



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: UNA HERRAMIENTA PARA CONTRIBUIR A LA PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE BIOCOMBUSTIBLES DE AVIACIÓN

Karen Katherine Cota Cárdenas, Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo, Sergio Iván Martínez-Guido, Claudia Gutiérrez Antonio

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Las Campanas, 76010, Querétaro, Querétaro, claudia.gutierrez@uaq.mx

Resumen

A nivel mundial, el sector de la aviación contribuye con el 3% de las emisiones de gases efecto invernadero. Por ello se han establecido estrategias para combatir su impacto al medio ambiente. El combustible sustentable de aviación (SAF por sus siglas en inglés) se perfila como la opción idónea para resolver esta problemática, debido a que se genera a partir de materias primas renovables; adicionalmente, las propiedades del SAF son las mismas, y en algunos casos mejores, que las de su contraparte fósil. Pese a su origen renovable, el SAF requiere del análisis de todos los impactos asociados con su producción, con el fin de asegurar su sustentabilidad. En este sentido, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida permite cuantificar el impacto ambiental y económico de este biocombustible considerando desde la producción de la materia prima hasta su uso en las aeronaves; de esta manera, la información generada en el análisis permite identificar las áreas de oportunidad para reducir el impacto ambiental asociado a su producción. Por ello, en este artículo se presentan conceptos básicos sobre el biocombustible de aviación y sus procesos de producción, así como la metodología del análisis del ciclo de vida y su aplicación a la producción de este biocombustible; con base en ello se discuten las perspectivas en torno a la reducción del impacto ambiental en la producción del biocombustible renovable de aviación.

Palabras claves: combustible renovable de aviación, bioturbosina, procesos de producción, análisis de ciclo de vida.



LIFE CYCLE ANALYSIS: A TOOL TO CONTRIBUTE TO THE SUSTAINABLE PRODUCTION OF AVIATION BIOFUELS

Abstract

Worldwide, aviation sector contributes with 3% of global greenhouse gas emissions. For this reason, strategies have been established to combat their impact on the environment. Sustainable aviation fuel (SAF) is emerging as the ideal option to solve this problem, because it is generated from renewable raw materials; in addition, the properties of SAF are the same, and in some cases better, than those of its fossil counterpart. Despite its renewable origin, the SAF requires the analysis of all the impacts associated with its production process, in order to ensure its sustainability. In this context, the Life Cycle Analysis methodology allows quantifying the environmental and economic impact of this biofuel considering from the production of the raw material to its use in aircraft; in this way, the information generated in the analysis allows identifying the areas of opportunity to reduce the environmental impact associated with its production. For this reason, this article presents basic concepts on aviation biofuel and its production processes, as well as the life cycle analysis methodology and its application to the production of this biofuel; based on this, the perspectives regarding the reduction of environmental impact associated to the production of renewable aviation biofuel are discussed.

Keywords: Renewable aviation fuel, biojet fuel, production processes, life cycle analysis



1. Introducción

Actualmente, el cambio climático y la contaminación son dos de las principales problemáticas que la sociedad enfrenta; por ello, en diversas actividades antropogénicas se han hecho esfuerzos para reducir su impacto negativo hacia el medio ambiente. Particularmente, el sector de la aviación ha sido uno de los pioneros en implementar estrategias para reducir su impacto en el medio ambiente; cabe mencionar que, en el 2019, este sector contribuyó con 915 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) liberadas a la atmósfera. En este contexto, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA por sus siglas en inglés) fijó la meta de reducir las emisiones de dicho sector en un 50 % para el año 2050, respecto de los niveles de emisiones del 2005. Para alcanzar dicho objetivo, y así lograr el crecimiento sustentable del sector de la aviación, se propuso una estrategia de cuatro pilares; esta estrategia incluye la innovación tecnológica en las aeronaves, la implementación de mejoras en la operación e infraestructura del sector de aviación, la compensación por emisiones de carbono, así como el desarrollo e implementación de combustibles

sustentables (IATA, 2021). Si bien todas las estrategias antes mencionadas aportan una mejora en el sector de aviación, el desarrollo e implementación del combustible sustentable se ha perfilado como la estrategia clave para lograr una reducción considerable de emisiones de CO₂. En este sentido, el combustible sustentable de aviación (Sustainable Aviation Fuel, SAF por sus siglas en inglés) es una alternativa energética producida a partir de materias primas de origen renovable (biomasa) (Sustainable Aviation, 2020).

