Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

CADENA DE VALOR PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN EN MÉXICO

Claudia Gutiérrez-Antonio [a,*], Salvador Hernández [b]

[a] Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Avenida de las Ciencias s/n esquina con Villas del Mesón, Juriquilla, Querétaro, 76230, México. claudia.gutierrez@uaq.mx; claugtez@gmail.com

[b] Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

Resumen

El sector de la aviación ha sido pionero en el establecimiento de metas y estrategias para alcanzar su desarrollo sustentable. En 2021, este sector estableció la meta de emisiones netas cero para el año 2050, para lo cual el combustible sustentable de aviación tendrá un papel clave. El combustible sustentable de aviación, conocido como SAF por sus siglas en inglés, es la contraparte renovable de la turbosina de origen fósil. El SAF puede utilizarse en mezclas hasta el 50% con turbosina de origen fósil, para así garantizar el correcto funcionamiento de los motores de las aeronaves. Además, el SAF debe cumplir con normativas de sustentabilidad, y su precio debe ser competitivo con su contraparte fósil. En este contexto, la implantación de la cadena de producción de SAF en México enfrenta importantes retos, que pueden abordarse mediante el aprovechamiento estratégico de las oportunidades. Todo ello debe ceñirse a las normativas en materia técnica, de sustentabilidad, así como legal. Por ello, en el presente trabajo se discutirán los aspectos técnicos, de sustentabilidad y legales requeridos para la implantación de la cadena de producción de SAF en México.

Palabras clave: combustible sustentable de aviación; cadena de suministro; normativa técnica; normativa de sustentabilidad; SAF.

Naturaleza y TECNOLOGÍA

Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

VALUE CHAIN FOR THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE AVIATION FUEL IN MEXICO

Abstract

The aviation sector has been a pioneer in establishing goals and strategies to achieve sustainable development. In 2021, this sector set the goal of net-zero emissions by 2050, for which sustainable aviation fuel will play a key role. Sustainable aviation fuel, known as SAF, is the renewable counterpart to fossil jet fuel. SAF can be used in blends of up to 50% with fossil jet fuel to ensure the proper functioning of aircraft engines. Furthermore, SAF must comply with sustainability regulations, and its price must be competitive with its fossil counterpart. In this context, the implementation of the SAF production chain in Mexico faces significant challenges, which can be addressed through the strategic leveraging of opportunities. All of this must adhere to technical, sustainability, and legal regulations. Therefore, this paper will discuss the technical, sustainability and legal aspects required for the implementation of the SAF production chain in Mexico.

Keywords: sustainable aviation fuel; supply chain; technical regulations; sustainability regulations; SAF.

1. Introducción

Actualmente, el sector del transporte es soporte del crecimiento económico, y posibilita la conexión de las personas con servicios esenciales (WB, 2025). A lo largo del tiempo, los medios de transporte se han actualizado, han cambiado sus diseños, y también han incrementado su eficiencia. Sin embargo, la dependencia del sector transporte a los combustibles fósiles ha permanecido prácticamente sin cambio. La operación del sector del transporte depende en un 91% de productos derivados del petróleo, en contraste con el 94.5% reportado en 1970 (IEA, 2025a). De hecho, el sector transporte consume cerca del 30% del total de la demanda de energía; de este total, el transporte por carretera emplea casi el 90% de dicha energía, mientras que el 10% restante se distribuye en la aviación y los trenes (IEA, 2025a; IEA, 2025b). En consecuencia, este sector contribuye con más de un tercio de las emisiones mundiales de gases de efecto

Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

invernadero; no obstante, este valor puede aumentar hasta un 60% para el año 2050 si no se realizan cambios (IEA, 2025a; WB, 2025). Por ello, la descarbonización del sector transporte es mandatoria.

De manera particular, en 2023 el sector de la aviación contribuyó con el 2.5% de las emisiones globales de dióxido de carbono (IEA, 2025c). A pesar de que este porcentaje es pequeño, este sector es el que ha tenido el mayor crecimiento entre 2000 y 2019 (IEA, 2025c). Adicionalmente, el sector de la aviación es uno de los más complejos para descarbonizar, dadas las condiciones de operación en los vuelos.

En este contexto, el sector de la aviación ha sido pionero en el establecimiento de objetivos para garantizar su desarrollo sustentable. Así, en el año 2009 la Agencia Internacional de Transporte Aéreo (IATA) en conjunto con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) propusieron los siguientes objetivos que permitirían el desarrollo sustentable de la aviación (IATA, 2020):

- Mejora anual de la eficiencia de motores en 1.5% entre 2009 y 2020.
- Crecimiento neutro de emisiones a partir del año 2020.
- Reducción neta de emisiones en un 50% en 2050, respecto a los niveles de emisiones del 2005.

Para alcanzar estas metas se propuso una estrategia que consideraba cuatro pilares: mejora en aeronaves, medidas operacionales, combustibles sustentables de aviación, SAF por sus siglas en inglés, y un esquema de intercambio de emisiones de dióxido de carbono (IATA, 2020).

Posteriormente, en 2021, el sector de la aviación estableció la meta de alcanzar emisiones netas cero para el año 2050 (IATA, 2026a). Para lograr esta meta se consideran cuatro estrategias principales. La primera de ellas consiste en mejorar la infraestructura y la eficiencia operativa; se espera que esta estrategia contribuya con el 3% a la meta antes mencionada. La segunda alternativa se espera que contribuya con el 13% de la reducción de emisiones requerida; ésta consiste en nuevas tecnologías de aeronaves, tanto eléctricas como el uso de hidrógeno. Con un porcentaje similar, 19%, se contempla un esquema de compensaciones y captura de carbono como la tercera estrategia. Finalmente, el uso de SAF se vislumbra como la alternativa de mayor contribución, 65%, a la meta establecida (IATA, 2026a).

