

# ESTUDIOS DE ACV DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN AVIACIÓN: CASO DEL BIOQUEROSENO OBTENIDO POR HIDROTRATAMIENTO DE ACEITE VEGETAL DE CAMELINA

Daniel Garraín

Israel Herrera

Carmen Lago

Yolanda Lechón

Rosa Sáez

*CIEMAT – Dpto. Energía – Ud. Análisis de Sistemas Energéticos, Madrid (España)*

## Abstract

Current environmental, economic and policy concerns regarding the sustainability of the energy sources used in aviation, a question arises: which are the alternatives for this sector? The answer is simple: it is necessary to focus efforts on alternative renewable sources. This paper presents a comprehensive review of studies of Life Cycle Assessments (LCA) of alternative fuels for aviation in terms of emissions of greenhouse gases (GHG). Impacts from bio-kerosene from hydrotreatment (HRJ, Hydrotreated Renewable Jet) of camelina vegetable oil are highlighted, because of the possibility of future implementation and production in Spain.

**Keywords:** *LCA; GHG; camelina; hydrotreating; HRJ*

## Resumen

A la luz de las actuales preocupaciones ambientales, económicas y políticas referentes a la sostenibilidad de las fuentes energéticas utilizadas en la aviación, surge la pregunta: ¿cuáles son las alternativas del sector? La respuesta a esta pregunta es sencilla: es necesario dirigir los esfuerzos a alternativas de origen renovable. En este trabajo se presenta un exhaustivo examen de los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de combustibles alternativos para la aviación en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se reflejan especialmente los impactos producidos por el bioqueroseno hidrotreatado (HRJ, Hydrotreated Renewable Jet) a partir de aceite vegetal de camelina, dada la posibilidad de futura implantación y producción en España.

**Palabras clave:** *ACV; GEI; camelina; hidrotreatamiento; HRJ*

## 1. Introducción: Combustibles para aviación

### 1.1 Combustibles fósiles y biocombustibles

A la luz de las actuales preocupaciones ambientales, económicas y políticas referentes a la sostenibilidad de las fuentes energéticas utilizadas en la aviación, surge la pregunta: ¿cuáles son las alternativas del sector? Entre estas preocupaciones aparece, el impacto medioambiental de los combustibles fósiles, referido este a la calidad del aire y al cambio

climático. La respuesta a esta pregunta es sencilla: es necesario dirigir los esfuerzos a alternativas de origen renovable (Novelli, 2008).

El combustible fósil utilizado en la actualidad para aviación tanto civil como militar es el queroseno, una fracción ligera obtenida de la destilación del petróleo en refinería. En el caso de la aviación civil el más utilizado es el denominado Jet A1 y en el caso de la aviación militar, el JP-8. Otras fuentes fósiles también utilizadas, aunque en menor medida, son las arenas bituminosas, las pizarras bituminosas y el gas natural condensado.

Los biocombustibles podrían suministrar entre 35 y el 100 % de la demanda global de combustible para aviación en 2050, teniendo en cuenta su alto potencial en ahorros de gases de efecto invernadero (GEI), siempre y cuando los riesgos relacionados con el cambio del uso del suelo, sean manejados eficazmente (Bauen et al., 2009). Bajo el nombre de biocombustibles se engloban todos aquellos combustibles líquidos o biocarburantes que proceden de materiales biológicos no fosilizados, fundamentalmente plantas (OBSA, 2010). El proceso de transformación puede ser bioquímico (mediante microorganismos y enzimas), químico o termoquímico.

A partir del aceite vegetal se suele obtener un combustible de alto contenido energético. El procedimiento se ha ido mejorando para que el combustible resulte estable ante las situaciones extremas de presión y temperatura de los vuelos. Según los avances tecnológicos en su desarrollo, habitualmente se distingue entre de biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. Los aceites vegetales pueden obtenerse a partir de ([www.obsa.org](http://www.obsa.org)):

- Cultivos de primera generación: soja, colza, coco y palma aceitera, son utilizados en la industria convencional para producir aceites para consumo humano y cosmética.
- Cultivos de segunda generación: jatropha, camelina y halofitas, que no compiten con los cultivos alimentarios tradicionales ni por el suelo ni por el agua y tienen elevadas productividades de aceites.
- Cultivos de tercera generación: microalgas. Con el uso de superficie más limitado, no requiere suelo, ya que puede cultivarse en biorreactores o directamente en el mar, por lo que su competencia por los recursos es la menor por cantidad de combustible producida.