Actualmente se han desarrollado siete procesos o rutas certificadas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) para transformar diferentes biomásas en SAF. Dependiendo del tipo de materia prima se elige el proceso de transformación (Gutiérrez-Antonio et al., 2017), como se muestra en la Figura 1. Es importante mencionar que la producción del SAF a partir de biomasa lo convierte en un biocombustible renovable, pero no necesariamente sustentable. Por ello, es necesario que todos los procesos de producción sean evaluados en términos del impacto generado en el medio ambiente a



lo largo de toda su cadena de valor; para tal fin, el análisis de ciclo de vida es una poderosa herramienta.

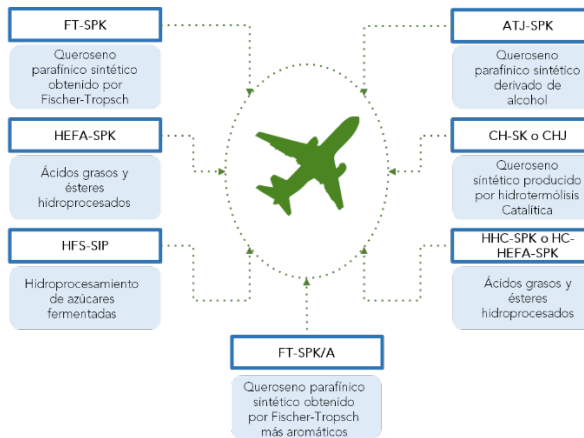


Figura 1. Rutas de producción de biocombustible de aviación certificadas por ASTM.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología certificada por la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) a través de la norma ISO 14040:2009; esta norma es utilizada en el desarrollo, implementación y monitoreo de procesos, permitiendo el análisis y la toma de decisiones estratégicas y objetivas en torno a un proceso sustentable (European Commission, 2010). De manera particular, el análisis de ciclo de vida permite evaluar el impacto ambiental asociado con la generación de un producto. Un aspecto destacado es que dicha

evaluación es cuantitativa, por lo cual permite identificar las etapas del proceso con mayor impacto ambiental. Posteriormente, es posible mejorar dichas etapas, y volver a evaluar las mejoras propuestas a los procesos de producción; de esta manera, los cambios pueden validarse y así tener la certeza de que dichos cambios efectivamente contribuyen a la sustentabilidad del proceso de producción. En este contexto, el ACV es una metodología atractiva para aplicarse al análisis de procesos de producción de biocombustible de aviación, en aras de alcanzar su sustentabilidad.

Por ello, este artículo presenta la aplicación de la metodología del ACV en los procesos de producción de combustible renovable de aviación, como una herramienta que contribuye a su generación sustentable. Para ello, se comenzará presentando la definición del biocombustible de aviación, y después sus procesos de producción. Posteriormente se describirá de forma breve la metodología de ACV, así como los resultados de su aplicación a los procesos de producción. Finalmente, se discutirán las perspectivas de aplicación del ACV aplicado a los



procesos de producción de biocombustible de aviación.

2. ¿Qué es el biocombustible de aviación?

El SAF está conformado por hidrocarburos renovables en el rango del carbono ocho al dieciséis, cuyas propiedades son idénticas, y en algunos casos superiores, respecto de aquellas de la turbosina de origen fósil (Gutiérrez-Antonio et al., 2017). El SAF, al obtenerse a partir de materias primas renovables, posibilita que su uso reduzca notablemente las emisiones de gases efecto invernadero; por lo que el SAF es la opción más promisoría, a mediano y largo plazo, para alcanzar los objetivos ambientales del sector de aviación.

