métodos incluyen la gasificación, la hidrogenación o la fermentación, entre otros. Estos procesos avanzados permiten que los materiales orgánicos sean transformados en un combustible líquido que tiene propiedades similares al queroseno convencional, lo que lo hace apto para su uso en aviones sin necesidad de realizar modificaciones en los motores o la infraestructura existente de las aeronaves.

Una de las principales ventajas de los SAF radica en su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan durante la combustión en los motores de las aeronaves. Los SAF, al ser producidos a partir de materias primas renovables, tienen un ciclo de carbono mucho más bajo en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Esto se debe a que, durante el proceso de crecimiento de las plantas utilizadas para producir estos combustibles, se captura el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y este CO<sub>2</sub> es liberado nuevamente durante la combustión del SAF, lo que crea un ciclo cerrado que no aumenta la concentración neta de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Además, el SAF ofrece una sustitución gradual de los combustibles convencionales, lo que permite que las aerolíneas y otros actores de la industria aeronáutica transiten hacia una operación más sostenible sin la necesidad de realizar grandes inversiones en infraestructura o modificar los motores de las aeronaves. Esto es particularmente importante porque la aviación es un sector en el que la sostenibilidad y la reducción de emisiones han sido históricamente desafiantes, debido a la alta dependencia de los combustibles fósiles y las limitadas alternativas tecnológicas que se puedan integrar sin afectar el rendimiento o la seguridad de los vuelos.

## 2.2.2 Criterios de sostenibilidad del SAF

Los criterios de sostenibilidad son principios fundamentales que deben cumplirse para que un combustible de aviación sostenible se considere ambiental y socialmente responsable. Estos criterios se diseñan para garantizar que el SAF no solo reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, sino que también minimice los impactos negativos en el medio ambiente, los ecosistemas y las comunidades locales. Establecidos por organizaciones como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), estos criterios permiten asegurar que la producción y el uso de SAF no solo sean tecnológicamente viables, sino también social y ambientalmente sostenibles.

- **Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>**

Uno de los criterios más importantes para que un combustible sea clasificado como SAF es su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida completo, en comparación con los combustibles tradicionales. La OACI establece que el SAF debe generar al menos un 10% menos de emisiones de CO<sub>2</sub> durante su ciclo de vida completo, desde la producción de la biomasa hasta la combustión del combustible en los motores de las aeronaves.

- **Origen de la biomasa**

El origen de la biomasa utilizada para producir SAF es otro criterio esencial para garantizar la sostenibilidad del combustible. La biomasa no debe proceder de tierras que alberguen altas reservas de carbono, como bosques tropicales o tierras de alto valor ambiental. La razón de este principio es que, el proceso de deforestación o el cambio de uso de suelo en áreas ricas en carbono puede liberar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> almacenado, lo que anularía los beneficios climáticos de los combustibles de aviación sostenible.

- **Manejo responsable de desechos químicos**

La producción de SAF involucra una serie de procesos químicos y térmicos avanzados, como la hidrogenación, gasificación o pirolisis, que pueden generar subproductos y residuos que, si no son gestionados adecuadamente, pueden causar daños al medio ambiente. Por ello, el manejo de los desechos químicos generados durante la producción de SAF es un criterio fundamental dentro de las normativas de sostenibilidad.

El manejo adecuado de estos residuos incluye la eliminación segura de productos químicos potencialmente peligrosos, como compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, o subproductos derivados de la conversión de la biomasa en combustible. Además, la industria debe reciclar o reutilizar los residuos siempre que sea posible para reducir el impacto ambiental de la producción.

- **Calidad del aire**

Otro aspecto de la producción de SAF es su impacto sobre la calidad del aire en las regiones donde se lleva a cabo el proceso de conversión. Algunos de los procesos de producción de SAF, como la gasificación o la pirolisis, pueden generar emisiones atmosféricas locales, que, si no se controlan adecuadamente, podrían afectar la salud humana y la biodiversidad. Las emisiones de partículas finas, óxidos de nitrógeno, y compuestos orgánicos volátiles son ejemplos de contaminantes que pueden liberarse durante el proceso de conversión, y que, si no se gestionan correctamente, podrían deteriorar la calidad del aire en las áreas circundantes.

Por lo tanto, es esencial que las plantas de producción de SAF adopten tecnologías avanzadas de captura y tratamiento de emisiones, como filtros de partículas, sistemas de desulfurización o captura de compuestos orgánicos volátiles, para minimizar su liberación a la atmósfera. Esto no solo protege la salud pública, sino que también asegura que el proceso de producción de SAF sea realmente sostenible en todas sus fases, reduciendo sus efectos negativos en las comunidades cercanas a las instalaciones de producción.

- **Impacto en la biodiversidad**

La preservación de la biodiversidad es otro criterio clave para garantizar que la producción de SAF no cause daños a los ecosistemas naturales ni al equilibrio de las especies. Si bien la biomasa es una fuente renovable de materia prima para la producción de SAF, la agricultura intensiva y la plantación masiva de cultivos destinados a la producción de bioenergía pueden amenazar los ecosistemas naturales, como los bosques, humedales y pastizales, que son vitales para la biodiversidad.

La producción de SAF debe garantizar que no se desplace la vegetación nativa o se cause la pérdida de hábitat natural crítico. Las grandes plantaciones de cultivos para SAF no deben ocupar tierras que alberguen especies endémicas o en peligro de extinción. Además, las prácticas agrícolas deben ser ecológicamente responsables, favoreciendo la agricultura de conservación, evitando el uso de pesticidas y promoviendo la rotación de cultivos para mantener el equilibrio ecológico y preservar la salud del suelo.

De no cumplirse estos criterios se consideran combustibles de aviación más bajos en carbono (LCAF). (OACI, CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels, 2021)

### 2.2.3 Evaluación de proyectos generales

La evaluación de proyectos generales es una disciplina que permite analizar, desde múltiples perspectivas, la viabilidad de implementar una iniciativa. Se trata de un proceso sistemático y estructurado cuyo propósito principal es proporcionar información relevante, confiable y cuantificable para apoyar la toma de decisiones. Esta evaluación busca reducir la incertidumbre respecto a los resultados esperados y anticipar los beneficios y riesgos que podrían surgir en la ejecución del proyecto.