Los grandes grupos de estos combustibles son (OBSA, 2010):

- BTL (*Biomass To Liquid*) sintetizado mediante el proceso Fischer-Tropsch (F-T) a partir de biomasa. Puede utilizarse cualquier biomasa, sólida o líquida, lo que permite utilizar residuos forestales o urbanos.
- Bioqueroseno (HRJ): combustible obtenido por hidrotratamiento a partir de aceites vegetales con las mismas características que el queroseno fósil (Jet A y Jet A1).
- Bioetanol: a partir de la fermentación de biomasa procedentes de cultivos ricos en azúcares (caña de azúcar, maíz...) o de desechos vegetales ligno-celulósicos (subproductos de cultivo o cultivos específicos como switchgrass). En el primer caso se consideran competidores con los alimentos, menos en el segundo caso, dependiendo del tipo de material. Por sus características de densidad energética el bioetanol no es muy adecuado en general como combustible de aviación. Actualmente se está estudiando una vía de transformación directa de azúcares, denominada “*sugars to hydrocarbons*”, que permite obtener combustibles más similares al queroseno.

Otra posibilidad es el uso de hidrógeno líquido o criogenizado, el cual puede obtenerse a partir de la hidrólisis de agua pura mediante energía eléctrica (OBSA, 2010). También el metano está siendo investigado como combustibles alternativos. No obstante, por su estabilidad físico-química y densidades energéticas, entre otras cuestiones técnicas, no

pueden utilizarse sin modificaciones significativas en las aeronaves, por lo que uso sólo se plantea a muy largo plazo ([www.obsa.org](http://www.obsa.org)).

A partir de biomasa lignocelulósica, generalmente desechos de cultivos como por ejemplo paja, es posible obtener, mediante pirolisis rápida, aceites que una vez hidrogenados pueden transformarse en queroseno (HPO, *Hydrotreated Pyrolysis Oil*). Esta alternativa está muy cerca de alcanzar el nivel de demostración. Su principal ventaja es que este bioqueroseno contiene una cierta cantidad de compuestos aromáticos que son necesarios para el garantizar un buen funcionamiento de los materiales de los motores, y que en el caso de aceites hidrogenados y F-T se solventa con la mezcla con combustibles convencionales ([www.obsa.org](http://www.obsa.org)).

Además, existe la posibilidad, aunque a menor escala, de utilizar propulsión eléctrica como alternativa a los combustibles líquidos. En concreto se está trabajando en el uso de: i) baterías o pilas de hidrógeno, que obtienen la energía eléctrica mediante reacciones químicas. Actualmente se están estudiando procesos de catálisis a partir de enzimas de bacterias para mejorar su rendimiento, y ii) energía solar fotovoltaica a partir de superficies de células fotovoltaicas de silicio. Actualmente, el estudio de estas alternativas, dada su reducida aplicabilidad en el corto y medio plazo, se orienta a permitir su uso por las unidades auxiliares de energía (APU) de las aeronaves, fundamentalmente en los consumos eléctricos (OBSA, 2010).

## 1.2 Querosenos alternativos para aviación

En la actualidad se están estudiando diversos procedimientos para la producción de querosenos alternativos en la aviación. El queroseno parafínico sintético (también conocido por las siglas **SPK**, *Synthetic Paraffinic Kerosene*) es un tipo de combustible alternativo para aviación que se puede producir de dos formas diferentes: mediante síntesis por F-T o mediante la hidrogenación de aceite vegetal (formando el bioqueroseno, Bio-SPK o **HRJ**, *Hydrotreated Renewable Jet*) (Brown et al., 2010):

- En el estudio del caso de obtención de SPK vía síntesis F-T, cabe destacar que este proceso químico tiene lugar a partir de gas de síntesis, formado por monóxido de carbono e hidrógeno. El producto obtenido a la salida del reactor consiste en una mezcla de hidrocarburos con una distribución muy amplia de pesos moleculares, que van desde los gases hasta las ceras pasando por gasolinas, querosenos o gasóleos. La naturaleza y proporción de los productos depende del tipo de reactor y de catalizador. En general, los procesos que operan a alta temperatura producen una mayoría de gasolinas olefínicas mientras que los de baja temperatura dan sobre todo gasóleos parafínicos.

Siempre es necesaria una etapa posterior de hidrotratamiento para que los productos alcancen la calidad exigida por el mercado. Los productos obtenidos mediante este proceso, tienen las ventajas de apenas contener azufre y tener un alto índice de cetano, gracias a su bajo contenido en aromáticos. Por ello, es un combustible con fácil salida al mercado. Sin embargo, pueden obtenerse de forma más sencilla y barata mediante el refinado de petróleo. Las plantas F-T son caras de construir y presentan toda una serie de problemas medioambientales. Su uso se justifica sólo si el petróleo es particularmente caro o escaso y se dispone de una fuente alternativa de combustibles barata o cercana, por ejemplo: carbón, gas natural, desechos vegetales o residuos pesados de refinerías. La producción de combustibles a partir de carbón vía el proceso F-T sería positiva desde el punto de vista de la independencia energética para los países que disponen de carbón y no de petróleo, pero sería negativa en cuanto al impacto sobre el cambio climático. Sólo si se utiliza biomasa como materia prima puede el proceso FT alcanzar un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero comparables o incluso inferiores a las del petróleo.