Dentro de la gama de biomásas para la síntesis del biocombustible de aviación se incluyen cultivos no comestibles, desechos de animales y residuos de madera o plantas. Particularmente, dentro de las biomásas con mayor potencial se encuentran *Jatropha curcas*, Camelina, microalgas, así como residuos de la agroindustria. Específicamente, la *Jatropha curcas* es una planta no comestible con una vida promedio entre 40

y 50 años, cuyo rendimiento alcanza hasta 12 toneladas por hectárea cada año. Además, esta planta puede crecer en tierras marginales, es decir, no es competencia directa por tierras con los cultivos alimentarios. El fruto de la *Jatropha curcas* tiene semillas, las cuales contienen entre 35 y 40% de aceite; por ello, esta planta es considerada una fuente potencial para la producción de biocombustible de aviación. Por otro lado, la Camelina, al igual que la *Jatropha curcas*, es una planta que contiene hasta un 41% de aceite, y su potencial de producción es de hasta 2 toneladas por acre. Adicionalmente, la Camelina presenta alta adaptabilidad para crecer en climas fríos, y requiere poco mantenimiento para su cultivo.

Las microalgas son organismos acuáticos con alto contenido de lípidos. A diferencia de las dos especies anteriores, éstas no requieren gran extensión de tierra ni que ésta sea fértil, ya que pueden crecer en contenedores de gran capacidad con versátiles diseños, e incluso en agua salada. La producción de las microalgas contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que utilizan como materia prima para su crecimiento CO₂ y luz solar. Finalmente,



los residuos forestales, industriales, agrícolas y de animales son también utilizados como biomasa para producir el combustible renovable de aviación. Dichos recursos tienen la ventaja de ser accesibles y de bajo costo, y la mayoría están conformados por material lignocelulósico.

Todas las biomásas anteriormente descritas pueden transformarse en SAF mediante diferentes procesos. El proceso de conversión depende directamente del tipo biomasa y sus propiedades físicoquímicas, lo cual será discutido en la siguiente sección.

3. ¿Cómo se producen los biocombustibles de aviación?

Sin importar la biomasa a partir de la cual son producidos, e incluso el proceso de producción, todos los biocombustibles para aviación son sometidos a estudios para evaluar su desempeño, operatividad, seguridad y compatibilidad con la infraestructura de la aeronave. Si los biocombustibles pasan estas pruebas entonces pueden emplearse sin inconvenientes, denominándose así combustibles *drop-in*. El conjunto de

pruebas así como los requerimientos del biocombustible de aviación son establecidos en el estándar ASTM D7566 (Holladay et al., 2020). Para que el biocombustible de aviación sea aceptado por las autoridades correspondientes, éste debe ser certificado por la ASTM. Hasta el año 2021, la ASTM había certificado 7 rutas de procesamiento, las cuales se muestran en la Figura 2. Si bien todas las rutas mostradas en la Figura 2 se encuentran acreditadas por la ASTM, esto no implica que existan plantas industriales de todas estas tecnologías. Por ejemplo, de la ruta CH-SK sólo se tienen plantas de demostración, a diferencia de la HEFA que cuenta con plantas a nivel comercial y cuyo combustible es utilizado por aerolíneas a nivel mundial.

Como se mencionó anteriormente, no es suficiente que el biocombustible provenga de una fuente renovable, sino que resulta necesario demostrar con datos certeros que su procesamiento no genere un impacto negativo al medio ambiente. Es por ello que el análisis del ciclo de vida es una herramienta que permite cumplir con este análisis, de modo que se garantice la sustentabilidad del biocombustible. En la



siguiente sección se presenta la ruta metodológica del análisis de ciclo de vida.



Figura 2. Rutas de procesamiento certificadas de biocombustible de aviación. Adaptado de Instituto Mexicano del Petróleo (2016); Holladay et al. (2020).

4. Análisis de ciclo de vida

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) proporciona las herramientas adecuadas para analizar y evaluar el impacto ambiental que pueda generar un producto, proceso o sistema. En la norma ISO 14040:2009 se especifica que la metodología ACV está compuesta de 4 etapas: a) la definición del objetivo y alcance, b) el inventario del análisis de ciclo de vida, c) la evaluación del impacto

ambiental, y d) la interpretación de resultados.

a) Definición del objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida.

