

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL: ESTRATEGIAS Y TECNOLOGÍA

Oscar Maldonado¹, Gamaliel Zambrano¹ y Carlos Rolz Asturias²

¹Centro de Procesos Industriales, ²Centro de Ingeniería Bioquímica- Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala

Resumen

El biodiesel se considera, junto con el etanol y el biogas (metano), uno de los principales biocombustibles elaborados con recursos renovables. En este trabajo se discuten aspectos de estrategias generales y temas de la tecnología asociados en la producción industrial de biodiesel y se proporciona información en forma resumida. La presentación inicia con la definición de la constitución química del biodiesel y el esquema de su preparación, se continúa mostrando cifras que evidencian la dependencia del país en los combustibles líquidos manufacturados del petróleo que se importan para cubrir las necesidades del transporte. Luego, se ofrece un panorama del uso de la tierra de propiedad privada en el país, y en base a estas premisas, se ofrecen alternativas, considerando en el mismo el debate de la competencia de la tierra en producir alimentos o producir energía. En la siguiente sección, se presenta información resumida sobre la producción de biodiesel en el mundo, para después abordar en forma breve la producción actual en el país. Seguidamente, se abordan los temas tecnológicos: a) aspectos relacionados con las materias primas a emplear, b) las alternativas del catalítico empleado, c) el aseguramiento de la calidad del producto y su evaluación como combustible, d) los aspectos económicos y, e) algunos comentarios sobre la sostenibilidad de la producción.

Palabras clave: biodiesel, industria, demanda, proceso, calidad, costos, sostenibilidad.

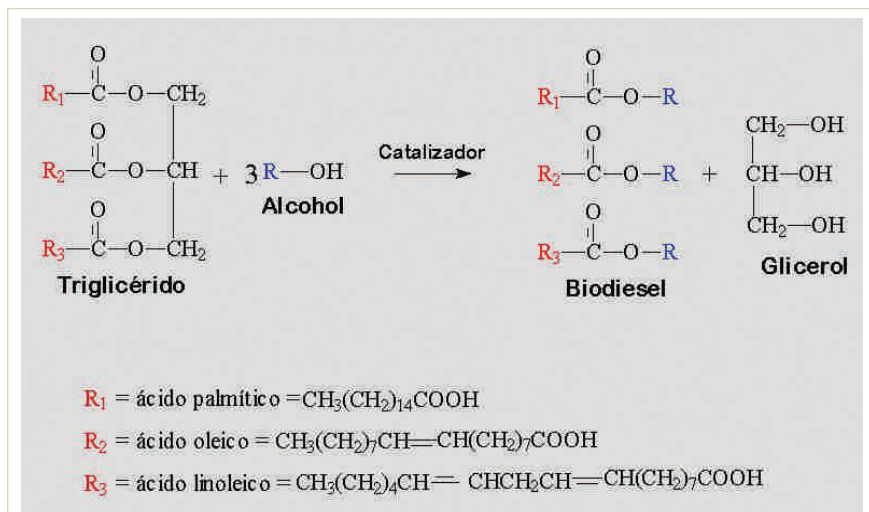
Abstract

First generation renewable biofuels include biogas (methane), ethanol and biodiesel. In this work we review and discuss general strategies and technological topics related with the industrial biodiesel production. We start with the chemical definition of biodiesel and the stoichiometry of the transesterification reaction. Then liquid fossil fuels consumption data is shown for Guatemala which clearly show the relatively weak position of the country in securing transportation fuels as it relies totally in foreign sources. This is followed by a brief analysis of the use of private land in agriculture. Both premises allow us to comment in general terms the usual conflict between food or fuel production. The next section is a brief description of biodiesel production in the world. Finally the following technological topics are dealt: a) available raw materials, b) alternatives for catalysis, c) quality assurance and fuel evaluation of the product, d) economic aspects and e) sustainability of biodiesel production.

Key words: biodiesel, industry, demand, process, quality, costs, sustainability.