- Respecto a querosenos parafínicos sintéticos bioderivados (Bio-SPK), el estudio más destacable es el de Kinder & Rahmes (2009), que documentan un trabajo llevado a cabo por un consorcio de empresas de los sectores de la aviación y de la fabricación de aeronaves, motores y componentes, en el que se destaca, el procedimiento de elaboración del biocombustible y las pruebas de vuelo realizadas para el examen de su comportamiento de cara a su certificación para el uso en la aviación comercial. El procedimiento consta de las siguientes fases: i) El aceite se limpia para eliminar impurezas utilizando procedimientos de limpieza de aceite estándar; ii) El aceite se convierte en parafina de cadena corta, mediante un proceso en el que se eliminan las moléculas de oxígeno del aceite convirtiendo, por reacción con hidrógeno, todas las olefinas en parafinas de cadena corta con un número de carbonos en el rango de un diésel, de tal manera que, al eliminar los átomos de oxígeno, el poder calorífico del combustible obtenido aumenta y, al eliminar las olefinas, aumenta la estabilidad térmica del combustible y su estabilidad a la oxidación, iii) Se isomerizan y craquean las parafinas, convirtiéndose en parafinas con un número de carbonos en el rango del queroseno, y iv) El producto obtenido es un combustible denominado Bio-SPK que contiene el tipo de partículas propio de un queroseno convencional procedente del petróleo.

Finalmente, se probaron diversas composiciones del bioqueroseno obtenido mediante este procedimiento, mezcladas al 50% con Jet A1, en vuelos de aeronaves de varias compañías aéreas distintas. Esta ejecución permitió constatar el cumplimiento de las diversas normas de la ASTM correspondientes a las propiedades del queroseno de aviación comercial.

No obstante, también es factible la obtención de estos querosenos a partir de transesterificación de aceite vegetal, como se demuestra en el estudio de Rodríguez de la Rubia (2010), partiendo del coco como materia prima.

## **2. Camelina para la producción de biocombustibles**

De forma general, se puede afirmar que la camelina no compite con los cultivos alimentarios, considerándose el biocombustible producido de segunda generación. No obstante puede poseer algunas propiedades alimenticias. Sus semillas poseen un elevado contenido en aceite. Además, se ha demostrado la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y, en el caso de obtención de bioqueroseno, ya se ha ensayado con éxito en vuelos de pruebas de varias compañías aéreas comerciales. Su cultivo es tolerante a sequías y requiere un menor consumo de fertilizantes y herbicidas. También disminuye los costes de producción con respecto a otras oleaginosas y se trata de un excelente cultivo de rotación con el trigo y de crecimiento en tierras marginales.

En la antigüedad, el aceite de camelina se ha utilizado como combustible para lámparas, entre otros usos de función energética. Debido al alto contenido de aceite en las semillas y a las condiciones para el fomento de la agricultura sostenible descritas anteriormente, aumenta el potencial de esta planta como una nueva fuente de biocombustible. Ya que se había demostrado que, en algunos climas, la camelina tiene menores costes de producción que otras semillas oleaginosas como la colza, en el estudio de Fröhlich & Rice (2005), se evaluó la calidad del aceite como materia prima para la fabricación de un biodiésel mediante esterificación del mismo. La evaluación incluyó la evaluación de la calidad de los ésteres producidos en laboratorio y en planta piloto, un examen de los métodos de mejora de ésteres a baja temperatura y diversas pruebas en vehículos. Los resultados obtenidos indican que el éster metílico producido a partir de aceite de camelina tiene propiedades similares al de colza, con la excepción del índice de yodo, que es superior, problema que se podría solventar con su uso mezclado con otros ésteres o con diésel directamente.

### 3. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de bioquerosenos: HRJ de camelina

Para considerar los beneficios en ahorros de GEI, al reemplazar combustibles fósiles con biocombustibles, es necesario considerar las emisiones del todo la cadena de producción y uso del combustible, a través del ACV. La figura 1 muestra un diagrama de las fases más generales tenidas en consideración a la hora de realizar un ACV del bioqueroseno como biocombustible alternativo al queroseno para la aviación.