La primera etapa indica la definición de los límites del análisis, para así realizar un estudio correcto y profundo del sistema; el objetivo principal es evitar integrar actividades que no agreguen valor al ACV particular de cada caso. Asimismo, se debe tener pleno conocimiento del objetivo de este análisis, a modo de obtener la información apropiada al finalizar el estudio. Para realizar dicha evaluación se pueden considerar diferentes límites del sistema, de acuerdo con lo que se presenta a continuación:

- De la cuna a la tumba, la cual toma en cuenta la huella ambiental empezando por la extracción de la materia prima, transportación, procesamiento de los materiales, manufactura, distribución, uso y disposición final.
- De la cuna a la puerta, la cual abarca el proceso de extracción de la materia prima hasta la manufactura para evaluar su impacto ambiental; en este caso no



se toman en cuenta el uso y disposición del producto.

- De la puerta a la puerta, la cual se refiere al análisis para sólo una parte del proceso de producción.
- Del pozo a la rueda (well to wheels, WtW, por sus siglas en inglés), la cual considera las mismas etapas del análisis de la cuna a la tumba, y además incluye las emisiones derivadas del uso de los medios de transporte.

La Figura 3 muestra los límites de las diferentes estrategias antes mencionadas para evaluar el impacto ambiental de acuerdo con el ACV. De la Figura 3 se observa que se puede analizar el impacto ambiental considerando solamente el proceso de producción, o la generación de la materia prima y su conversión, o bien todo el ciclo de vida.

De igual manera, se debe establecer si el impacto ambiental sólo considera gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, o también se incluyen gases contaminantes, como los óxidos de nitrógeno y azufre. Por supuesto, lo anterior aplicará solamente a los límites

identificados como de interés para el estudio.



Figura 3. Estrategias de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida.

b) Inventario del análisis de ciclo de vida.

En la segunda etapa se realiza un inventario sistemático de todas las entradas y salidas considerando los límites establecidos en la primera etapa; por ejemplo, uso de agua, emisiones generadas, cantidad de materia prima utilizada, residuos generados, por mencionar algunos. Se han desarrollado herramientas que facilitan la cuantificación de los inventarios, tales como SimaPro, ecoinvent, o GREET. Este último software permite simular completamente los impactos energéticos y emisiones de los vehículos y sus combustibles. El GREET fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés).



c) Evaluación del impacto ambiental.

Una vez establecido el alcance y reunida la información correspondiente al sistema se procede a calcular el impacto ambiental. En esta etapa se evalúan los posibles efectos ambientales que el sistema pudiera tener incluyendo el impacto humano, ecológico y económico; estas variables dependen del indicador utilizado, en función de las categorías de impacto. Las categorías generales de impacto son salud humana, entorno natural y recursos renovables. La primera se refiere a la identificación del impacto negativo para la salud humana, el segundo a la afectación del proceso sobre el entorno donde está ubicado, y el tercero se enfoca al uso de recursos renovables y no renovables.

En esta etapa, si el proceso ya existe, la evaluación de su impacto ambiental se puede considerar como una línea base de referencia. Con base en ella se pueden evaluar modificaciones al proceso de producción, materias primas usadas, o bien la cadena de suministro. De esta manera, se pueden comparar las alternativas con respecto a la línea base; esta información facilita la toma de decisiones en torno a modificaciones en proceso existentes.

d) Interpretación de resultados.

La última etapa del ACV es la interpretación de resultados. Aquí se evalúan los datos obtenidos de las etapas anteriores para identificar y analizar puntos críticos del sistema, para después obtener conclusiones y proporcionar recomendaciones u oportunidades de mejora.

De manera general, una vez seleccionado el producto o proceso de estudio se lleva a cabo la metodología antes descrita. Se delimita el alcance del análisis de ciclo de vida, así como el objetivo que se persigue. Posteriormente se cuantifica el impacto ambiental, y los resultados se evalúan. Esto posibilita llevar a cabo propuestas que permitan reducir el impacto ambiental asociado al proceso o producto en cuestión.

La metodología anteriormente descrita puede ser empleada para el análisis de cualquier proceso de producción, así como su cadena completa de suministro; es decir, no se limita únicamente a los procesos de conversión de biomasa, sino a todos los procesos existentes. De allí que al proponer una mejora al proceso o a su cadena de suministro, el ACV permite cuantificar el impacto de forma



cuantitativa de dichos cambios, previamente a su implementación. De manera particular, el ACV aplicado a los procesos de producción de SAF es de gran relevancia, debido a que permite cuantificar si efectivamente se está logrando una disminución del impacto ambiental por el uso de dicho biocombustible. Este tópico se describe en la siguiente sección.