El proceso de evaluación se aplica tanto en proyectos productivos, tecnológicos, sociales, ambientales, como en iniciativas de innovación o implementación de nuevas infraestructuras, como es el caso de los proyectos relacionados con energías limpias y biocombustibles. A través, de esta herramienta, se busca determinar si un proyecto es conveniente, sustentable y rentable desde distintas perspectivas, incluyendo aspectos financieros, técnicos, económicos, sociales y ambientales. (Sapag)

#### 2.2.3.1 Estudio de viabilidad técnica

La viabilidad técnica corresponde al análisis de la capacidad real que posee un proyecto para ser desarrollado utilizando los recursos, tecnologías y conocimientos disponibles.

Su principal objetivo es determinar si existen condiciones necesarias para efectuar la iniciativa de manera eficiente y cumplir con los objetivos propuestos.

Los aspectos relacionados con la viabilidad técnica son (Schimunek, 2012):

- Estudio de ingeniería: Este estudio debe determinar la función de producción o procesos óptimo para la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles. Por otro lado, la tecnología es el conjunto de requerimientos y procesos que se emplean para realizar la producción de combustibles SAF.
- Estudio del tamaño: la importancia de definir el tamaño determinara la capacidad de producción que puede obtenerse, existen factores externos e internos que afectan a la capacidad de producción. Entre los primeros están las regulaciones y la relación con los proveedores de insumos y servicios. Mientras que los factores internos son el proceso productivo, las capacidades y el mantenimiento de equipos y sistemas.
- Estudio de localización: su objetivo es seleccionar la ubicación más conveniente; es decir, alternativas posibles con mayor nivel de beneficio. Existen etapas de localización, las cuales son:
  - Macro localización que es la selección de zonas amplias.
  - Micro localización que es la delimitación precisa del área.

### **2.2.3.2 Viabilidad financiera**

La viabilidad financiera tiene como propósito determinar si un proyecto genera beneficios económicos suficientes para compensar la inversión realizada y los costos asociados a su operación.

Desde esta perspectiva, el análisis se enfoca en la rentabilidad esperada para los inversionistas, evaluando la capacidad del proyecto para generar flujos de caja positivos durante su vida útil.

Por lo que busca medir la rentabilidad que obtiene quien asigna recursos a una determinada alternativa de inversión. Para ellos, se proyectan los ingresos y egresos futuros del proyecto, considerando variables como la inversión inicial, costos de operación, gastos de mantenimiento, impuestos, depreciación y valor residual.

La principal herramienta utilizada en este análisis es la construcción de flujos de caja proyectados, los cuales permiten estimar el comportamiento financiero esperado del proyecto a lo largo del tiempo.

Sobre la base de estos flujos es posible calcular indicadores ampliamente utilizados en la evaluación de inversiones, tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (Payback).

El Valor Actual Neto permite determinar la riqueza adicional que genera una inversión al descontar los flujos futuros a una tasa determinada. Por su parte, la Tasa Interna de Retorno representa la rentabilidad porcentual del proyecto y facilita la comparación entre distintas alternativas de inversión.

Finalmente, el periodo de recuperación indica el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial mediante los beneficios generados por el proyecto.

La evaluación financiera también considera análisis de sensibilidad y escenarios, herramientas que permiten estudiar el comportamiento del proyecto frente a variaciones en variables críticas como precios, costos, demanda o tasas de descuento.

Estos análisis contribuyen a identificar riesgos financieros y a mejorar la calidad de las decisiones de inversión. (Sapag)

### **2.2.3.3 Viabilidad económica**

La viabilidad económica busca determinar si un proyecto genera beneficios netos para la sociedad en su conjunto.

A diferencia de la viabilidad financiera, que se centra en los intereses del inversionista, la viabilidad económica considera el impacto global que la iniciativa produce sobre la economía y el bienestar social.

Este enfoque incorpora beneficios y costos que no necesariamente se reflejan en los flujos financieros del proyecto, tales como la generación de empleo, el desarrollo regional, la reducción de emisiones contaminantes, el fortalecimiento de cadenas productivas o el aumento de la seguridad energética.

Asimismo, considera las externalidades positivas y negativas derivadas de la ejecución del proyecto.

La viabilidad económica resulta relevante en proyectos de infraestructura, energía, transporte y desarrollo sostenible, donde los beneficios sociales pueden ser mayores que los beneficios privados percibidos por los inversionistas.

En consecuencia, esta perspectiva permite determinar si la utilización de recursos genera un aporte efectivo al desarrollo económico y social de una región o país.

#### **2.2.3.4 Viabilidad ambiental**

La viabilidad ambiental corresponde al análisis de los impactos que un proyecto puede generar sobre el medio ambiente durante las etapas de construcción, operación y cierre.

Su objetivo es asegurar que el desarrollo de una iniciativa sea compatible con la conservación de los recursos naturales y los principios de sostenibilidad.

Este análisis considera los efectos potenciales sobre componentes ambientales como la calidad del aire, el agua, el suelo, la biodiversidad y los ecosistemas presentes en el área de influencia del proyecto.

Asimismo, evalúa el consumo de recursos naturales, la generación de residuos, las emisiones atmosféricas y otros impactos que puedan afectar el entorno.

La viabilidad ambiental permite identificar medidas de mitigación, compensación o reparación destinadas a reducir los efectos negativos y maximizar los beneficios ambientales asociados al proyecto.

En el contexto actual de transición energética y lucha contra el cambio climático, esta dimensión ha adquirido una relevancia creciente debido a la necesidad de promover inversiones compatibles con los objetivos de desarrollo sostenible.

### **2.2.3.5 Viabilidad social**

La viabilidad social analiza los efectos que un proyecto genera sobre las personas, comunidades y grupos de interés involucrados directa o indirectamente en su desarrollo.

Su propósito es determinar si la iniciativa contribuye positivamente al bienestar de la población y si cuenta con un nivel adecuado de aceptación por parte de los actores sociales afectados.

Este análisis considera aspectos como la generación de empleo, el mejoramiento de la calidad de vida, el fortalecimiento de las economías locales, la participación ciudadana y la percepción social del proyecto. Asimismo, evalúa posibles conflictos o impactos negativos que puedan surgir durante su implementación.

La creciente importancia de la sostenibilidad ha impulsado la incorporación de criterios sociales dentro de la evaluación de proyectos, reconociendo que el éxito de una inversión no depende únicamente de su rentabilidad económica, sino también de su capacidad para generar valor compartido y contribuir al desarrollo de las comunidades donde se inserta.

## 2.3 Propuesta metodológica

Para evaluar la factibilidad técnica de producir combustibles de aviación sostenible en Chile se propone una propuesta metodológica basada en los principales componentes del estudio técnico de proyectos.

La propuesta metodológica contempla el desarrollo de tres etapas principales; estudio de ingeniería, estudio de localización y estudio de tamaño.