Introducción

El biodiesel es una mezcla de ésteres de ácidos grasos. El alcohol en los ésteres empleado en la práctica industrial es el metanol. La mezcla de ácidos grasos proviene de los aceites vegetales, en donde los ácidos se encuentran unidos al glicerol formando los llamados triglicéridos, ya que en una molécula de glicerol están unidos tres ácidos grasos de diferente estructura química, ver Gráfica 1. La reacción de formación del biodiesel es una transesterificación, en donde el metanol sustituye al glicerol en las uniones con los ácidos grasos y el glicerol resultante, queda libre como un subproducto de la reacción. Los ésteres metílicos se conocen como FAME (*fatty acid methyl esters*). Si en el proceso se emplea etanol en lugar de metanol, los ésteres etílicos resultantes se conocen como FAEE (*fatty acid ethyl esters*). Es importante resaltar que debido a la distribución específica de ácidos grasos de un aceite vegetal, el biodiesel producido posee sutiles diferencias químicas, al ser obtenido de aceite de soya o aceite de colza, o de otro aceite, las cuales inciden en cierto grado con las propiedades o indicadores usados comúnmente en asegurar la calidad del combustible.



Gráfica 1. Estequiometría de la reacción de transesterificación

Guatemala es un importador neto de combustibles fósiles empleados en la producción de energía y para cubrir las necesidades del transporte. En la Gráfica 2 se muestra la historia de las importaciones recientes de los combustibles empleados en el transporte.

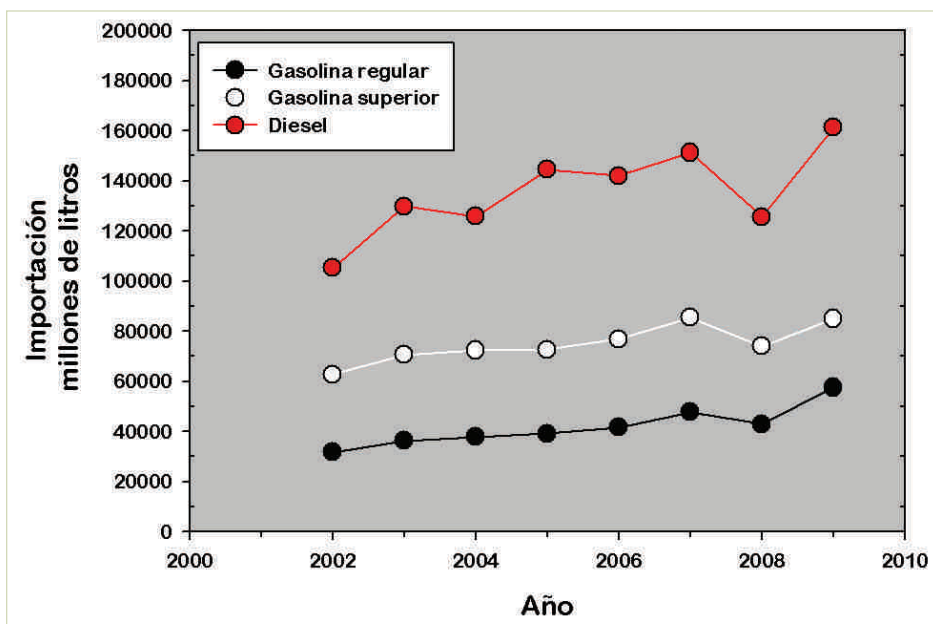
Las tendencias muestran un aumento sostenido en el consumo de diesel y las dos gasolinas.

En Guatemala el aumento continuo de la población, la cual demanda bienes y servicios que aseguren una mejor calidad de vida, está ejerciendo una presión constante por el uso de la tierra disponible para lograr varios objetivos entre los cuales están la seguridad alimenticia, el mantenimiento de los bosques y los cultivos tradicionales agrícolas de exportación.

El uso de la tierra, sea de propiedad privada o gubernamental incluyendo el gobierno central y los gobiernos municipales, muestra poco espacio de maniobra para planificar nuevos cultivos agrícolas en gran escala, por ejemplo, aquéllos requeridos para producir las materias primas que el proceso de biodiesel requiere. La Gráfica 3 muestra la dedicación de la tierra en propiedad privada. La tierra con pastos dirigida al mantenimiento de animales rumiantes es mayoritaria. Esta tierra y aquella que no está en cultivo puede ser que no sea adecuada en su totalidad para sostener una agricultura de expansión, debido tanto a la posible baja calidad del suelo como a la falta de fuentes de agua, por lo que existe un riesgo al estimar requerimientos.