5. Análisis de ciclo de vida para los procesos de producción de biocombustible de aviación

La Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO por sus siglas en inglés) desarrolló un esquema para combatir el cambio climático. Este esquema se conoce como Sistema de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional, el cual es conocido comúnmente como CORSIA, por sus siglas en inglés. CORSIA es un mecanismo internacional dedicado a reducir las emisiones de gases efecto invernadero causados por la aviación (RSB, 2020). En este contexto, todo biocombustible de aviación debe cumplir con los requisitos de CORSIA, el cual

indica en su Anexo 16 “Protección del medio ambiente” que el SAF debe demostrar, a través de su ACV, una reducción de CO₂ de por lo menos un 10 % comparado con el ACV del combustible de aviación estándar (ICAO, 2021).

Debido a lo anterior, se han realizado distintos análisis de ciclo de vida enfocados a los procesos de producción de biocombustible de aviación, cada uno de ellos con diferentes aplicaciones y perspectivas. Han (2013) presentó un ACV enfocado en el biocombustible de aviación proveniente de aceite de semillas y maíz a través de los procesos de Hidrotratamiento y Fischer-Tropsch. Para esto se realizó un análisis de la Cuna a la Tumba, el cual toma en cuenta toda la energía y emisiones emitidas durante todo el proceso de producción del biocombustible, incluyendo el cultivo y la transportación de la materia prima hasta su consumo en la aeronave. De acuerdo con este estudio, el SAF derivado del Hidrotratamiento presenta una reducción de gases de efecto invernadero del 41 %-63 %, mientras que el combustible obtenido por Fischer-Tropsch de 89 %, con respecto a su contraparte fósil.



Meyer (2012) realizó un ACV para comparar las emisiones de gases de CO₂ con la turbosina de origen fósil utilizando sólo la *Jatropha curcas* como biomasa y el proceso HEFA. Para este análisis se asumió que todos los tallos podados, ramas y otros residuos vegetales se quedaron en el campo, y se delimitó el estudio de la cuna a la tumba. Se destaca la reducción de gases del 33 % en todo su proceso productivo, siendo el impacto principal el asociado con las etapas de producción y conversión de esta materia prima en biocombustible. Otro estudio fue realizado por la Comisión Europea Bio4a (2019) para el análisis del SAF producido a partir de Camelina con el proceso HEFA como ruta de procesamiento. Este estudio cubrió desde el cultivo hasta la etapa final como combustible, determinando que este biocombustible provee un ahorro de entre 73 % - 83 % de emisiones de gases efecto invernadero.

Por otra parte, la Tabla 1 concentra el impacto ambiental asociado con las diferentes rutas de procesamiento del SAF, de acuerdo con Wei et al (2019).

De la Tabla 1 puede observarse que el proceso alcohol a jet presenta la eficiencia

energética más alta de todos los procesos. Sin embargo, es importante observar que, en el proceso de alcohol a jet, la eficiencia reportada considera únicamente la conversión del alcohol; es decir, la eficiencia asociada a la conversión de la biomasa en alcohol no se considera. Por lo que, si se considera la eficiencia energética desde la biomasa, el proceso de hidrotratamiento es el que presenta mayor eficiencia energética.

Esto a su vez se ve reflejado en las bajas emisiones de gases de efecto invernadero; la variabilidad en las emisiones depende de las condiciones de operación requeridas para la conversión de la materia prima, siendo en el caso del hidrotratamiento el menor valor para el aceite de camelina, y el valor mayor para el aceite de microalgas. Como referencia, las emisiones asociadas a la producción de combustible de aviación de origen fósil son 90 gCO₂ equivalente / MJ.

La cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción de SAF es de vital importancia, debido a que las aerolíneas deben acreditar dichas reducciones para cumplir con las metas establecidas. En caso de que el uso



del biocombustible no posibilite cumplir con dichas metas, entonces se deben adquirir certificados para la compensación de emisiones. De allí, que aquellos biocombustibles que sean obtenidos con menor impacto ambiental tendrán más posibilidades de implementarse a nivel industrial.