Lo anterior requerirá un aumento masivo de la producción de combustible sustentable de aviación para satisfacer la demanda (IATA, 2026b). Para ello es necesario que el combustible sustentable de aviación cumpla con regulaciones técnicas, ambientales y legales, tanto nacionales como internacionales.

En la literatura se han reportado diversos estudios en torno a la implementación potencial de la cadena de valor para la producción de SAF en Reino Unido, Angola, Australia-China, Portugal, Estados Unidos y Brasil (Masum y col., 2023; Pires y col., 2024; Borrill y col., 2025; Chivanga Barros y col., 2026; Walter y col., 2026; Xu y col., 2026). Sin embargo, este tipo de estudio no se ha realizado para México. Por ello, en el presente trabajo se discutirán los aspectos técnicos, de sustentabilidad y legales requeridos para la potencial implantación de la cadena de producción de combustible sustentable de aviación en México.

2. Combustible sustentable de aviación

En el sector de la aviación comercial, el combustible de origen fósil se denomina turbosina, combustible de turbina, o bien Jet A. Este combustible consta de hidrocarburos en el rango del C8 al C16, y está compuesto principalmente de parafinas, naftenos y compuestos aromáticos. Para que este combustible pueda utilizarse en la aviación comercial, éste debe cumplir con los parámetros establecidos en la norma ASTM D1655 (ASTM, 2026).

Debido a las condiciones en las cuales operan los aviones, la contraparte renovable del combustible de aviación debe cumplir con las mismas propiedades establecidas para el combustible de origen fósil. Esto implica el desarrollo de un combustible de sustitución directa (*drop-in)*; es decir, un combustible que se pueda utilizar sin modificar los motores de los aviones. De lo contrario, la flota aérea tendría que recertificarse, debido a los altos estándares de seguridad que se manejan en la industria de la aviación.

Así, el combustible sustentable de aviación es la contraparte renovable de la turbosina de origen fósil. El combustible sustentable de aviación ha recibido diversos nombres a lo largo del tiempo; entre ellos pueden listarse bioturbosina, biocombustible de aviación, bioqueroseno, queroseno parafínico sintético, entre otros. Sin embargo, recientemente el acrónimo SAF (de sus siglas en inglés,

Sustainable Aviation Fuel) ha ganado popularidad.

El combustible sustentable de aviación consta de hidrocarburos en el rango del C8 al C16, y está compuesto principalmente de parafinas y naftenos. Respecto de su composición, la principal diferencia con el combustible de aviación de origen fósil es el contenido de compuestos aromáticos. El contenido de compuestos aromáticos en el SAF depende tanto de la ruta de procesamiento como de la materia prima empleada. Por otro lado, la norma ASTM D7566 (ASTM, 2022) establece un valor mínimo de 8.4% en volumen de compuestos aromáticos en el tanque de combustible de la aeronave. Por ello, la cantidad de compuestos aromáticos presentes en el combustible sustentable de aviación determina el porcentaje máximo con el cual puede usarse en mezclas con combustible de aviación de origen fósil.

Ahora bien, el combustible sustentable de aviación puede producirse a partir de diferentes tipos de biomasa, mediante distintos procesos de conversión, Figura 1.

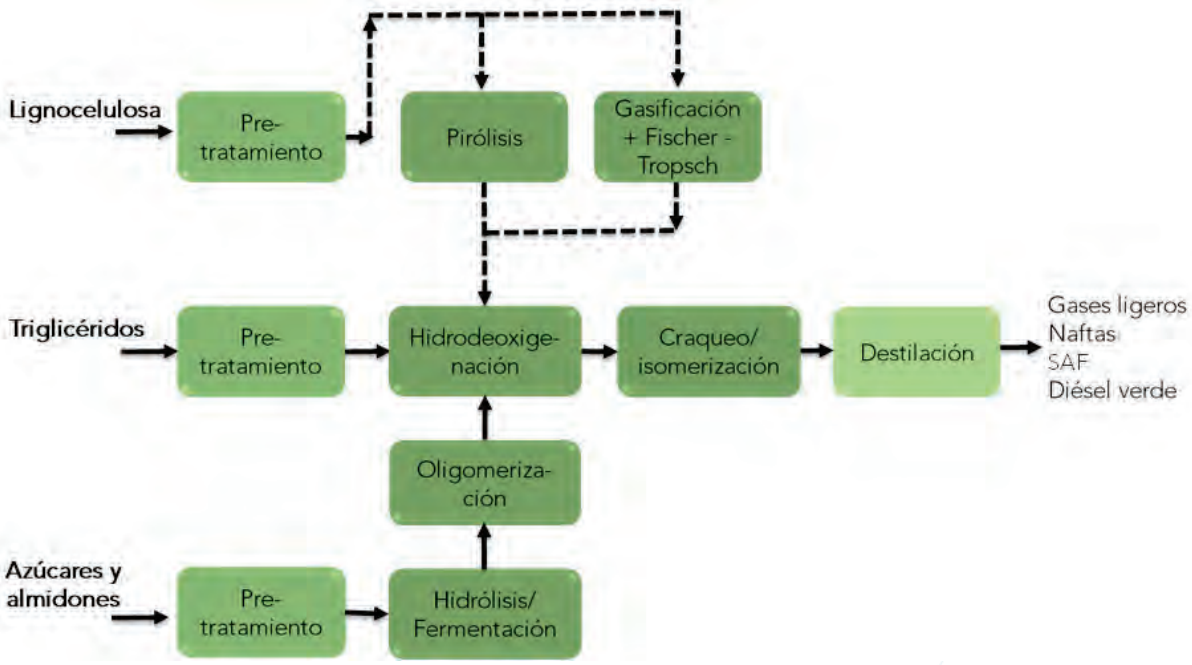


Figura 1. Procesos de producción de combustible sustentable de aviación a partir de diferentes biomasas. Elaboración propia.