- **Estudio de ingeniería**

Esta etapa estará enfocada en la identificación y análisis de las materias primas disponibles en Chile con potencial para la producción de SAF, considerando recursos como aceites de cocina usados, residuos agrícolas, residuos forestales y otras fuentes de biomasa.

Asimismo, se realizará una revisión de las principales rutas tecnológicas actualmente aprobadas para la producción de SAF.

El objetivo será determinar que tecnologías presenta una mayor compatibilidad con las materias primas disponibles en el país y cuales ofrecen mejores perspectivas desde el punto de vista técnico.

- **Estudio de localización**

El estudio de localización tendrá como finalidad identificar las regiones del país que presentan las mejores condiciones para el abastecimiento de materias primas destinadas a la producción de SAF.

Para ello, se analizará la distribución geográfica de los recursos seleccionados, considerando variables como disponibilidad de biomasa, concentración de residuos aprovechables, infraestructura logística, conectividad vial y proximidad a centro de consumo o distribución.

Este análisis permitirá identificar zonas con ventaja comparativas para el desarrollo de futuras instalaciones productivas.

- **Estudio de tamaño**

Finalmente, se realizará un estudio de tamaño orientado a estimar la capacidad potencial de producción de SAF en función de la disponibilidad de materias primas identificadas en las etapas anteriores.

Para ellos, se cuantificarán los volúmenes de recursos disponibles y se aplicarán factores de conversión asociados a las tecnologías seleccionadas.

Este análisis permitirá estimar la producción anual potencial de SAF, evaluar el aprovechamiento de los recursos existentes y determinar la escala de producción que podría alcanzarse bajo distintos escenarios de desarrollo.

En conjunto, estas etapas proporcionaran los antecedentes necesarios para evaluar la factibilidad técnica de producir combustible de aviación sostenible en Chile, identificando oportunidades y limitaciones asociadas a la disponibilidad de recursos, tecnologías y capacidades productivas existentes en el país.

### 3 Desarrollo

#### 3.1 Investigación de materias primas en Chile

Con el objetivo de identificar las materias primas con potencial para la producción de SAF, se realizó una revisión de tres fuentes claves: Aceite de cocina usado, la biomasa forestal y los residuos sólidos municipales. Estas materias primas se consideran relevantes no solo por su disponibilidad, sino también por su capacidad de contribuir a una transición energética limpia y reducir las emisiones.

##### 3.1.1 Aceite de cocina usado

En Chile, el reciclaje de aceite de cocina usado ha cobrado un creciente protagonismo en el marco de políticas de sustentabilidad y economía circular. Una de las empresas líderes en este ámbito es Rendering, la cual ha logrado consolidarse como el principal actor nacional en la recolección y gestión de aceites usados. De acuerdo con la segunda mesa de trabajo público – privado “*Hoja de Ruta – Combustibles de aviación sostenibles*” realizada el 12 de diciembre de 2022 la empresa concentra aproximadamente el 70% del mercado.

Este liderazgo ha sido el resultado de una estrategia empresarial enfocada en la expansión territorial, el desarrollo de una logística eficiente y la generación de alianzas estratégicas con establecimientos del rubro gastronómico. Hoteles, restaurantes, casinos y otros servicios a lo largo del país han sido integrados a esta red de recolección, permitiendo alcanzar un promedio mensual de 700 toneladas de aceite reciclado.

Cabe destacar que alrededor del 95% de este volumen recolectado es destinado a la exportación, principalmente hacia el continente europeo, donde existe una demanda creciente por este tipo de insumo, especialmente para la fabricación de biocombustibles. Esta tendencia responde a las políticas ambientales que imperan en la región, las cuales promueven activamente el uso de energías renovables y la descarbonización. Por su parte, el 5% restante se utiliza en el mercado nacional, para la elaboración de lubricantes para motores y aplicaciones industriales, como, por ejemplo, lubricantes en maquinaria forestal.

En términos de evolución, Rendering ha mostrado un crecimiento sostenido del orden del 20% anual en su capacidad de recolección. Esta tendencia positiva refleja no solo una mejora en sus capacidades operativas y de cobertura, sino también una creciente conciencia ciudadana sobre la importancia del reciclaje de aceites usados y su potencial energético (Rendering, 2024).

La cadena de valor de esta materia prima contempla cinco etapas principales: generación, recolección, pretratamiento, procesamiento y usos finales. Los principales actores que

participan en cada una de estas etapas se identifican en la siguiente *figura 3-1* que muestra gráficamente la distribución de dichos actores (HINICIO, 2026).

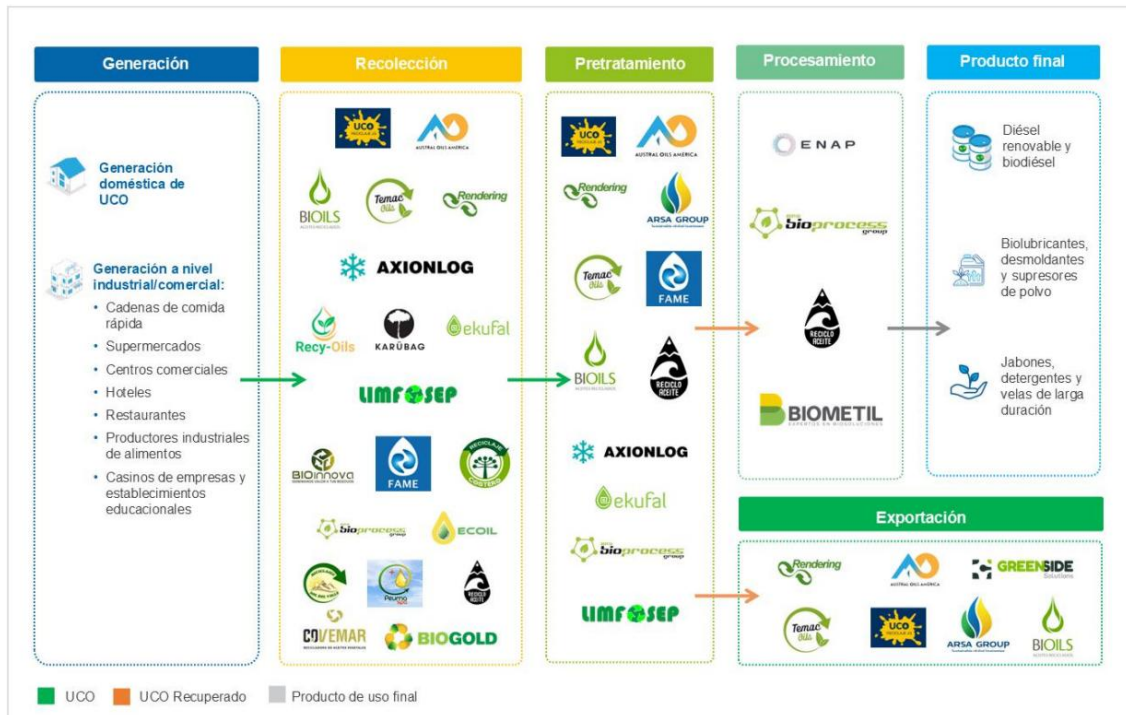


*Figura 3-1: Principales actores en la cadena de valor del aceite de cocina usado en Chile, Fuente: HINICIO*

En la etapa de generación, los actores corresponden al sector residencial distribuido a nivel nacional y por otra parte, los sectores comerciales e industriales.