Tabla 1. Eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes rutas de producción de combustible renovable de aviación.

Ruta de procesamiento	Eficiencia energética	Emisiones de gases de efecto invernadero (gCO₂ equivalente / MJ)
Hidrotratamiento	0.71-0.77	3.06 – 40
Hidrotermólisis catalítica	0.58-0.89	21.20 – 39.30
Síntesis de Fischer-Tropsch	0.40-0.53	-1.60 – 18.20
Azúcares a hidrocarburos	0.50	22.0 – 80.0
Alcohol a jet	0.91	-27.0 – 117.50

6. Perspectivas

El sector de la aviación ha intensificado esfuerzos para disminuir su huella ambiental, y así alcanzar la meta fijada por la IATA para reducir las emisiones de CO₂ al 50 % para el 2050 (IATA, 2021). Para lograr este objetivo se han propuesto estrategias claves, dentro de las cuales el combustible sustentable de aviación, SAF, se perfila como la opción más promisoría tanto a mediano como largo plazo. El SAF es el biocombustible de aviación que se obtiene de distintas materias primas, que incluyen plantas no comestibles, y residuos de diversa índole. Estas biomásas cuentan con características específicas, las cuales definen los procesos de conversión necesarios para producir el biocombustible. Actualmente, se cuenta con 7 rutas de procesamiento certificadas por ASTM para la producción de SAF:

- Queroseno parafínico sintético obtenido por Fischer-Tropsch (FT-SPK)
- Ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HEFA-SPK)
- Hidroprocesamiento de azúcares fermentadas (HFS-SIP)



- Queroseno parafínico sintético obtenido por Fischer-Tropsch más aromáticos (FT-SPK/A)
- Queroseno parafínico sintético derivado de alcohol (ATJ-SPK)
- Queroseno sintético producido por hidrotermólisis catalítica (CH-SK o CHJ)
- Ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HHC-SPK o HC-HEFA-SPK)

Si bien estos procesos permiten producir SAF que cumple con las especificaciones técnicas, también es necesario evaluar sus impactos ambientales.

En este sentido, la metodología de análisis de ciclo de vida proporciona las herramientas para evaluar de principio a fin a estos procesos y determinar en específico su impacto al medio ambiente. De acuerdo con la literatura, para algunas rutas de procesamiento del biocombustible de aviación se ha aplicado esta metodología, observándose reducciones en las emisiones de CO₂; en la mayoría de los procesos destaca el impacto ambiental asociado al cultivo de la materia prima. En torno a este reto, se propone enfocar los esfuerzos en el uso de materias primas

residuales; estas materias primas usualmente representan un problema de contaminación debido a su inadecuada disposición, lenta degradación y altos volúmenes. Esto origina contaminación en suelos, agua y/o aire, así como afectaciones a la salud de la población. Por lo que la revalorización de residuos para la producción de SAF permite resolver el problema de contaminación asociado a las mismas, al mismo tiempo que se genera un biocombustible. El uso de este tipo de biomasa contribuirá a disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de SAF, de acuerdo con los hallazgos realizados por estudios previos.

Otro reto que se identifica es el impacto ambiental asociado con la producción del combustible renovable de aviación. En este tenor, se deben enfocar los esfuerzos en el desarrollo de procesos de producción de mínimo consumo de energía y máximo rendimiento; es decir, procesos que utilicen de manera eficiente tanto los recursos materiales como energéticos. Este tipo de procesos tendrán una mayor viabilidad financiera, así como un reducido impacto ambiental. Para tal fin, se sugiere hacer uso de tecnologías intensificadas, las cuales son de reducido



tamaño y alta eficiencias; esto permitirá reducir el impacto ambiental no sólo asociado a la operación del proceso, sino también a la huella ambiental asociada con la producción de dichas tecnologías. De igual manera, la implementación de estrategias de integración energética permite utilizar de manera óptima los recursos energéticos ya disponibles en el proceso. De acuerdo con estudios previos, se ha demostrado que mediante la aplicación de esta estrategia se logra reducir hasta en un 80% las emisiones de dióxido de carbono en los procesos de producción (Gutiérrez-Antonio et al, 2017).