De la Figura 1 es posible observar que la ruta de procesamiento más directa es el hidroprocesamiento de triglicéridos. En el caso de azúcares, almidones y material lignocelulósico, éstos terminan convergiendo en el hidrotratamiento después de procesamientos adicionales.

Una de las principales ventajas del combustible sustentable de aviación es que reduce hasta en un 80% las emisiones de dióxido de carbono a lo largo de su ciclo de vida, respecto del combustible de origen fósil (Gutiérrez-Antonio y col., 2017). Cabe mencionar que, sin importar la materia prima o el proceso de producción, el combustible sustentable de aviación debe cumplir con normativas técnicas y de sustentabilidad, así como las legales aplicables en el lugar donde éste es producido. Estos aspectos se discuten en la siguiente sección.

3. Marco normativo en materia de combustible sustentable de aviación

Como se mencionó anteriormente, el sector de la aviación ha sido pionero en establecer metas para garantizar su desarrollo sustentable. Además, en este sector se han desarrollado las normativas técnicas para la evaluación no sólo de los combustibles sino de sus rutas de procesamiento (Gutiérrez-Antonio y col., 2021); también se han propuesto y adoptado esquemas para evaluar la sustentabilidad de los combustibles Gutiérrez-Antonio y col., 2021).

En el marco técnico, se cuenta con dos estándares principales. La norma ASTM D1655 establece las propiedades que deben cumplir tanto los combustibles de origen fósil como los combustibles sustentables de aviación (ASTM, 2026a). Cabe recordar que el sector de la aviación busca combustibles de sustitución directa para evitar la recertificación de toda la flotilla aérea (Gutiérrez-Antonio y col., 2021). Además, el estándar ASTM D7566 (ASTM, 2022) establece en su anexo, las rutas de procesamiento certificadas para la producción de SAF, así como los porcentajes máximos en los cuales puede ser utilizado el SAF, Tabla 1.

Tabla 1. Rutas de procesamiento para la producción de SAF. Elaboración propia con información de CAAFI (2026).

Año de certificación	Ruta de procesamiento	Porcentaje de uso de SAF (%vol)
2009	Queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK)	50 %
2011	Queroseno parafínico sintético hidroprocesado con ésteres y ácidos grasos (HEFA-SPK)	50%
2014	Azúcares fermentados hidroprocesados para obtener isoparafinas sintéticas (SIP)	10%
2015	Queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch con aromáticos (FT-SPK/A)	50%
2018	Queroseno sintetizado por hidrotermólisis catalítica (CHJ)	50%
2020	Queroseno parafínico sintético hidroprocesado con hidrocarburos, ésteres y ácidos grasos (HHC-SPK o HC-HEFA-SPK)	10%
2023	Alcohol para obtener queroseno parafínico sintético con aromáticos (ATJ-SKA)	50%

Los procesos de conversión presentados en la Tabla 1 utilizan materias primas ricas en triglicéridos (HEFA, CHJ, HHC), azúcares y almidones (CH, SIP, ATJ), o materiales lignocelulósicos (FT, ATJ) (Gutiérrez-Antonio y col., 2021). Este marco técnico permite evaluar las propiedades de los combustibles sustentables de aviación para que puedan ser utilizados en vuelos comerciales, tanto de pasajeros como de mercancías. Es importante mencionar que la investigación sobre los procesos de producción de SAF continua; esto se debe a que no es posible que una sola materia prima satisfaga toda la demanda de SAF requerida a nivel mundial. Por ello, deben desarrollarse nuevas rutas de procesamiento que empleen diferentes materias primas, que estén localmente disponibles. Esto permitirá contar tanto con las materias primas como con el

SAF requerido en los diferentes lugares del planeta. Sin embargo, es necesario que el SAF también cumpla con el estándar de sustentabilidad.

Si bien todas las rutas de procesamiento presentadas en la Tabla 1 se encuentran certificadas por la ASTM, HEFA es la única ruta de conversión con un nivel de madurez tecnológico (TRL por sus siglas en inglés) de 9 (Saeed y col., 2026). Con niveles de TRL entre 6 y 8 se encuentran las tecnologías FT y ATJ, mientras que CH se encuentra entre los niveles 4 y 6 (Saeed y col., 2026). Este nivel de madurez tecnológica es la causa de que el SAF que se produce actualmente se genere mediante hidrotratamiento, principalmente de aceite usado de cocina (Martulli y col., 2025). Actualmente, la disponibilidad de tecnologías listas para su implementación es una de las principales limitaciones, junto con la integración de la cadena de suministro y la trazabilidad de la sustentabilidad (Martulli y col., 2025). En este punto es importante mencionar que la certificación de una ruta de procesamiento implica que cumple con las normas técnicas, ASTM en este caso. Por otro lado, a pesar de que una ruta esté certificada, su nivel de madurez tecnológica, es decir su funcionamiento en un entorno real, puede no estarlo. Cuando se cuenta con una ruta de procesamiento certificada y con una madurez tecnológica de 9, es posible integrar un caso de negocio viable; es entonces cuando se puede realizar la implementación de dicho proceso en escala comercial.