Figura 1: Esquema del ciclo de vida del bioqueroseno ([www.obsa.org](http://www.obsa.org))



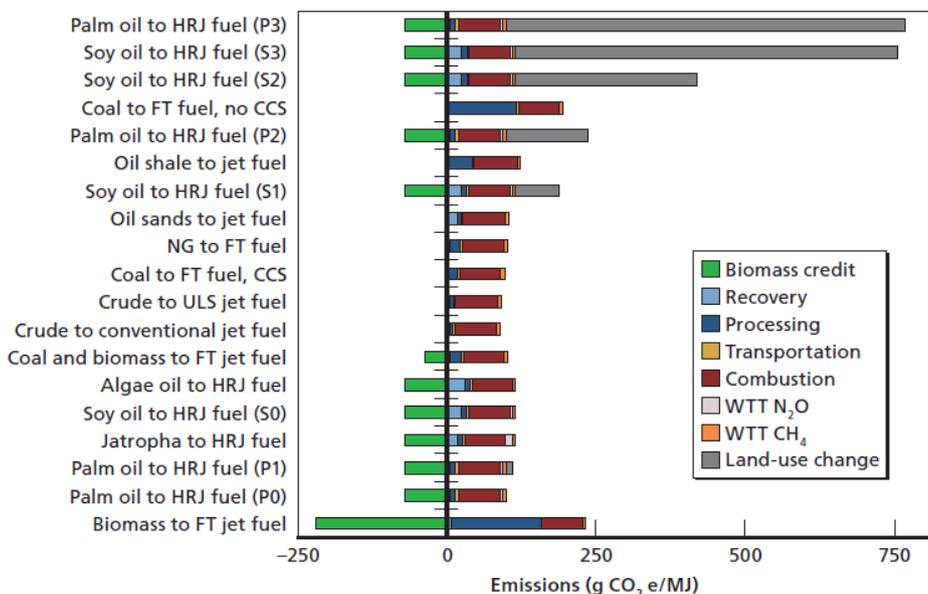
A continuación se describen los estudios, junto con los resultados más relevantes, encontrados en la bibliografía referidos al ACV de combustibles alternativos para aviación, resaltando en el apartado final los resultados para los HRJ de camelina.

#### 3.1 Estudios del Massachusetts Institute of Technology (MIT)

Hileman et al. (2010, 2009, 2008), a partir de los resultados de diversos estudios del MIT (GIACC, 2009; Wong, 2008), presentan estudios sobre la viabilidad de los combustibles alternativos para aviación a corto plazo, desde el punto de vista económico y medioambiental. En cuanto a los beneficios derivados de la producción y el uso de combustibles alternativos, el estudio encontró que los beneficios económicos de la producción de combustibles líquidos alternativos son extensibles a todos los usuarios de combustibles derivados del petróleo. En particular, la producción de combustibles líquidos alternativos produce beneficios para la aviación comercial. A partir de estas conclusiones, las recomendaciones que precisan en cuestión de emisiones de GEI son las siguientes: i) Las medidas destinadas a reducir las emisiones de GEI deben ser amplias y se debe asignar un precio a dichas emisiones, lo que permitiría diversas opciones de eficiencia económica en el sector de la aviación, al igual que se ha realizado en otros múltiples sectores, ii) Las medidas destinadas a promover el uso de combustibles alternativos en la aviación deben considerar GEI potenciales asociados con los cambios de uso del suelo necesarios para los cultivos para la producción de aceites y su posterior transformación en biocombustible, iii) Una metodología estándar debe ser desarrollada para la evaluación de ciclo de vida de los inventarios de GEI y el impacto de la producción y el uso de combustibles de aviación, que tenga en cuenta insumos clave en la producción de los combustibles para este sector.

La figura 2 representa el estudio de las emisiones de GEI de diversos combustibles alternativos. En algunos casos se representan valores distintos para una misma materia prima ya que se consideran diferentes escenarios de cambio de uso de suelo para el cultivo de distintos vegetales.

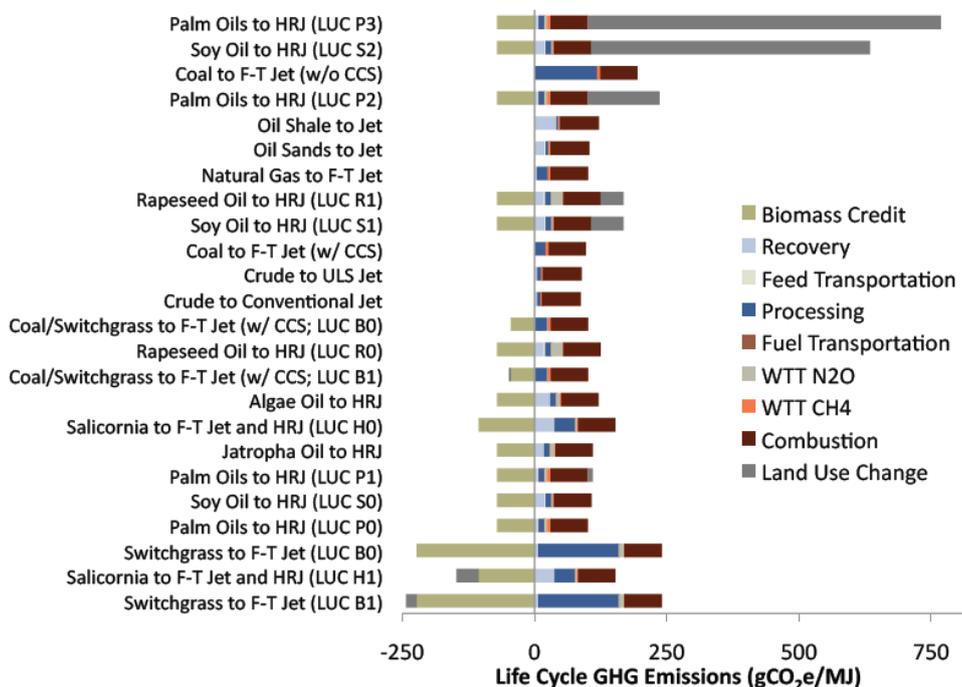
**Figura 2: Emisiones de GEI durante el ciclo de vida de distinto combustibles alternativos para aviación (Hileman et al., 2009)**