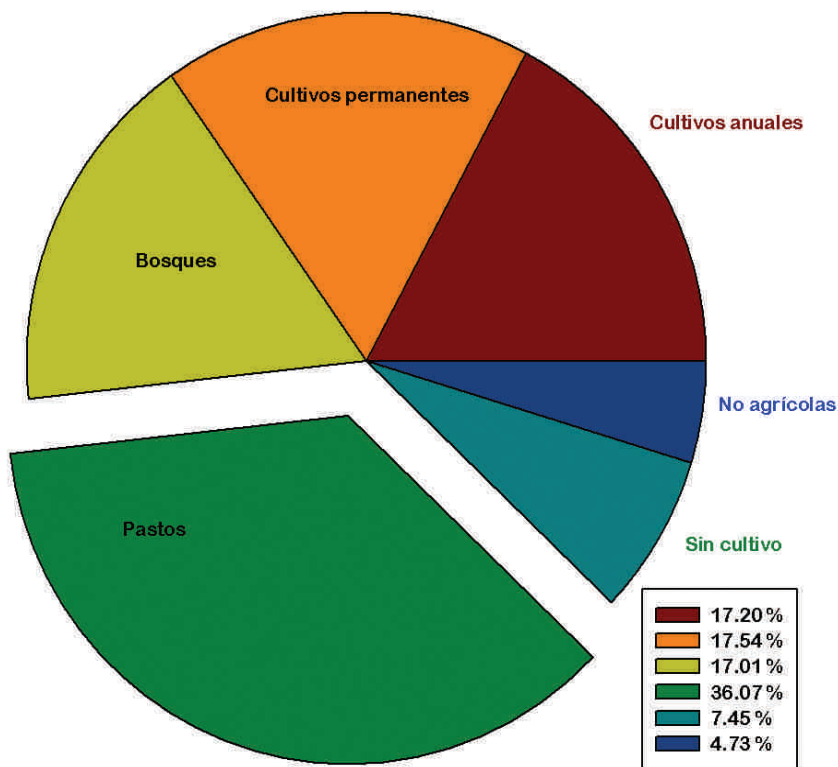
Para satisfacer la demanda anual de diesel de 1,612 millones de litros consumidos en el año 2009, es necesario cultivar las áreas estimadas en el Cuadro 1, ilustrado para cuatro cultivos que se mencionan frecuentemente en la industria del biodiesel como la fuente del aceite vegetal requerida en el proceso.

La palma africana es el cultivo preferencial que requiere menos tierra para satisfacer la demanda debido a su alta productividad aceitera por hectárea. Se estima que el área actual de palma africana sembrada en el país es de 51,000 hectáreas distribuidas en las regiones noreste y suroccidente. Por lo tanto



Gráfica 2. Importaciones de gasolinas y diesel (Fuente: Ministerio de Energía y Minas 2010.)

Uso de la tierra en propiedad privada
Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2008
Instituto Nacional de Estadística, INE



Gráfica 3. Uso de la tierra en propiedad privada (Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2008. Instituto Nacional de Estadística, INE)

sería necesario incrementar en 5.3 veces el área actual de dicho cultivo y destinar el aceite producido en dicha extensión de tierra, en su totalidad, para producir el biodiesel. Sin embargo, ya que las tierras a emplear serían tierras altamente productivas, podrían fácilmente ocurrir problemas sociales y de oposición por parte de grupos que impulsan la seguridad alimentaria. En la última columna se ofrecen los datos anteriores calculados para el escenario en donde el biodiesel se mezcla en un 20% con el diesel normal produciendo lo que en el comercio se denomina mezcla B20. En este caso, el área nueva de palma africana necesaria para satisfacer la demanda, sería únicamente el doble del área actual.

Puede evitarse el empleo de aceites vegetales utilizando la biomasa de microorganismos que acumulen grasa. Los microorganismos crecen en reactores empleando fuentes comunes de nutrientes que contengan carbono, nitrógeno y fósforo. La grasa así producida ha recibido el apelativo de aceites de origen microbiano. La investigación en este campo es intensa por el atractivo de que esta fuente de grasa no compite por un uso intensivo de la tierra y por ende, no entra en conflicto con el aspecto de la seguridad alimenticia.