Respecto de la sustentabilidad, la aviación ha sido pionera en el establecimiento de instrumentos de política ambiental para garantizar su desarrollo sustentable. En este sentido, la OACI desarrolló el Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA, *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). CORSIA se aplica en la aviación internacional desde 2019; sin embargo, desde 2021 los vuelos internacionales están sujetos a obligaciones de compensación (IATA, 2026c). Con base en los lineamientos establecidos en CORSIA se han desarrollado estándares de sustentabilidad para SAF; uno de ellos es el propuesto por la Mesa Redonda para los Biomateriales (RSB, *Roundtable on Sustainable Biomaterials*).

El estándar RSB CORSIA fue reconocido por la OACI en diciembre de 2020; este estándar especifica los requerimientos de los operadores a lo largo de la cadena de suministro para producir combustible

sustentable de aviación que es elegible en el esquema CORSIA (RSB, 2026). Este esquema certifica la producción de SAF a partir de biomasa primaria, biomasa procedente de productos al final de su vida útil, residuos de producción, y residuos sólidos urbanos (RSB, 2026).

El esquema RSB CORSIA se basa en doce principios, que se enlistan a continuación (RSB, 2026):

- Principio 1. Legalidad.
- Principio 2. Planeación, monitoreo y mejora.
- Principio 3. Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Principio 4. Derechos humanos y laborales.
- Principio 5. Desarrollo social y rural.
- Principio 6. Seguridad local alimentaria.
- Principio 7. Conservación.
- Principio 8. Suelo.
- Principio 9. Agua.
- Principio 10. Calidad del aire.
- Principio 11. Gestión de insumos y residuos.
- Principio 12. Derechos de la tierra.

Los doce principios listados anteriormente se aplican en todos los operadores de la cadena de suministro. Este enfoque es importante, ya que, para lograr la certificación del combustible sustentable de aviación, la huella de carbono del SAF debe ser 10% menor que la línea base correspondiente al combustible de origen fósil. Esto implica que no sólo deben desarrollarse tecnologías sustentables para la producción de SAF, sino también debe serlo su cadena de suministro. En este caso, hay un aspecto interesante que debe considerarse. Para producir el SAF con el menor costo posible, éste se debe producir a gran escala; por otra parte, para lograr lo anterior se requiere procesar la mayor cantidad de biomasa disponible. Esto a su vez conlleva el establecimiento de una cadena de suministro extensa. Sin embargo, a mayor tamaño de la cadena de suministro, mayor el impacto ambiental asociado. De allí que se debe determinar la cadena óptima de suministro, considerando aspectos tanto ambientales como económicos; de lo contrario, el cumplimiento del estándar RSB CORSIA será complicado. En ese escenario, las aerolíneas no podrán acreditar la reducción de emisiones por el uso de SAF; esto hace que el combustible sea menos atractivo.

De igual manera, tanto el rendimiento de los procesos de producción como el establecimiento de la cadena de suministro son importantes en el costo de producción del SAF. En este contexto, el objetivo es que el SAF sea competitivo respecto del precio de su contraparte fósil.

De acuerdo con Petróleos Mexicanos, el precio de la turbosina en diciembre de 2025 fue de 10.37 MXN/litro (PEMEX, 2026). Considerando el tipo de cambio reportado por Banxico (2026), el costo de la turbosina de origen fósil es de 0.6023 USD/litro. Por otra parte, de acuerdo con Carbon Direct (2026), el precio del combustible sustentable de aviación se estimó en 2025 en 1.80 USD/litro. Esto significa que el precio del SAF prácticamente triplica al precio del combustible de origen fósil. Para lograr reducir el precio del SAF se identifican tres áreas de oportunidad interesantes, que se discutirán a continuación.

La primera de ellas se relaciona con el uso de materias primas residuales. Usualmente estas materias primas tienen un costo reducido, el cual está asociado a su recolección y transporte hacia los centros de procesamiento. Adicionalmente, estas materias primas residuales sufren procesos de degradación; por lo que indirectamente, estas materias primas están liberando emisiones a la atmósfera. Cuando se emplean estas materias primas para producir SAF se contribuye a la reducción de estas emisiones, por lo que se considera que las materias primas poseen adicionalidad. Por otra parte, los residuos poseen costos reducidos, lo cual coadyuva a reducir el costo de producción del SAF.

La segunda área de oportunidad se relaciona con la plataforma de procesamiento. Cuando se emplean sólo fracciones de las biomasas para producir combustible de aviación, el precio de venta no es competitivo con la contraparte fósil. En este caso, la aplicación de estrategias de intensificación de procesos permite incrementar la selectividad hacia SAF y disminuye los requerimientos de energía. Algunas de estas estrategias incluyen el uso de secuencias de destilación térmicamente acoplada, hidrotratamiento de un solo paso, o el uso de destilación reactiva (Gutiérrez-Antonio y col., 2021). De hecho, la aplicación simultánea de estrategias de intensificación de procesos con integración energética contribuye a disminuir los servicios auxiliares; además, esto conlleva reducciones significativas en las emisiones de dióxido de carbono, hasta de 90% (Gutiérrez-

Antonio y col., 2021). Las estrategias antes mencionadas posibilitan aumentar el rendimiento hacia el SAF, disminuir el consumo de energía, así como el impacto ambiental. De manera conjunta es posible contar con un costo de producción menor. A pesar de estas mejoras en el proceso de producción, el precio de venta no es competitivo con la contraparte fósil cuando sólo se usan fracciones de las biomasas, o bien procesamiento individual.