El estudio de Stratton et al. (2010), publicado a partir de su tesis de máster (Stratton, 2010), es el más detallado y completo en cuanto a fuentes de materias primas para la producción de querosenos sintéticos y en cuanto a los propios procesos de producción. Parte del estudio anterior de Hileman et al. (2009) pero destinado únicamente a la presentación de los resultados de las emisiones de GEI en todo el ciclo de vida de los combustibles alternativos para aviación. La figura 9 representa el resumen de las emisiones de GEI de cada combustible. Este estudio fue complementado posteriormente en el estudio de Carter et al. (2011) con la inclusión de nuevas fuentes de materias primas oleaginosas, como la camelina para obtener HRJ.

El estudio de Stratton et al. (2010) incluye a combustibles derivados del petróleo de fuentes convencionales y no convencionales (petróleo, arenas y esquistos bituminosos), combustibles obtenidos vía F-T a partir de gas natural, carbón y biomasa, y combustibles hidroprocesados a partir de aceites de soja, palma, colza, jatropha, algas y salicornia. En la mayoría de los casos, la elección de la metodología de asignación y el potencial de las emisiones de GEI provenientes del cambio de uso del suelo, han sido las variables que han modificado los resultados. La cuantificación de las emisiones de cambio indirecto del uso del suelo (ILUC) no fueron considerados. Los resultados mostraron, dependiendo de las características específicas de la producción de cada combustible, el gran rango de valores de emisiones de GEI, desde muy inferiores hasta muy superiores a la referencia del combustible convencional a partir de petróleo. Por esta razón, es fundamental no dar por sentado que los biocombustibles son medioambientalmente beneficiosos, sin saber los detalles de producción de cada uno de ellos. En la figura 3 se detalla las emisiones de los combustibles alternativos considerados, en las diferentes etapas del ciclo de vida.

**Figura 3: Emisiones de GEI durante el ciclo de vida de combustibles alternativos (CCS se refiere a secuestro de carbón, y LUC a cambio de uso de suelo) (Stratton et al., 2010)**



En el estudio de Carter et al. (2011) se presenta la viabilidad de los combustibles alternativos para aviación considerando dos productos: BTL a partir de césped sin secuestro de carbono (del estudio de Stratton et al. (2010)) y HRJ a partir de aceite de camelina. La tabla siguiente muestra los resultados comparativos de las emisiones de GEI en cada etapa del ciclo de vida.

**Figura 4: Emisiones de GEI del bioqueroseno HRJ a partir de camelina (Carter et al. 2011)**

	Camelina HRJ (gCO <sub>2</sub> e/MJ)			Switchgrass F-T BTL (gCO <sub>2</sub> e/MJ)*		
	Low	Baseline	High	Low	Baseline	High
Biomass Credit	-70.5	-70.5	-70.5	-193	-223	-239
Recovery of Feedstock	3.6	12.7	10.5	3.8	6.4	11.4
Transportation of Feedstock	1.8	2.2	2.2	0.6	0.6	0.6
Processing of Feedstock	10.3	10.3	10.3	122	152	168
Transportation of Jet Fuel	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Combustion CO <sub>2</sub>	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4
WTT N <sub>2</sub> O	2.9	7.4	10.8	7.2	10.3	13.3
WTT CH <sub>4</sub>	0.8	1.1	1.0	0.1	0.2	0.5
<b>Total</b>	<b>19.9</b>	<b>34.1</b>	<b>35.3</b>	<b>12.0</b>	<b>17.8</b>	<b>26.1</b>
<b>Relative to Jet</b>	<b>0.23</b>	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>	<b>0.14</b>	<b>0.20</b>	<b>0.30</b>