El último reto que se identifica es el asociado al impacto ambiental de la cadena de suministro; en ésta se incluye la generación de las materias primas, su procesamiento, así como su distribución hacia los puntos de consumo. En las cadenas de suministro, el principal impacto es el asociado al transporte tanto de insumos como de productos; por ello, es necesario que las cadenas de suministro sean lo más compactas posibles, es decir, sean regionales o locales. De allí que no es suficiente con procesar de forma eficiente una materia prima, sino que también la

distribución tanto de los insumos requeridos como de los productos obtenidos debe serlo.

Por lo que, la aplicación del análisis de ciclo de vida en la generación de insumos, su procesamiento, y distribución a los puntos de consumo permitirá cuantificar los impactos ambientales asociados. Esto posibilitará identificar las etapas de mayor impacto ambiental, con lo cual se podrán proponer estrategias que puedan contribuir a dicha reducción.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el concepto de biocombustible de aviación, sus principales materias primas y las rutas certificadas para su procesamiento. Además, se presentó la metodología ACV y su aplicación a las rutas de procesamiento de biocombustible. El SAF constituye la alternativa más promisoría del sector de aviación para combatir su huella climática. Este biocombustible es obtenido mediante diversas materias primas de origen renovable, tales como *Jatropha curcas*, camelina y algas. Las materias primas son convertidas mediante rutas de producción certificadas por



ASTM, cumpliendo así con la normatividad para ser considerado un biocombustible *drop-in*; es decir, con las mismas propiedades fisicoquímicas que su contraparte fósil. No obstante, el análisis de las rutas de producción del SAF mediante la metodología de ACV es necesaria, de modo que pueda evaluarse su impacto ambiental. El uso del SAF contribuye a una clara disminución de emisiones de CO₂; sin embargo, deben enfocarse los esfuerzos en el uso de materias primas residuales, procesos de producción que empleen de manera eficiente los recursos materiales y energéticos, así como cadenas de suministro de bajo impacto ambiental. Esto posibilitará construir una sólida base para impulsar el desarrollo sostenible del sector de la aviación.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero proporcionado por CONACYT mediante la beca de manutención para la realización de los estudios de posgrado de Karen Katherine Cota Cárdenas, así como de la estancia postdoctoral de Araceli Guadalupe Romero Izquierdo. También se

agradece el apoyo financiero proporcionado por CONACYT mediante el proyecto 320583.

Referencias

- Bio4A. (2019). Advanced Sustainable BIOfuels for Aviation. Recuperado el 2 de junio de 2022, de <https://www.bio4a.eu/>.
- European Commission. (2010). ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Background Document - First Edition. Publications Office of the European Union, 115.
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., de Lira-Flores, J. A., & Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 709–729.
- Han, J., Elgowainy, A., Cai, H., & Wang, M. Q. (2013). Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. *Bioresource Technology*, 150, 447–456.
- Holladay, J., Zia, A., & Heyne Joshua.



- (2020). Review of Technical Pathways. U.S Department of Energy.
- IATA. (2021). Climate Change & CORSIA Fact Sheet. Recuperado el 2 de junio de 2022, de <https://www.iata.org/contentassets/713a82c7fbf84947ad536df18d08ed86/fact-sheet-climate-change.pdf>.
- ISO (2006). ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Recuperado el 2 de junio de 2022, de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14004:ed-3:v1:es>.
- ICAO. (2021). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*. Recuperado el 2 de junio de 2022, de <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202021.pdf>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2016). *Reporte de Inteligencia Tecnológica BIOTURBOSINA*. Recuperado el 2 de junio de 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324018/Inteligencia_Tecnologica_Bioturbosina_Final.pdf
- Meyer, K., Weinberg, J., & Kaltschmitt, M. (2012). GHG emissions from jatropha-based bioderived synthetic paraffinic kerosene. *Biofuels*, 3(6), 657–674.
- RSB. (2020). *Decarbonising Aviation : THE SUSTAINABLE WAY FORWARD A Just Transition to a Net Positive World*. Recuperado el 2 de junio de 2022, de https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Aviation-Report-WEB_Final.pdf.
- Sustainable Aviation. (2020). *Sustainable Aviation Fuels Road-Map*. Recuperado el 2 de junio de 2022, de https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_FuelReport_20200231.pdf
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: a review. *Fuel*, 254, 115599.