Así, surgen las biorefinerías como un esquema de procesamiento alterno con mayor viabilidad financiera. Una biorefinería se define como un esquema de procesamiento en el que una biomasa completa, no sólo una de sus fracciones, se convierte en, al menos, un biocombustible, un producto de valor agregado, y un tipo de bioenergía. Esto conlleva que la biomasa debe ser fraccionada, y posteriormente transformada mediante procesos biológicos, bioquímicos, químicos o termoquímicos. La principal ventaja es que la rentabilidad financiera recae en varios productos, en lugar de uno solo. Los biocombustibles tienen un bajo valor en el mercado, pero se generan en elevados volúmenes. Por otro lado, los productos de alto valor agregado se generan en pequeños volúmenes, pero tienen un alto valor en el mercado. Además, la bioenergía generada, térmica o eléctrica, puede ser empleada en el proceso para reducir los costos de operación. Esto permite emplear las biomasas de manera integral y generar más productos que ayudan a incrementar la rentabilidad financiera.

Tanto los esquemas de procesamiento individual como las biorefinerías deben evaluarse considerando aspectos económicos, técnicos y de sustentabilidad. En el aspecto técnico, el cumplimiento del SAF con las normas ASTM D7566 y ASTM D1655 es el indicador más importante a satisfacer (Gutiérrez-Antonio y col., 2021). En el aspecto de la sustentabilidad, se debe realizar un estudio más completo mediante el análisis del ciclo de vida (Gutiérrez-Antonio y col., 2021), para así cumplir con el esquema CORSIA (RSB, 2026). Finalmente, la evaluación de los impactos sociales puede realizarse con metodologías como el índice de desarrollo humano, que es una medida de las dimensiones vida larga y saludable, años de escolaridad, y nivel de vida digno (UNDP, 2026). Cabe añadir que la evaluación debe realizarse tanto en el proceso base definido como en las alternativas de mejoras realizadas al mismo; esto permitirá contar con una referencia clara y cuantitativa.

Finalmente, la determinación óptima de la cadena suministro puede contribuir tanto a la reducción de los costos de producción como a la sustentabilidad de la producción de SAF. La cadena óptima de suministro debe considerar el mayor acopio posible de materias primas para acceder a economías de escala; sin embargo, debe cuidarse que la disminución en el costo de procesamiento no se vea compensada con el aumento en los costos de transporte, así como en el impacto ambiental asociado.

Finalmente, el marco legal es también un aspecto importante que debe cumplirse. En México, se cuenta con un marco legal relacionado con los combustibles sustentables de aviación.

En primer lugar, es importante mencionar que el artículo 179 de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable establece como productos básicos y estratégicos al maíz, caña de azúcar, frijol, trigo, arroz, sorgo, café, huevo, leche, carne de bovinos, porcinos, aves y pescado (DOF, 2024). Además, el artículo 178 de la misma Ley señala que el Estado establecerá las medidas para procurar el abasto de alimentos y productos básicos y estratégicos a la población, promoviendo su acceso a los grupos sociales menos favorecidos y dando prioridad a la producción nacional. Esta Ley no prohíbe expresamente el uso de estos insumos para la producción de biocombustibles; sin embargo, la balanza comercial indica que éstos se importan para poder satisfacer la demanda de la población. Por ello, los insumos considerados como productos básicos y estratégicos no son promisorios para la producción de combustible sustentable de aviación. Sin embargo, los residuos derivados de la producción de dichos insumos, así como aquellos caducos o descompuestos sí pueden ser empleados para la producción de SAF.

Por otro lado, México promulgó en 2025 la Ley de Biocombustibles (DOF, 2025a). En esta Ley se considera el uso de residuos, y biomasa obtenida de manera sustentable para la producción de biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. También, en el Artículo 11 de esta Ley se establece que la Estrategia Nacional de Transición Energética debe incluir las metas para la producción de biocombustibles, y las acciones para su promoción se establecen en el Artículo 12. Cabe mencionar que en el Artículo 25 se establece que los permisos para la producción de caña de azúcar o de sorgo para la producción de biocombustibles se deben otorgar solamente cuando existan inventarios

excedentes de producción interna para satisfacer el consumo nacional, el cual debe ser expedido por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). También en el Artículo 26 se establece que los biocombustibles para aeronaves no pueden ser expedidos directamente al público, sino a transportistas aéreos, operadores aéreos y terceros para actividades distintas de las aeronáuticas, previa opinión favorable de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.

Recientemente, se promulgó la Ley General de Economía Circular (DOF, 2026b), la cual tiene por objeto cuidar y conservar al medio ambiente a través de políticas y mecanismos en materia de Economía Circular para incrementar la vida útil de los productos; minimizar, recuperar, aprovechar y valorizar los residuos, así como establecer la concurrencia de atribuciones entre la Federación, entidades federativas, municipios y demarcaciones territoriales de la Ciudad de México también forman parte de los objetivos de esa Ley. El objetivo de esta Ley se alinea a lo discutido previamente, en torno al potencial de los residuos para la producción de SAF en México. Es importante mencionar que también se realizaron adecuaciones a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2026).

4. Combustible sustentable de aviación en México

En México, la promoción del establecimiento de la cadena de valor del combustible sustentable de aviación se remonta al año 2009. Desde ese año, Aeropuertos y Servicios Auxiliares toma la iniciativa al ser el último eslabón de la cadena de suministro de los combustibles sustentables de aviación. Así, durante 2010 y 2011 se realiza el Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México. En esta iniciativa se buscó integrar a todos los actores involucrados en la cadena de suministro, desde las materias primas, el procesamiento, los estándares de sustentabilidad, así como la evaluación técnica del combustible. En ese momento, recién se había promulgado la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (DOF, 2008). En dicha Ley se establecía promover la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano sin poner en riesgo la

seguridad y soberanía alimentaria (DOF, 2008). Dicha Ley tenía un fuerte componente social para poder integrar al sector agrícola en la cadena de valor de la producción de biocombustibles. En ese evento se presentaron los mapas de potenciales productivos de Jatropha curcas e Higuerilla, principales insumos cultivables no comestibles.