\*Scenario does not include carbon soil sequestration

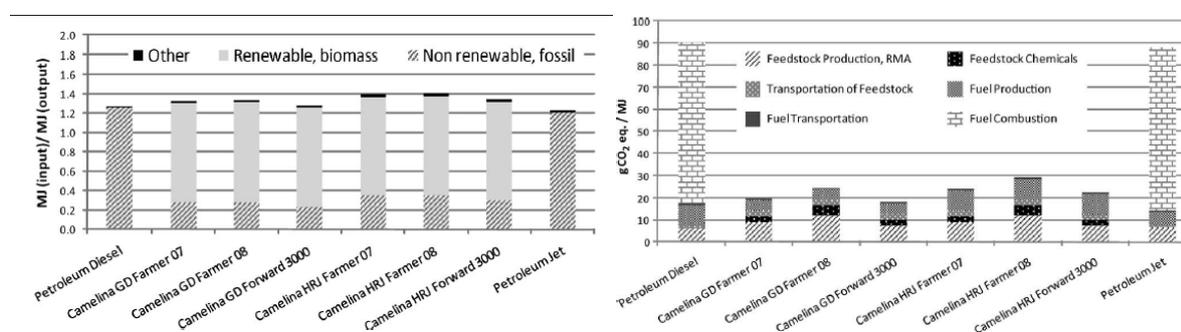
### 3.2 Estudio de Shonnard et al. (2010)

En este estudio se cuantificaron las emisiones de GEI y el consumo de recursos energéticos de combustibles alternativos para automoción y aviación, a partir de camelina. Afirman que, hasta la fecha del estudio, todos los resultados de las pruebas indican que el HRJ no sólo

cumple con especificaciones estrictas de combustible para el motor y rendimiento, sino que también reduce las emisiones ambientales. Varios escenarios están siendo considerados para la camelina como materia prima sostenible para la producción de biocombustibles. Consideran la importancia de la variable del uso de suelo directo e indirecto: el crecimiento de camelina en tierras marginales o como cultivo de rotación durante los períodos de barbecho en las tierras existentes que producen alimentos, puede evitar el conflicto 'alimentos vs combustible' y las preocupaciones con los impactos de ILUC.

Las gráficas siguientes muestran los impactos en cuanto a las categorías de consumo de recursos fósiles y GEI de los combustibles obtenidos a partir de camelina para automoción (GD, *green diesel*) y aviación (HRJ), considerando cultivos en distintas zonas de EE.UU. Las emisiones de GEI del ciclo de vida de GD y HRJ representan un ahorro en relación con los convencionales a partir de crudo del 80% y 75%, respectivamente.

**Figura 5: Consumo de recursos energéticos (izqda.) y emisiones de GEI (dcha.) de los biocombustibles obtenidos a partir de camelina (Shonnard et al., 2010)**



### 3.3 Estudio de Vera-Morales & Schäfer (2009)

En este estudio se presentan los resultados de un exhaustivo estado del arte sobre diferentes combustibles alternativos para aviación en cuanto a emisiones de GEI en todo el ciclo de vida. En los combustibles considerados se incluían a los derivados de arenas y esquistos bituminosos, GTL, CTL, BTL, HRJ a partir de micro-algas (del que presenta un estudio detallado) y el biodiésel de colza para su uso como mezcla con queroseno procedente de crudo. En el mismo estudio se presenta un anexo considerando los test de vuelos recientes con combustibles alternativos. Destaca el uso de jatropha, con características similares a la palma, cuyas emisiones de GEI en el ciclo de vida puede rondar los 25-35 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Además destaca también el uso de camelina cuyas emisiones pueden rondar los 40-50 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. La figura 6 muestra las emisiones de GEI de varias mezclas de biocombustibles en comparación con el queroseno fósil.

### 3.4 Estudio de Kinder & Rahmes (2009)

La figura 7 muestra el gráfico correspondiente al ACV comparativo del queroseno convencional y HRJ procedente de jatropha y de camelina, en término de emisiones de GEI. En ambos casos, el HRJ procedente de aceite vegetal presenta una reducción considerable de estas emisiones, desde los 85 g CO<sub>2</sub> eq/MJ del queroseno fósil hasta los 30 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en el caso de aceite de jatropha y los aproximadamente 20 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en el caso de aceite de camelina.