Producción de biodiesel en el mundo

Los países de la Unión Europea lideran la producción de biodiesel seguidos por los Estados Unidos de América. Alemania y Francia son actualmente los mayores productores mundiales. En la Gráfica 4 se ofrecen las cifras de producción en los últimos años. Se puede observar en ambos casos un continuo y pronunciado crecimiento de la producción, pero resalta el espectacular incremento en el año 2009 de la Unión Europea. En la Unión Europea se emplea la colza como fuente de aceite vegetal en forma exclusiva en 276 plantas industriales. En Estados Unidos de América, por el contrario, se emplea el aceite de soya también en forma exclusiva. La capacidad instalada en la Unión Europea ha superado la producción real, siendo la razón la falta de materia prima y legislación apropiada y no, como pudiera suponerse, una demanda débil del producto.

¹ Chisti, Y. (2007)

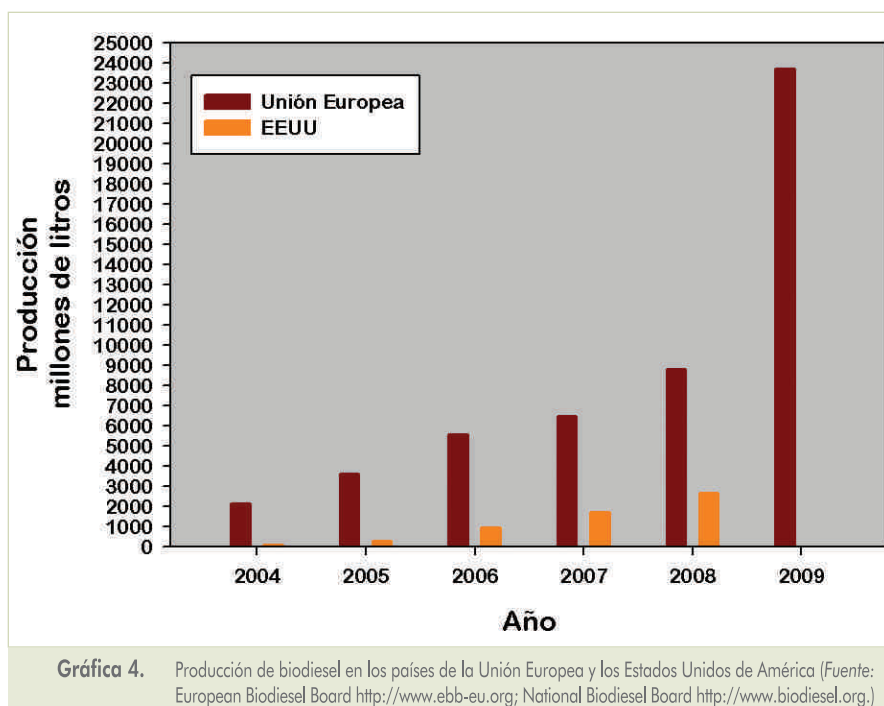
² Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2008. Instituto Nacional de Estadística, INE

³ OLADE Organización Latinoamericana de Energía, Informe de estadísticas energéticas 2007, <http://www.olade.org>

⁴ <http://www.worldbioplants.com>

⁵ <http://www.adm.com/en-US/products/fuel/biodiesel>

Cultivo	Litros de aceite /Ha ¹	Area requerida Ha	% de tierra privada ²	Area requerida Ha, mezcla B20
Soya	445	3,622,472	67	724,494
Canola	1190	1,354,622	25	270,927
Jathropa	1890	852,910	16	170,582
Palma africana	5950	270,924	5	54,189



En el continente americano, además de los Estados Unidos de América, Brasil, Canadá y Argentina son productores de biodiesel en forma comercial. Sin embargo, las estadísticas de producción no están fácilmente disponibles, por ejemplo OLADE³ en sus informes no menciona el biodiesel en el acápite de biomasa. De informaciones dispersas se conoce, por un lado, que en Brasil se produjeron aproximadamente 70 y 640 millones de litros de biodiesel en el 2005 y en el 2006 respectivamente, empleando primordialmente los aceites de soya e higuera. Por el otro lado, Argentina produjo 200 millones de litros en el 2007 empleando aceite de soya. Sin embargo, otra noticia informa que este mismo país exportó aproximadamente 1,100 millones de litros a la Unión Europea en el año 2009 y la demanda de dicho mercado tiende al crecimiento.