Durante el Plan de Vuelo se concluyó que los cuellos de botella principales eran la insuficiente producción de materia prima, la falta de infraestructura de refinación, y la ausencia de una legislación adecuada (UNAM, 2012). No obstante, este evento detonó la realización de los primeros vuelos demostrativos y comerciales en México (Tabla 2).

Posteriormente, a partir de 2013, se crearon los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs) (Gobierno de México, 2015). Los CEMIEs estaban integrados por centros de investigación, instituciones de educación superior, entidades gubernamentales, empresas y expertos en distintas áreas de energía. Los CEMIEs estaban dedicados a energía eólica, geotérmica, oceánica, solar y bioenergía; en este último CEMIE existía un consorcio dedicado a la bioturbosina. El Clúster Bioturbosina del CEMIE Bio inició operaciones en 2016, con el objetivo de desarrollar, validar y asimilar tecnologías de vanguardia para la producción de bioturbosina (IMP, 2016). Con el objetivo de continuar con los trabajos del Clúster de Bioturbosina, en 2021 se creó la Iniciativa para los Combustibles Sustentable de Aviación (ICSA-MX). ICSA MX es una asociación civil sin fines de lucro que integra a los actores de la cadena de valor para la producción de combustible sustentable de aviación en México. A través de ICSA MX se ha impulsado la articulación de proyectos tanto de investigación como de desarrollo tecnológico para el establecimiento de la industria de SAF en México.

Recientemente, se presentó el Programa Sectorial de Energía 2025-2030 (DOF, 2025b). El Programa Sectorial de Energía 2025-2030 (PROSENER) constituye un instrumento de planeación energética de carácter vinculante, sustentado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF, 2025b). En particular, el PROSENER tiene 3 objetivos principales, en el cual destaca el número 2:

Tabla 2. Vuelos de demostración y comerciales realizados en México entre 2011 y 2012. Elaboración propia con información de ICAO (2015).

Año	Descripción de vuelo	Porcentaje de SAF empleado
2011	Primer vuelo de demostración en México (México D.F.-Tuxtla Gutiérrez Chiapas), séptimo en el mundo, operado por Interjet. El SAF fue producido con Jatropha curcas.	27 %
2011	Primeros vuelos comerciales en América (México D.F.-Tuxtla Gutiérrez Chiapas), operados por Interjet. El SAF fue producido con Jatropha curcas.	27%
2011	Primer vuelo transoceánico comercial en el mundo (México D.F.-Madrid, España), operado por Aeroméxico. El SAF fue producido con Jatropha curcas.	25%
2011-2012	29 vuelos verdes operador por Aeroméxico (México D.F.-San José, Costa Rica). El SAF fue producido con Camelina.	25%
2011	Primer vuelo verde en España operado por Iberia. El SAF fue producido con Camelina.	25%
2012	Tercer tramo de traslado del Secretario General de la OACI a Río+20, operado por Aeroméxico. El SAF fue producido con aceite usado de cocina, Jatropha y Camelina.	50%

Impulsar proyectos estratégicos de energías renovables, el fomento a la eficiencia energética, y la innovación tecnológica para mitigar el impacto ambiental y reducir la dependencia de combustibles fósiles, priorizando regiones y sectores históricamente marginados.

Derivado de este objetivo, en 2025 se definió el Eje Estratégico enfocado en Soberanía Energética Nacional con el desarrollo, producción y uso de biocombustibles. A

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

través de este Eje Estratégico se promoverá a los biocombustibles, dentro de los cuales se encuentra el combustible sustentable de aviación.

La implantación de la cadena de valor para la producción de SAF en México debe considerar diferentes aspectos, como se muestra en la Figura 2.