Figura 6: Emisiones de GEI de biocombustibles para aviación (Vera-Morales & Schäfer, 2009)

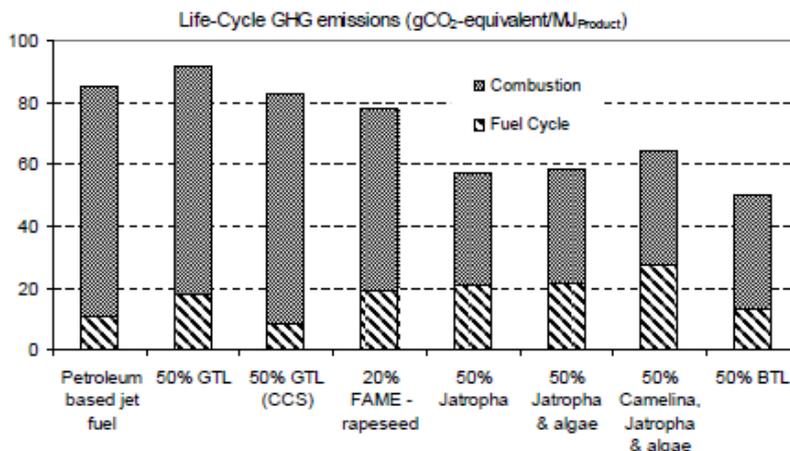
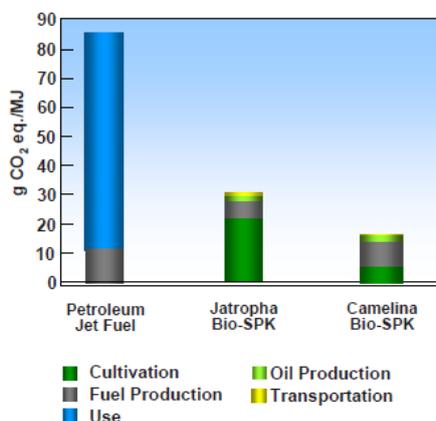


Figura 7: Emisiones de GEI comparadas del Bio-SPK (HRJ) (Kinder & Rahmes, 2009)



### 3.5 Resumen de resultados: HRJ de camelina

A partir los diferentes estudios presentados, a continuación se muestra una tabla con los resultados de emisiones de GEI de los HRJ de camelina.

Tabla 1. Emisiones de GEI de los HRJ a partir de camelina

Estudio	Emisiones de GEI (g CO <sub>2</sub> eq/MJ)
Carter et al. (2011)	20-35
Shonnard et al. (2010)	22-29
Vera-Morales & Schäfer (2010)	40-50
Kinder & Rahmes (2009)	20

### 4. Conclusiones y futuros desarrollos

La camelina puede ser una materia prima idónea para la producción de biocombustibles de segunda generación. Es destacable la elevada producción de aceite de las semillas y las condiciones que posee su cultivo para el fomento de la agricultura sostenible.

De los estudios de ACV consultados del HRJ de camelina, la totalidad presenta un excelente comportamiento en cuanto a emisiones de GEI, disminuyendo considerablemente el valor estándar para el combustible fósil diesel definido en la Directiva Europea para el fomento de energías renovables 2009/29/EC (RED, 2009) de 83 g CO<sub>2</sub>/MJ. No obstante, estos estudios se centran básicamente en la categoría de cambio climático, aunque algunos incluyen la de consumo de energía fósil, como el caso de Shonnard et al. (2010). Es importante destacar que, normalmente, los biocombustibles poseen un mejor comportamiento medioambiental en esas dos categorías, las que se suelen considerar en el caso de ACV de combustibles. En el caso de la categoría de calentamiento global, las emisiones de CO<sub>2</sub> de los biocombustibles en la fase de combustión se consideran nulas por su procedencia biogénica (responsable del crecimiento de la planta); en el caso de la de consumo de energía fósil el valor es menor debido a que en los combustibles fósiles se considera el propio combustible en el valor final de consumo, de ahí que su valor sea mucho mayor comparado con los biocombustibles.

No obstante, existen otras categorías en las que el comportamiento puede ser menos favorable para el medio ambiente como las de acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono, o emisiones de fotooxidantes o precursores de ozono troposférico. En ellas, el valor comparado al de los combustibles fósiles es más elevado debido a la etapa de cultivo y preparación de las cosechas, en las que se utilizan fertilizantes y pesticidas los cuales son responsables del aumento del impacto en dichas categorías.

Además, otra de las categorías que pudieran verse afectadas son las de cambio de uso de suelo (LUC, del inglés *Land Use Change*) y la de cambio indirecto (ILUC, del inglés *Indirect Land Use Change*). Las emisiones de carbono procedentes de ese cambio de uso del suelo deberían ser incluidas en el cálculo general de las emisiones de GEI del biocarburante específico, con el fin de determinar si este cumple los criterios de sostenibilidad establecidos en directivas, como la RED (2009). Sin embargo, si el biocarburante se cultiva en tierras agrícolas existentes, puede desplazar la producción de otros cultivos, algunos de los cuales podrían dar lugar a la reconversión de suelos en tierras agrícolas. De esta forma, la demanda adicional de biocarburantes puede conducir indirectamente a cambios en la utilización del suelo de otras zonas. De aquí procede la noción de ILUC, cuyo concepto referido a los biocarburantes puede verse con detalle en el estudio de Garraín et al. (2012).