Existe un directorio de plantas produciendo biodiesel en el mundo⁴. El archivo consultado en abril del 2010 informa que existen 464 instalaciones industriales en 63 países. Existen compañías que operan plantas de biodiesel en diferentes países, solas o con empresas socias, tal el caso de la compañía americana Archer Daniels Midland Corporation (ADM) que opera en EEUU, Brasil, Canadá, Argentina e Indonesia⁵.

También existen casos de asociaciones empresariales estratégicas, por ejemplo, la compañía suiza Biopetrol Industries AG, que opera dos plantas comerciales en Schwarzheide y Rostock, Alemania, se unió con la compañía holandesa Royal Vopak, que es la compañía más grande del planeta operadora de terminales portuarias especializada en el almacenamiento y manejo de combustibles y productos químicos, para operar la planta de biodiesel más grande de los Países Bajos en el puerto de Rotterdam⁶. Diversas empresas han adaptado su producción para procesar aceites de diferentes fuentes y propiedades, por ejemplo, la planta Biocarburantes CLM (Natura), localizada en la ciudad de Ocaña, provincia de Toledo en España, con una producción de 105,000 toneladas anuales (119 millones de litros), emplea colza, soya o palma⁷. Otras empresas productoras también invierten en el desarrollo de nuevas materias primas como parte de su estrategia global; por ejemplo, Green Earth Fuels, LLC, ha desarrollado tecnología agrícola para crecer camelina en el estado de Montana, EEUU⁸. Las operaciones globales de D1 Oils plc incluyen el desarrollo de plantaciones comerciales de *Jathropa* (piñón como se conoce en Guatemala) en África del Sur, India y en países del Sur Este Asiático⁹. Finalmente, hay que indicar que es común para estas compañías emplear procesos propios protegidos por convenios o patentes. Tal el caso de la compañía finlandesa Neste Oil Corporation que ha invertido 550 millones de euros para construir la mayor planta de biodiesel en el mundo, localizada en la zona industrial Tuas de Singapur, con una capacidad de diseño de 800,000 toneladas anuales (908 millones de litros), empleando la tecnología NExBTL propia¹⁰.

Situación en Guatemala

Biocombustibles de Guatemala S.A. opera desde el año 2005 una planta industrial a base de aceite de piñón y metanol con una capacidad de 3000 galones (11,355 litros) por día localizada en la carretera a Palín. *Guatebiodiesel* es una empresa guatemalteca dedicada al estudio y producción de biocombustibles; cuentan con una fábrica de biodiesel en la Ciudad de Guatemala, con capacidad de producir 1000 galones (3,785 litros) al día de combustible. Sin embargo, la limitante es la cantidad de materia prima que se puede conseguir, por lo que generalmente no se alcanza esta cifra. *Biodiesel Guatemala* cuenta con una empresa localizada en el Departamento de Chiquimula con capacidad de 150 galones (568 litros) diarios de producto a base de aceites vegetales de rechazo que la empresa colecta. *Bio Procesos Energéticos Renovables S.A.* opera una planta demostrativa en Antigua Guatemala empleando como materia prima aceites vegetales de rechazo de los restaurantes de la Antigua Guatemala. La *Fundación Technoserve* ha informado sobre el proyecto de instalar una planta a base del aceite vegetal del piñón cuya capacidad cubriría el 25% de la demanda anual de biodiesel.

Comentarios sobre el proceso: materias primas

A escala mundial los aceites de palma y de soya son las principales materias primas para la industria alimenticia de aceites y grasas vegetales y de los productos químicos derivados. Por lo tanto, la posible demanda que se ha

originado al usarlos en la producción de biodiesel ha originado un caso nuevo al debate mundial existente relacionado con el conflicto entre la seguridad alimenticia y los combustibles renovables. Por lo tanto están siendo consideradas, y promovidas en la práctica, otras materias primas diferentes destinadas exclusivamente a la producción de biodiesel. Una de ellas es la *Jatropha curcas L.* y la otra es la biomasa microbiana. En esta sección se considerarán ambas.