La etapa de recolección está compuesta por un conjunto heterogeneo de empresas que prestan servicios a lo largo del país como se ve en la *figura 3-2*, esto se manifiesta en diferentes tamaños de empresas, su alcance geografico y capacidades operativas.



Figura 3-2: Cobertura a nivel regional de las empresas recolectoras de Aceite de Cocina Usado en Chile,  
Fuente: HINICIO

Por otro lado, la etapa de pretratamiento y procesamiento es realizada mayoritariamente por las propias empresas recolectoras, la cual comprende operaciones de filtrado, decantación y separación de fases, orientadas a reducir el contenido de agua, sólidos e impurezas. Este proceso resulta crítico para asegurar la calidad y su admisibilidad tanto para exportación como para usos energéticos.

En cuanto a los usos finales, en Chile se destina a la producción de biocombustibles, como biodiesel y diesel renovable, así como la elaboración de jabones, detergentes y otros productos industriales (HINICIO, 2026).

### 3.1.1.1 Estimación de potencial de Aceite de Cocina Usado

La estimación del potencial de generación de aceite de cocina usado se realizó a partir del consumo de aceite de la población chilena, debido a que este constituye la base para determinar el volumen de residuo que puede recuperarse y destinarse a la producción de combustible de aviación sostenible. Si bien no todo el aceite consumido se transforma en residuo recuperable, el consumo nacional permite establecer una aproximación del potencial teórico disponible.

De acuerdo con datos publicados por Index Mundi, el consumo de aceite en Chile alcanzó las 464 [kt/año] durante 2024 donde un total de 294 [kt/año] corresponden al sector industrial mientras que 170 [kt/año] corresponde al sector residencial la cual se espera que la proporción de consumo en el sector residencial e industrial se mantengan en aproximadamente 36,6% y 63,3% respectivamente (IndexMundi, 2026). Donde este valor total alcanzado durante 2024 se utilizó como año base para estimar la disponibilidad futura de la materia prima.

Para las proyecciones de 2035 y 2050, se consideró la evolución demográfica estimada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la cual proyecta una población superior a los 20,6 millones para 2035 y cercana a los 19 millones para 2050 (INE, 2026).

De acuerdo a la OCDE el consumo per cápita de aceite permanece constante durante el horizonte de análisis, con un promedio de 25,1 [kg] por habitante al año (OCDE).

Sobre la base de esta información a continuación se proyecta que para el año 2035 existirá un consumo a nivel nacional de 517 [kt/año] mientras que en 2050 será de 477 [kt/año] como se muestra en el siguiente gráfico.

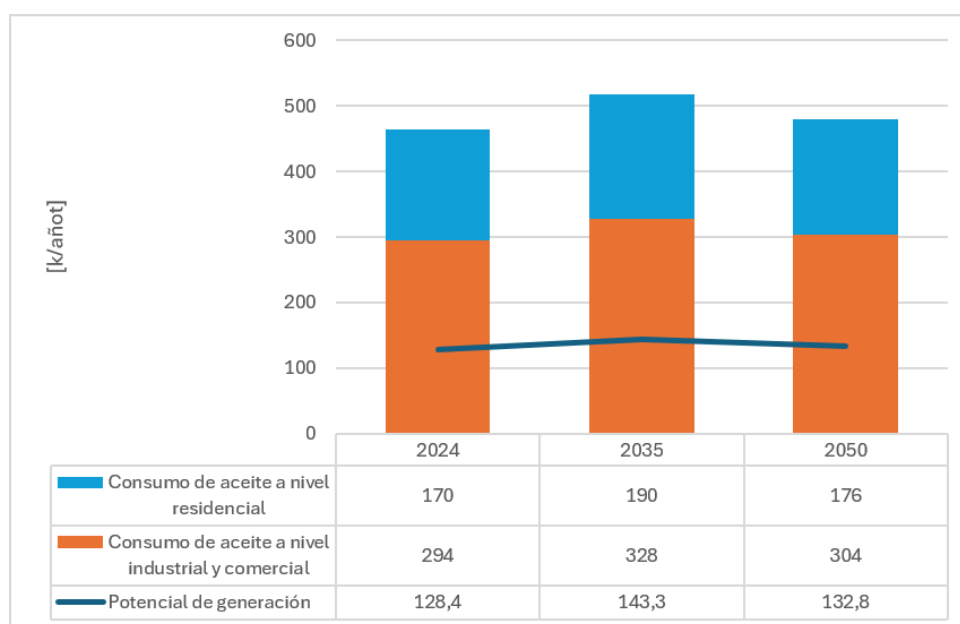


Gráfico 3-1: Estimación proyectada del consumo de aceite en Chile en 2035-2050 y potencial de generación aceite de cocina usado, Fuente: Elaboración propia en base a HINICIO.

A partir del consumo proyectado, el potencial de generación de este tipo de materia prima se calcula aplicando una tasa de un 15% sobre el consumo a nivel residencial debido a que esta fracción marginal de aceite consumido en los hogares es recolectada formalmente. Mientras que a nivel industrial se estima una tasa entre el 30% y 40% de aceite utilizado se transforma en materia prima apta para ser utilizada en combustible de aviación sostenible (HINICIO, 2026).

Para producir SAF con esta materia prima se requiere el proceso HEFA donde se hace reaccionar aceite de cocina usado o grasa animal con hidrógeno. Donde la materia prima principal de este proceso son los triglicéridos, que son los componentes básicos de las grasas y los aceites (Alan, 2025). Su principal ventaja radica en su elevado rendimiento, alcanzando aproximadamente un 83% de conversión, lo que convierte en la alternativa más eficiente desde el punto de vista productivo.