Finalmente, cabe destacar que, en la actualidad (año 2012), en España existe la "Iniciativa española para la producción y el consumo de bioqueroseno para la aviación", la cual tiene por objeto fomentar el desarrollo de una industria de bioqueroseno alternativo a partir de camelina, seguro y sostenible mediante el desarrollo y aplicación de la cadena de valor completa. Se trata de una iniciativa liderada por el Gobierno español, con la participación de varios actores clave que representan a cada sector productivo en la cadena de valor. Para obtener más información en <http://www.bioqueroseno.es>.

## 5. Referencias

- Bauen A., Howes J., Bertuccioli L., Chudziak C. (2009). *Review of the potential for biofuels in aviation*, Final report, E4tech, England.
- Brown N., Gillette W., Hileman J.I., Maurice L. (2010). *Estimating Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels*, capítulo 5 en 'ICAO Environmental Report – Aviation and climate change', ICAO.
- Carter N.A., Stratton R.W., Bredehoeft M.K, Hileman J.I. (2011). *Energy and environmental viability of select alternative jet fuel pathways*, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California, USA.

- Fröhlich A., Rice B. (2005). Evaluation of camelina sativa oil as a feedstock for biodiesel production, *Industrial Crops and Products*, vol. 21, 25-31.
- Garraín D., Izquierdo L., Lechón Y. (2012). *Consideración del cambio indirecto del uso de suelo (ILUC) en los análisis de ciclo de vida de biocarburantes*, XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia (España).
- GIACC (2009). *Agenda Item 2: Review of Aviation Emissions Related Activities Within ICAO and Internationally: U.S. Fuel Trend Analysis and Comparison to GIACC/4-IP/1*, Group on International Aviation and Climate Change, GIACC/4-IP/12, fourth meeting, Montreal, Canada. (<http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj28/fueltrend-analy.pdf>) (acceso Septiembre 2011).
- Hileman J.I., Stratton R.W., Donohoo P.E. (2010). Energy content and alternative fuel availability, *Journal of Propulsion and Power*, vol. 26, 6, 1184-1195.
- Hileman J.I., Ortiz D.S., Bartis J.T., Wong H.M., Donohoo P.E., Weiss M.A., Watiz, I.A. (2009). *Near Term Feasibility of Alternative Jet Fuels*, Massachusetts Institute of Technology and RAND Corporation, 2009, Santa Monica, CA, USA. (<http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj17/altfuelfeasrpt.pdf>) (acceso Agosto 2011).
- Hileman J.I., Wong H.M., Ortiz D., Brown N., Maurice L., Rumizen, M. (2008). *The feasibility and potential environmental benefits of alternative fuels for commercial aviation*, ICAS 2008, 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage, Alaska, USA.
- Kinder J.D., Rahmes T. (2009). Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene (Bio-SPK), The Boeing Company, Sustainable Biofuels Research & Technology Program.
- Novelli P. (2008). *State of the Art on Alternative Fuels in Aviation*, en Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy in Aviation. SWAFEA. Final Report, USA.
- OBSA (2010). *Combustibles alternativos para aviación*, Observatorio de la sostenibilidad en aviación, 2010. ([www.obsa.org](http://www.obsa.org)) (acceso Septiembre 2011).
- RED (2009) Diario Oficial de la Unión Europea (05.06.2009). Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.
- Rodríguez de la Rubia M. (2010). *Producción y propiedades de bioqueroseno a partir de aceite de coco*, Proyecto fin de máster nº 10/03, ETS Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Shonnard D.R., Williams L., Kalnes T.N. (2010). Camelina-Derived Jet Fuel and Diesel: Sustainable Advanced Biofuels, *Environmental Progress & Sustainable Energy* (Vol. 29, n. 3), pp. 382-391.
- Stratton R.W., Wong H.M., Hileman J.I. (2010). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels*, PARTNER (Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction) project-28 report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Stratton R.W. (2010). *Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions and non-CO<sub>2</sub> combustion effects from Alternative Jet Fuels*, Master of Science thesis report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Vera-Morales M., Schäfer A. (2009). *Fuel-Cycle Assessment of Alternative Aviation Fuels*, Draft final Report for Omega, University of Cambridge, Institute for aviation and Environment.

Wong H.M. (2008). *Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels*, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Daniel Garraín Cordero  
Ministerio de Economía y Competitividad  
CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)  
Departamento de Energía – Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos  
Av. Complutense, 40 – E28040 Madrid (España)  
Tel: +34 913466091  
Fax: +34 913466005  
E-mail: [daniel.garrain@ciemat.es](mailto:daniel.garrain@ciemat.es)  
URL: <http://www.ciemat.es>