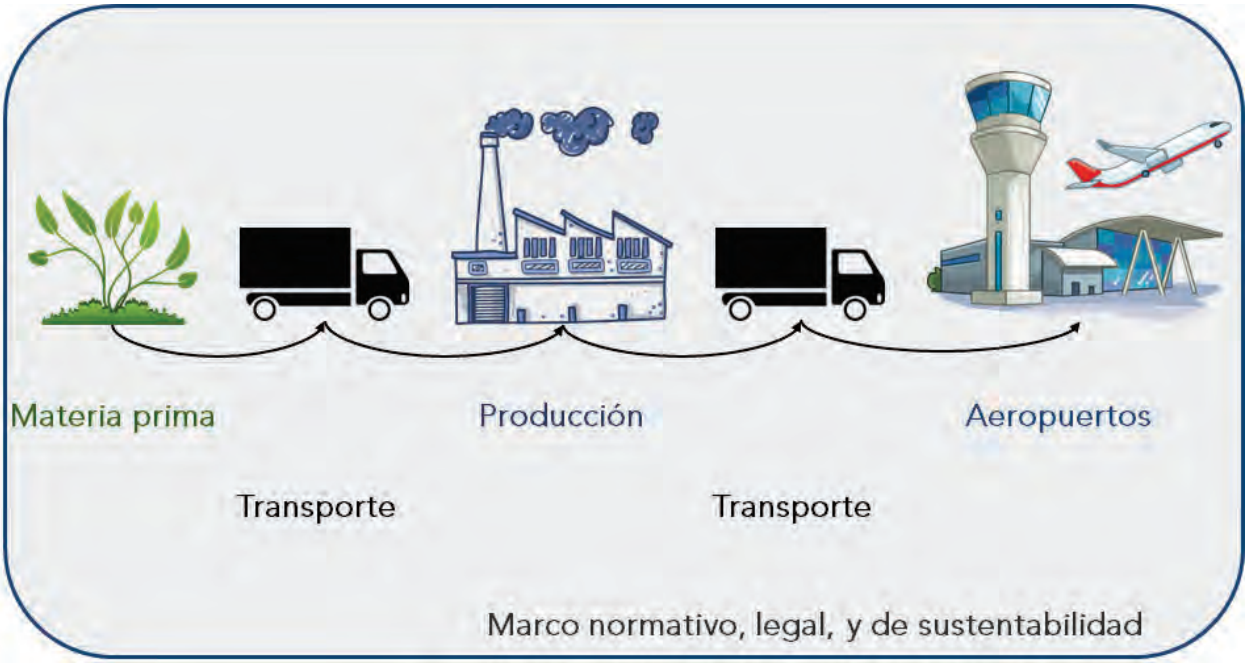


Figura 2. Cadena de valor para la producción de SAF en México. Elaboración propia con imágenes de Pixabay (2026).

En torno a las materias primas, los residuos son los materiales más promisorios en México. Esto se debe a que se generan en grandes cantidades, y muchos de ellos representan un problema de contaminación debido a los grandes volúmenes en los que son generados. Además, su uso permite aprovechar la "adicionalidad" de estos materiales; es decir, al usarlos y convertirlos en SAF se evitan emisiones debido a inadecuada disposición. Otra ventaja del uso de residuos es que no se compite por tierras ni agua como es el caso de las especies cultivables; de esta manera se garantiza que no hay competencia de manera directa ni indirecta con la producción de alimentos. Este aspecto es importante porque en México muchos de los alimentos que se consumen, como el maíz, se importan. Por otro lado, en el aspecto económico usualmente estas materias primas son consideradas de bajo costo. Los costos asociados a los residuos

incluyen la logística, y la recolección, así como aquellos derivados de su venta por parte de quien los genera. En este tópico debe considerarse que entre más grande la cadena de suministro mayor será la biomasa recolectada; no obstante, los impactos ambientales y económicos también lo serán. Por ello, la determinación de la escala de producción debe realizarse de manera conjunta con la cadena de suministro (Mariyam y col., 2026).

Respecto de las tecnologías de procesamiento, éstas deben ser certificadas y con madurez tecnológica (Martulli y col., 2025; Saeed y col., 2026); actualmente, la única tecnología con madurez tecnológica en nivel 9 es el hidrotratamiento. También es importante recordar que la materia prima seleccionada determina la ruta de procesamiento, y su escala de procesamiento está supeditada a la cadena de suministro integrada. Por ello, la cadena de recolección de los residuos juega un papel muy importante en México, dado que la principal vía de transporte es por carretera. Cabe añadir que para la producción de SAF muchas rutas emplean hidrógeno; éste usualmente se produce a partir del petróleo. No obstante, el hidrógeno también debe producirse mediante tecnologías renovables (Domínguez-García y col., 2017); en este sentido, la cadena de recolección también debe considerar las materias primas para la producción de hidrógeno.

La cadena de suministro es también un aspecto importante para garantizar el cumplimiento establecido en CORSIA (IATA, 2026c; RSB, 2026). Para que las emisiones reducidas debidas al uso de SAF puedan ser elegibles a acreditación, éstas deben ser 10% menores que aquellas correspondientes a la producción del combustible fósil. En este sentido, las emisiones derivadas de la recolección y/o generación de materia prima, su transporte, procesamiento y distribución a los aeropuertos deben considerarse.

Finalmente, el marco legal con el que se cuenta en México necesita ser complementado. A pesar de contar con leyes generales es necesario el desarrollo de reglamentos específicos, normas oficiales, así como un sistema de trazabilidad que permita garantizar la sustentabilidad del SAF producido. En este sentido, el Gobierno Federal ha enfocado los esfuerzos, al igual que organizaciones como la Iniciativa para los Combustibles Sostenibles de Aviación en

México, para impulsar el establecimiento de la cadena de valor de la producción de SAF.

Para superar estos retos es necesario contar con estudios y análisis en torno a los eslabones de la cadena de valor en el contexto mexicano. Así, se dispondrá de información para el establecimiento de una política gubernamental que detone el establecimiento de la cadena de valor de la producción de SAF.

5. Conclusiones

En el sector de la aviación, el combustible sustentable de aviación es la alternativa más promisoria para alcanzar la meta emisiones netas cero en el año 2050. Actualmente existe un marco normativo que incluye a los estándares técnicos y de sustentabilidad que este biocombustible tiene que cumplir. Además, en México se cuenta con un marco legal que debe complementarse para impulsar el establecimiento de la cadena de valor del SAF.

La producción de SAF en México es factible desde el punto de vista técnico, considerando principalmente materias primas residuales y procesos certificados ante la ASTM. Especial énfasis debe ponerse en la integración de la cadena de suministro, para garantizar el cumplimiento del estándar CORSIA. Para ello será necesario contar con una política de estado que coadyuve al establecimiento de la cadena.

El plan de vuelo está marcado, y se cuenta con muchos elementos para concretarlo. Por ello, es necesario despegar para seguir volando hacia el desarrollo sustentable.

Referencias bibliográficas

ASTM (2022). *ASTM D7566-21 - Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*. https://store.astm.org/d7566-21.html.

ASTM (2026a). *ASTM D1655-26b - Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*. https://store.astm.org/d1655-26b.html.