Considerando que el consumo de combustible de aviación en Chile se proyecta en torno a 2.400 millones de litros para el 2035 (Junta Aeronáutica Civil, 2020), esta producción representaría un 6,2% de la demanda que correspondería a 143,3 millones de litros, mientras que para el año 2050 se proyecta una demanda de aproximadamente 3.600 millones de litros la producción mediante aceite de cocina usado representaría un 3,8% de la demanda corresponde a 137,8 millones de litros anualmente, considerando una densidad igual al combustible convencional 0,8 [kg/L].

En síntesis, el aceite de cocina usado constituye una materia prima con un potencial relevante para la producción de combustible de aviación sostenible en Chile, sin embargo, su disponibilidad está limitada por el volumen de aceite efectivamente recuperable, especialmente en el sector residencial, y por la competencia de otros usos industriales y mercados de exportación.

Bajo los supuestos considerados, este recurso podría contribuir con aproximadamente un 6,2% de la demanda nacional proyectada para 2035 y un 3,8% para 2050, lo que evidencia que si bien representa una alternativa tecnológica madura y de alto rendimiento mediante la ruta HEFA, será necesario complementarla con otras materias primas para alcanzar el objetivo de la meta SAF.

### **3.1.2 Biomasa forestal**

La Biomasa forestal corresponde al conjunto de residuos orgánicos provenientes de las actividades de manejo, cosecha y procesamiento de los recursos forestales.

Debido a la gran superficie forestal existente en Chile y a la consolidación de esta industria a nivel nacional, la biomasa forestal se posiciona como una de las materias primas más prometedoras para la producción de combustible de aviación sostenible (SAF).

Según la información de CONAF, la superficie forestal en Chile es de 18.030.735 hectáreas (23,8% del territorio nacional), desglosado en 14.737.484 hectáreas de bosque nativo, 179.125 hectáreas de bosque nativo mixto y 3.114.125 hectáreas de plantaciones forestales (CONAF, 2022).

Según estadística de INFOR, la industria forestal en Chile esta dominada por dos principales empresas Arauco y CMPC, que controlan gran parte de la cadena de producción. Estas compañías representan más del 50% de la producción forestal y casi el 100% de la industria de celulosa y papel (INFOR, 2025).

De acuerdo con Arauco, que administra 1,2 millones de hectareas de bosques productivos y plantaciones forestales, se estima que existen entre 1,5 y 2 millones de toneladas de residuos forestales depositados en el bosque (Arauco, 2024), lo que representa una cantidad de biomasa potencial para la producción de SAF llegando a poder producir con el proceso Fisher Tropsch donde comienza con la gasificación de materiales con alto poder calorifico y ricos en carbono. Su rendimiento alcanza aproximadamente un 24,7% de conversión, lo que convierte en la alternativa más eficiente desde el punto de vista productivo. (Alan, 2025)

Considerando que el consumo de combustible de aviación en Chile se proyecta en torno a 2.400 millones de litros para el 2035 (Junta Aeronautica Civil, 2020), esta producción representaría un 25,7% de la demanda que correspondería a 617,5 millones de litros, mientras que para el año 2050 se proyecta una demanda de aproximadamente 3.600 millones de litros la producción mediante biomasa forestal representaría un 17,2% de la demanda corresponde a 617,5 millones de litros anualmente, considerando una densidad igual al combustible convencional 0,8 [kg/L].

La biomasa forestal se perfila como una de las materias primas con mayor potencial para el desarrollo de combustible de aviación sostenible en Chile, debido a la amplia disponibilidad de recursos forestales, la existencia de una industria consolidada y una cadena logística ya establecida. Bajo los supuestos considerados esta materia prima podría cubrir aproximadamente un 25,7% de la demanda de combustible para el año 2035 y un 17,2% para 2050 mediante la ruta tecnológica Fischer-Tropsch.

No obstante, el aprovechamiento de este potencial dependerá de la disponibilidad efectiva de los residuos forestales, de su extracción sostenible y de la competencia con otros usos energéticos e industriales, por lo que su desarrollo deberá enmarcarse en criterios de sostenibilidad y gestión eficiente del recurso.

### **3.1.3 Residuos sólidos municipales**

Los residuos sólidos municipales (RSM) corresponden a los desechos generados en los hogares, establecimientos comerciales, servicios públicos y pequeñas industrias, además de aquellos provenientes del barrido de calles, áreas verdes y espacios públicos, cuyo destino final sería vertederos o rellenos sanitarios.

Tradicionalmente estos residuos han sido considerados un problema ambiental debido a sus disposición final en rellenos sanitarios y vertederos, sin embargo, bajo el enfoque de economía circular, han adquirido valor como fuente alternativa de energía y materia prima para la producción de combustible sostenible, esto debido a:

- Emisiones de Gases de Efecto invernadero (GEI): los vertederos constituyen hasta un 5% de las emisiones globales de GEI, principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generados por la descomposición de materia orgánica (IEA Bioenergy, 1029).
- Están relacionados con la contaminación de suelos y aguas subterráneas, emisión de partículas nocivas y malos olores, efectos en el paisaje y la biodiversidad.

En Chile, durante el año 2018 se generaron 8.177.448 toneladas de residuos sólidos municipales, equivalentes a una producción promedio de 1,19 kg por habitante al día, considerando una población de 18,75 millones de habitantes. Del total generado, la Región Metropolitana concentró el 44,9%, seguida por las regiones de Valparaíso (10,6%), Biobío (9,3%) y Coquimbo (5,2%). (Ambiente, 2019)

Mientras que en el año 2021 se generó un total de 19.6 millones de toneladas de residuos a nivel nacional. Esta cifra incluye tanto residuos peligrosos como no peligrosos, diferenciación que se hace en función del riesgo que presenta para la salud humana y el medio ambiente (SINIA, 2023).

- Del total, un 96.7% corresponde a residuos no peligrosos, es decir, aquellos que no representan un riesgo significativo si se gestionan adecuadamente.
- El 3.3% restante son residuos peligrosos, los cuales, debido a su naturaleza química o física, requieren un manejo especial para evitar impactos negativos en la salud o en los ecosistemas.

Dentro del universo de residuos no peligrosos, la distribución por origen es la siguiente:

- Aproximadamente un 49% proviene del sector industrial, siendo este el principal generador de residuos en el país.
- Los residuos sólidos municipales constituyen un 46.1% del total, lo que evidencia su relevancia dentro del sistema nacional de gestión de residuos.
- Finalmente, un 1.6% corresponde a lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas, los cuales son el resultado del proceso de depuración de las aguas residuales urbanas (SINIA, 2023).

Mientras que al año 2025 en Chile se generan aproximadamente 436 [kg/persona] al año que tienen como destino final el vertedero, sin someterse a procesos previos de tratamiento, como reciclaje, incineración o recuperación de materiales, el potencial de generación de este tipo de materia prima se calcula aplicando una tasa de un 20%. Este enfoque limita el aprovechamiento de los residuos y refuerza la necesidad de implementar estrategias sostenibles para su gestión, alineadas con principios de economía circular y valorización de recursos. (OCDE, 2025)

A pesar del volumen disponible, la gestión actual de estos residuos continua siendo lineal. Aproximadamente el 99% de los residuos sólidos municipales se destina a eliminación final, mientras que solo el 1% se valoriza mediante procesos de reciclaje o reutilización. De los residuos eliminados, cerca del 79% se deposita en rellenos sanitarios, un 13% en vertederos y el resto en otras formas de disposición.

Al considerar las proyecciones de 2035 y 2050, se consideró la evolución demográfica estimada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la cual proyecta una población superior a los 20,6 millones para 2035 y cercana a los 19 millones para 2050 (INE, 2026).

Sobre la base de esta información a continuación se proyecta que para el año 2035 existirá un consumo a nivel nacional de 1.796 [kt/año] mientras que en 2050 será de 1.656 [kt/año]

Para producir SAF con esta materia prima se requiere el proceso Fisher Tropsch donde comienza con la gasificación de materiales con alto poder calorífico y ricos en carbono. Su rendimiento alcanza aproximadamente un 24,7% de conversión, lo que convierte en la alternativa más eficiente desde el punto de vista productivo. (Alan, 2025)

Considerando que el consumo de combustible de aviación en Chile se proyecta en torno a 2.400 millones de litros para el 2035 (Junta Aeronautica Civil, 2020), esta producción representaría un 23,1% de la demanda que correspondería a 554,5 millones de litros, mientras que para el año 2050 se proyecta una demanda de aproximadamente 3.600 millones de litros la producción mediante RSM representaría un 14,2% de la demanda corresponde a 511,3 millones de litros anualmente, considerando una densidad igual al combustible convencional 0,8 [kg/L].

Esta situación representa una oportunidad para desarrollar alternativas energéticas que permitan transformar estos residuos en productos de mayor valor agregado, reduciendo simultáneamente los impactos ambientales asociados a su acumulación.

La utilización de residuos sólidos municipales presenta diversas ventajas técnicas y ambientales:

- Reduce la cantidad de residuos destinados a rellenos sanitarios.
- Disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la descomposición de materia prima orgánica.
- Diversifica las fuentes de materia prima para la producción de SAF.
- Reduce la dependencia de combustibles fósiles.
- Favorece la implementación de estrategias de economía circular.
- Aprovecha un recurso disponible de forma permanente y distribuido a lo largo del territorio nacional.

No obstante, también existen desafíos que deben considerarse. La composición de los residuos sólidos municipales es altamente variable, dependiendo de factores geográficos, socioeconómicos y estacionales.

Además, se requiere implementar sistemas eficientes de separación, clasificación y pretratamiento para eliminar materiales no aprovechables y garantizar una alimentación homogénea a los procesos de conversión energética.

### 3.2 Capacidad de producción estimada de SAF

En la *Tabla 1* se presenta un resumen del rendimiento porcentual de cada uno de estos procesos en la conversión de materias primas en combustibles utilizables para la aviación.

|             | FT     | AtJ | HEFA |
|-------------|--------|-----|------|
| Rendimiento | 24,70% | 22% | 83%  |

*Tabla 3-1: Tabla resumen de rendimiento porcentual de cada proceso de conversión, Fuente: elaboración propia*

Como se observa en la tabla 1, el proceso HEFA destaca por su alto rendimiento, seguido por Fisher-Tropsch y finalmente Alcohol-to-Jet.

Estos valores de rendimiento son claves para evaluar la viabilidad técnica de cada tecnología en función del tipo de materia prima disponible. La elección de la tecnología más adecuada dependerá de estos factores, así como las necesidades específicas de producción y las metas de sostenibilidad planteadas para la industria aérea.

Además de evaluar el rendimiento de cada tecnología de conversión, se ha analizado la capacidad de producción de SAF a partir de distintas materias primas.

Para ilustrar esto, se presenta la siguiente *Tabla 2* que muestra el rendimiento, la disponibilidad de las materias primas y la producción esperada de SAF a partir de cada tipo de materia prima

| Materia prima                | Tecnología | Rendimiento | Disponibilidad | Producción SAF            | Porcentaje Demanda |
|------------------------------|------------|-------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| Aceite de cocina usados      | HEFA       | 83%         | 142,3 [kt/año] | 143,3 [Millones de L/año] | 6,20%              |
| Desechos sólidos Municipales | FT         | 24,70%      | 1796 [kt/año]  | 554,5 [Millones de L/año] | 23,10%             |
| Biomasa Forestal             | FT         | 24,70%      | 2.000 [kt/año] | 617,5 [Millones de L/año] | 25,70%             |

Tabla 3-2: Tabla resumen de rendimiento, disponibilidad de materia prima, producción esperada de SAF y porcentaje asociado a la demanda de combustible para el año 2035. Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la biomasa forestal y los desechos sólidos municipales constituyen las materias primas con mayor potencial para la producción de SAF en Chile al año 2035. Aunque ambas utilizan la misma tecnología y presenta y presentan un rendimiento de conversión de 24,7%, la mayor disponibilidad de biomasa forestal permite alcanzar la mayor producción potencial de SAF y la mayor cobertura de la demanda nacional. En contraste, el aceite de cocina usado presenta el mayor rendimiento de conversión mediante la tecnología HEFA, sin embargo, su menor disponibilidad y menor porcentaje de potencial generador de un 15% limita su producción y su contribución a la demanda.

Por otro lado, para el año 2050, se observa la siguiente tabla:

| Materia prima                | Tecnología | Rendimiento | Disponibilidad | Producción SAF | Porcentaje Demanda |
|------------------------------|------------|-------------|----------------|----------------|--------------------|
| Aceite de cocina usados      | HEFA       | 83%         | 132,8          | 110,2          | 3,80%              |
| Desechos sólidos Municipales | FT         | 24,70%      | 1656           | 409            | 14,20%             |
| Biomasa Forestal             | FT         | 24,70%      | 2000           | 494            | 17,20%             |

Tabla 3-3: Tabla resumen de rendimiento, disponibilidad de materia prima, producción esperada de SAF y porcentaje asociada a la demanda de combustible para el año 2050. Fuente: Elaboración propia

Se observa la estimación del potencial de producción de SAF para el año 2050, los resultados muestran que la biomasa forestal continúa siendo la materia prima con mayor potencial de producción, alcanzando un 17,2 % de la demanda proyectada de combustible.