ASTM (2022). *ASTM D7655-22 - Standard Specification for Aviation Turbine Fuels Containing Synthesized Hydrocarbons*. https://store.astm.org/d7566-22.html.

Banxico (2026). *Portal del mercado cambiario.* https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tip&idioma=sp

Borrill, E.L., Yuan, R., y Koh, L.S.C. (2025). An Analytical Development of Supply-Chain Resilience for UK Waste-Based SAF Feedstocks with a Focus on Achieving a Circular Economy. *IFAC-PapersOnLine*, 59, 10, 649-654, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.111.

CAAFI (2026). *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative. Approved Fuels.* https://www.caafi.org/fuel-qualifications.

Carbon Direct (2026). *How SAF mandates in the EU and UK are reshaping aviation fuel markets*. https://www.carbon-direct.com/insights/how-saf-mandates-in-the-eu-and-uk-are-reshaping-aviation-fuel-markets

Chivanga Barros, A.A., Morais, P.G., Francisco, I., y Machado, V. (2026). Assessment of sustainable aviation fuel (SAF) production technologies: from technological maturity to implementation potential in Angola. *South African Journal of Chemical Engineering*, 58, 100959, https://doi.org/10.1016/j.sajce.2026.100959.

DOF (2008). *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos.* https://portalhcd.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf

DOF (2024). *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDRS.pdf

DOF (2025a). *Ley de Biocombustibles*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBio.pdf

DOF (2025b). *Programa Sectorial de Energía 2025-2030*. https://sidof.segob.gob.mx/notas/5776838

DOF (2026). *Ley General de Economía Circular.* https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5778439&fecha=19/01/2026#gsc.tab=0

Domínguez-García, S., Gutiérrez-Antonio, C., De Lira-Flores, J.A., Ponce-Ortega, J.M., y El-Halwagi, M.M. (2017). Strategic Planning for the Supply Chain of Aviation Biofuel with Consideration of Hydrogen Production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56, 46, 13812–13830. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02632.

Gutiérrez-Antonio, A., Gómez-Castro, F.I., de Lira-Flores, J.A., y Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 79, 709-729, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108.

Gutiérrez-Antonio, A., Romero-Izquierdo, A.G., Gómez-Castro, F.I., Hernández, S. (2021). *Production Processes of Renewable Aviation Fuel - Present Technologies and Future Trends*, Elsevier.

IATA (2026a). *Our commitment to fly net zero by 2050*. https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/.

IATA (2026b). *Net zero 2050: sustainable aviation fuels (SAF).* https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-sustainable-aviation-fuels/.

IATA (2026c). *Offseting CO2 emissions with CORSIA.* https://www.iata.org/en/programs/sustainability/corsia/.

ICAO (2015). *Biocombustibles Sustentables de Aviación en México.* https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Meetings/2015%20Seminars/NACC/15_Mexico_SustainableBiofuels.pdf

IEA (2025a). *Energy system – Transport*. https://www.iea.org/energy-system/transport.

IEA (2025b). *Energy efficiency – Transport*. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/transport.

IEA (2025c). *Energy system – Transport - Aviation*. https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation.

IMP (2016). *Reporte de Inteligencia Tecnológica – Bioturbosina*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324018/Inteligencia_Tecnologica_Bioturbosina_Final.pdf

Gobierno de México (2015). *Centro Mexicanos de Innovación en Energía*. https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia

Mariyam, S., Alherbawi, M., McKay, G., y Al-Ansari, T. (2026). Converting waste into Sustainable Aviation Fuel (SAF): A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, Part D, 116380, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116380.

Martulli, A., Brandt, K., Allroggen, F, y Malina, R. (2025). The potential scale-up of

sustainable aviation fuels production capacity to meet global and EU policy targets. *Nature Communications*, 16, 11619, https://doi.org/10.1038/s41467-025-66686-9.

Masum, F.H., Coppola, E., Field, J.L., Geller, D., George, S., Miller, J.L., Mulvaney, M.J., Nana, S., Seepaul, R., Small, I.M., Wright, D., y Dwivedi, P. (2023). Supply chain optimization of sustainable aviation fuel from carinata in the Southeastern United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 113032, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113032.

PEMEX (2026). *Estadísticas petroleras - Precio al público de productos petrolíferos*. https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/epublico_esp.pdf

Pires, R., Silva, T.P., Ribeiro, C., Costa, L., Matos, C.T., Costa, P., Lopes, T.F., Gírio, F., y Silva, C. (2024). Carbon footprint assessment of microalgal biomass production, hydrothermal liquefaction and refining to sustainable aviation fuel (SAF) in mainland Portugal. *Algal Research*, 84, 103799, https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103799.

Pixabay (2026). *Pixabay – banco de imágenes*. https://pixabay.com/es/

RSB (2026). *RSB CORSIA Certification*. https://rsb.org/certification/certification-schemes/rsb-corsia-certification/.

UNAM (2012). *El caso de los biocombustibles de aviación en México*. https://www.fis.unam.mx/coloquios/206/el-caso-de-los-biocombustibles-de-aviacion-en-mexico

Walter, A., Seabra, J.E.A., Moreira, M.M.R., Guarenghi, M.M., y Chiodi, L. (2026). Potential and prospects for the production of sustainable aviation fuels in Brazil. *Energy*, 344, 139796, https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139796.

WB (2025). *Transporte – Panorama general*. https://www.bancomundial.org/es/topic/transport/overview.

Xu, Y., Zhang, Y., Deng, X., Li, Y., Lee, S.-Y., y Jiang, H. (2026). Global value chain partnerships for sustainable aviation fuel: Implications for Australia–China. *Research in Transportation Business & Management*, 68, 101819, https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2026.101819.