En segundo lugar, los residuos sólidos municipales podrían generar alrededor de un 14,2% de la demanda, mientras que por su parte los aceites de cocina usados mantienen el mayor rendimiento de conversión, sin embargo, la disminución de su disponibilidad reduce su producción, cubriendo solo un 3,8% de la demanda nacional.

En comparación con el escenario de 2035, el aumento proyectado en la demanda de combustible de aviación reduce el porcentaje de cobertura de todas las materias primas, evidenciando que, si bien estas representan una fuente para la producción de SAF, será necesario complementar su aprovechamiento con otras materias primas y políticas públicas que ayuden a la trazabilidad y recolección de estas mismas.

Estos resultados demuestran que, para el contexto chileno, la disponibilidad de materia prima es el factor que más influye en el potencial de producción de SAF, siendo más determinante que el rendimiento del proceso de conversión.

De acuerdo con la investigación realizada, la biomasa forestal constituye la materia prima con mayor potencial de producción de SAF, favorecida por la amplia superficie forestal del país, la disponibilidad continua de residuos provenientes de las actividades de cosecha y manejo de plantaciones, y la experiencia consolidada de Chile en el sector forestal. Sin embargo, su aprovechamiento requiere enfrentar desafíos asociados a la recolección, transporte y almacenamiento de la biomasa, debido a la dispersión geográfica de los recursos y a los costos logísticos que ello implica.

Por su parte, los aceites de cocina usados presentan el mayor rendimiento de conversión mediante la tecnología HEFA, alcanzando aproximadamente un 83%. No obstante, su limitada disponibilidad anual y la competencia con otros usos industriales restringen su potencial de expansión y reducen significativamente su capacidad para abastecer una demanda creciente de combustible de aviación sostenible.

En tanto, los residuos sólidos municipales presentan un potencial de producción inferior al de la biomasa forestal, pero ofrecen ventajas asociadas a su generación continua, amplia distribución territorial y concentración en zonas urbanas, donde ya existe infraestructura para su recolección y gestión. Estas características podrían facilitar el abastecimiento de futuras plantas de producción de SAF, reducir los costos logísticos y, simultáneamente, contribuir a disminuir la disposición de residuos en rellenos sanitarios, favoreciendo la implementación de estrategias de economía circular.

En consecuencia, si el criterio de evaluación corresponde exclusivamente al potencial de producción, la biomasa forestal se posiciona como la alternativa más favorable. Sin embargo, al incorporar aspectos relacionados con la continuidad del suministro, la distribución territorial, la infraestructura existente y los beneficios ambientales derivados de la valorización de residuos, los residuos sólidos municipales emergen como una de las alternativas más atractivas para el desarrollo de una futura industria nacional de combustible de aviación sostenible. (Alan, 2025)

En este contexto, los aceites de cocina usados y la biomasa forestal podrían desempeñar un rol complementario dentro de una estrategia de diversificación de materias primas, permitiendo aumentar la resiliencia del sistema productivo, aprovechar las ventajas específicas de cada recurso y disminuir la dependencia de una única fuente de abastecimiento.

## Conclusiones

La creciente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector aeronáutico ha impulsado el desarrollo de combustibles de aviación sostenibles como una alternativa para avanzar hacia una aviación con menor impacto ambiental. En este contexto, la presente investigación permitió evaluar el potencial de producción de combustible de aviación sostenible (SAF) en Chile a partir de distintas materias primas disponibles en el país, considerando su disponibilidad proyectada, las tecnologías de conversión aplicables y la capacidad de producción estimada para los años 2035 y 2050.

Los resultados obtenidos evidencian que la disponibilidad de materia prima constituye el principal factor que determina el potencial de producción de SAF, incluso por sobre el rendimiento de conversión de las tecnologías evaluadas. Si bien la tecnología HEFA presenta el mayor rendimiento de conversión, alcanzando aproximadamente un 83%, su aplicación se encuentra limitada por la disponibilidad de aceites de cocina usados. En contraste, la tecnología Fischer-Tropsch, aunque presenta un menor rendimiento, permite aprovechar materias primas con mayor disponibilidad, como la biomasa forestal y los residuos sólidos municipales, incrementando el potencial de producción de combustible sostenible.

Entre las materias primas analizadas, la biomasa forestal presenta el mayor potencial de producción de SAF, favorecida por la disponibilidad de residuos provenientes de las actividades de manejo y cosecha forestal y por la consolidación del sector forestal en Chile. Por su parte, los residuos sólidos municipales destacan por su generación continua, amplia distribución territorial y por la valorización de residuos que actualmente son destinados a disposición final, constituyendo una alternativa con importantes beneficios ambientales y logísticos. En tanto, los aceites de cocina usados, pese a presentar el mayor rendimiento de conversión, poseen un potencial de producción más limitado debido a la menor disponibilidad de este recurso.

Asimismo, las proyecciones realizadas para los años 2035 y 2050 muestran que ninguna de las materias primas evaluadas sería capaz de satisfacer, de forma individual, la demanda futura de combustible de aviación en Chile. En consecuencia, el desarrollo de una industria nacional de SAF requerirá una estrategia basada en la complementariedad y diversificación de materias primas, permitiendo aprovechar las fortalezas de cada recurso.

En términos generales, los resultados obtenidos demuestran que Chile dispone de condiciones favorables para avanzar en la producción de combustible de aviación sostenible, sustentadas en la disponibilidad de recursos y en la existencia de tecnologías de conversión internacionalmente certificadas. En este escenario, el aprovechamiento conjunto de biomasa forestal, residuos sólidos municipales y aceites de cocina usados representa una oportunidad



para impulsar el desarrollo de una industria nacional de SAF, contribuyendo tanto a la reducción de emisiones del transporte aéreo como al fortalecimiento de la economía circular mediante la valorización de residuos y subproductos disponibles en el país.

## Bibliografía

- Alan. (2025). *Estudio de Factibilidad sobre el uso de combustibles de aviación sostenibles*.  
Obtenido de [https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/Estudio\\_de\\_factibilidad\\_Chile.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/Estudio_de_factibilidad_Chile.pdf)
- Ambiente, M. d. (2019). *INFORME DEL ESTADO DEL MEDIO AMBIENTE / CAPÍTULO 10 / RESIDUO*. Obtenido de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/10-residuos.pdf>
- Ambrosio, B. A. (04 de April de 2025). *Cornell University*. Obtenido de <https://arxiv.org/abs/2504.03880>
- Bofan Wang, Z. J. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture science y technology*.
- Carlyle, G. (Agosto de 2024). *Earth Finance*. Obtenido de <https://www.earthfinance.com/insights/overcoming-sustainable-aviation-fuel-roadblocks>
- CONAF. (2022). *Información de Superficie Forestal de Chile*. Obtenido de <https://paginav.cl/2022/01/07/conaf-actualiza-informacion-de-superficie-forestal-de-chile/>
- DGAC. (2022). *Plan de Acción de Chile*. Santiago. Obtenido de [https://www.icao.int/environmental-protection/Lists/States\\_Action\\_Plans/Attachments/160/Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20de%20Chile%202022.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Lists/States_Action_Plans/Attachments/160/Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20de%20Chile%202022.pdf)
- European Aviation School. (2024). *EAS Barcelona*. Obtenido de <https://easbcn.com/combustible-para-aviones-tipos-y-caracteristicas/>
- Group, A. T. (2021). *Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century*. Switzerland. Obtenido de [https://aviationbenefits.org/media/167418/w2050\\_v2021\\_27sept\\_summary.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167418/w2050_v2021_27sept_summary.pdf)
- Group, M. (Febrero de 2024). *SAF*. Obtenido de [https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/saf-latam-opportunities?utm\\_source](https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/saf-latam-opportunities?utm_source)

- HINICIO. (2026). *Estudio Del Mercado De Aceites Usados de Cocina y Su Potencial Como Insumo Para Elaborar Diesel Renovable*. Obtenido de [https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2026/07/Informe-final\\_UCO\\_SAF\\_HVO.pdf](https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2026/07/Informe-final_UCO_SAF_HVO.pdf)
- Hundt, A.-E. A. (29 de abril de 2025). *Sustainable aviation futures*. Obtenido de <https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/scale-up-saf-king-and-spalding>
- IATA. (2023). *COMUNICADO N°34*. Obtenido de <https://www.iata.org/contentassets/53dc669abd194d14bbecf9aa8eb1b09a/2023-06-06-01-sp.pdf>
- IATA. (23 de September de 2025). Obtenido de : <https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-09-23-01/>
- IEA Bioenergy. (1029). *Upgrading Landfill Gas to Biomethane*. Obtenido de [https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/03/Biomethane\\_Production\\_3.pdf](https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/03/Biomethane_Production_3.pdf)
- IICA. (s.f.). Obtenido de <https://iica.int/en/press/news/countries-of-the-americas-seek-to-define-joint-strategies-to-strengthen-biofuel-production-in-the-region/>
- IndexMundi. (2026). *Consumo doméstico de productos agrícolas en Chile*. Obtenido de <https://www.indexmundi.com/agriculture/?pais=cl&producto=aceite-de-soja&variable=consumo-domestico&l=es>
- INE. (2026). *Estimaciones y proyecciones de población base 2024*. Obtenido de [https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/prensa-y-comunicacion/eepp2024.pdf?sfvrsn=f8847283\\_2](https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/prensa-y-comunicacion/eepp2024.pdf?sfvrsn=f8847283_2)
- INFOR. (2025). *Anuario Forestal 2024*. Obtenido de <https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-estadisticos/anuario-forestal>
- Junta Aeronautica Civil. (2020). *Plan Estrategico de Transporte Aéreo*. Santiago. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1fSgAHINVM2QUWpxRZOHz0-8D77k7Plk-/view>
- Lecocq. (2025). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL USO DE COMBUSTIBLES DE AVIACIÓN SOSTENIBLES*. Obtenido de [https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/Estudio\\_de\\_factibilidad\\_Chile.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/Estudio_de_factibilidad_Chile.pdf)
- Meneses, A. (2022). *CORMA, Tercera Mesa SAF*. Obtenido de <https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2023/01/Presentaciones-3ra-mesa.pdf>

- Ministerio de Energía et al. (2024). *Hoja de Ruta SAF 2050*. Santiago. Obtenido de <https://www.mtt.gob.cl/wp-content/uploads/2024/01/Hoja-de-Ruta-SAF-Consulta-P%C3%BAblica.pdf>
- Neste. (2024). *NESTE*. Obtenido de <https://www.neste.com/>
- Net Zero Insights. (01 de September de 2025). Obtenido de <https://netzeroinsights.com/resources/sustainable-aviation-fuels/>
- OACI. (2021). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*. Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202021.pdf>
- OACI. (2022). *OACI*. Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climate-change.aspx>
- OACI. (2022). *THE COST OF ACHIEVING NET-ZERO CARBON IN AVIATION*. Obtenido de [https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp\\_477\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_477_en.pdf)
- OACI. (s.f.). *Conversion processes*. Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>
- OCDE. (2025). *Environment at a glance indicator*. Obtenido de [https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-indicators\\_ac4b8b89-en/full-report/component-4.html](https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-indicators_ac4b8b89-en/full-report/component-4.html)
- Okolie J, A. D. (16 de Junio de 2023). *IScience*. Obtenido de [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(23\)01021-0?\\_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004223010210%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(23)01021-0?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004223010210%3Fshowall%3Dtrue)
- Paltsev, J. M. (2024). *Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America*. Obtenido de <https://cs3.mit.edu/publication/118414/file/Sustainable%20Decarbonization%20of%20Aviation%20in%20Latin%20America>
- Rendering. (2024). *Rendering*. Obtenido de <https://rendering.cl/>
- Ritchie, H. (2024). *Our World In Data*. Obtenido de <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>
- Sapag, N. (s.f.). *Preparación y Evaluación de Proyectos Generales*. Mac Graw Hill Education.



Schimunek, H. (2012). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. Obtenido de file:///C:/Users/HP/Downloads/Texto%20Schimunek.pdf

SINIA. (2023). *Reporte del estado del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>

SkyNRG. (s.f.). *SKYNRG*. Obtenido de <https://skynrg.com/producing-saf/>

Surgenor, C. (12 de September de 2025). *GreenAir*. Obtenido de <https://www.greenairnews.com/?p=7972>

*Sustainable Aviation Futures*. (Febrero de 2024). Obtenido de <https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/saf-latam-opportunities?>

World Energy. (2023). *World Energy*. Obtenido de <https://www.worldenergy.net/>