La *jathropa* o piñón es una planta nativa de México, Meso América, Brasil, Bolivia, Perú, Argentina y Paraguay (Achten et al. 2007). Es una planta adaptable a regiones semiáridas y tierras marginales (Becker & Makkar, 2008), sin embargo su diversidad es amplia y es por eso que existe incertidumbre en la información de algunas características importantes como el rendimiento anual de la planta y el contenido de aceite de las semillas (Achten et al. 2008). Por ejemplo, en un estudio reciente realizado en la India (Sunil et al. 2008) se informó que el contenido de aceite varió de 22 a 42% en las semillas de material obtenido de 162 especímenes identificados con un acceso diferente en la colección de germoplasma de dicho país. Además, como se ha ilustrado recientemente (Achten et al. 2008) es necesario fertilizar y garantizar un riego suficiente para lograr rendimientos aceptables cuantificados en toneladas por hectárea por año. En Guatemala hay una gran variedad genética de *jatropha* y se identifican variedades que pueden producir de 500-2000 litros de aceite/Ha. Las plantas pueden estar en el campo de 30-50 años, tienen un 70-90% de germinación, son resistentes a la sequía, se usa actualmente en cercos, cultivos múltiples o plantaciones de larga duración (Azurdia, 2010; Estrada, 2010). Se menciona la variedad Cabo Verde como una de las más prometedoras en el cultivo a mayor escala, variedad que también ha sido propagada en Nicaragua (Foidl et al. 1996).

El aceite del piñón es un aceite similar al de colza y por lo tanto se adapta sin mayores problemas al proceso tradicional de preparar los ésteres metílicos (Becker & Makkar, 2008). Como se muestra en el Cuadro 2 (Achten et al. 2008) la proporción de los cuatro ácidos grasos predominantes varía poco entre muestras de aceite de diferente origen, predominando en ellas los ácidos grasos no saturados. Se ha notado más variación en componentes minoritarios, como lo demuestran indirectamente las dos características de calidad del aceite listadas en las dos últimas filas del cuadro, lo cual podría implicar una posible interacción entre la información genética de la planta, el ambiente y las prácticas agrícolas usadas. Ha sido reportado que los ácidos grasos libres aumentan al almacenar el aceite (Berchmans & Hirata, 2008) y por otro lado en India se ha reportado la existencia de aceites con alrededor de 14% de ácidos grasos libres (Tiwari et al. 2007). Como es conocido la presencia de estos ácidos interfiere con la eficiencia del proceso normal empleado en la producción de los ésteres metílicos.

⁶ http://www.vopak.com/press/137_73

⁷ <http://www.biocarburantesclm.es?9.php>

⁸ <http://www.greenearthfuelsllc.com/projectsMontana.php>

⁹ <http://www.d1plc.com/global.php>

¹⁰ <http://www.nesteoil.com>

Cuadro 2.
Algunas características del aceite de piñón.

Compuesto y características	Número de muestras	Promedio	Desviación estándar
Ácido C16:0 palmitico	22	14.54	2.37
Ácido C18:0 esteárico	22	6.30	3.41
Ácido C18:1 oleico	22	42.02	8.07
Ácido C18:2 linoleico	22	35.38	6.26
Ácidos grasos libres	4	2.18	1.46
Materia no saponificable	5	2.03	1.57

El aceite crudo del piñón es tóxico para el ser humano por la presencia de ésteres de forbol, curcina y ácido hidrocianico. Los primeros son compuestos policíclicos en los cuales dos grupos hidroxilos en átomos de carbono vecinos están esterificados por ácidos grasos (Goel et al. 2007). Por un lado, lo anterior es una ventaja, pues al emplearlo para producir biodiesel, se estaría utilizando un aceite no comestible. Por el otro, sin embargo, dada su toxicidad resulta necesario asegurarse, para proteger a operarios, que dichos compuestos no se encuentran en el producto final, en productos intermedios del proceso o en los subproductos (Makkar et al. 2009). Durante el proceso de purificación del aceite, se han encontrado cantidades de estos compuestos en las gomas separadas por el tratamiento ácido y en las aguas de lavado, por lo que dichos desechos no deberían descargarse directamente al medio ambiente. No se detectaron los compuestos en el producto final o en la glicerina, pero es posible que en ellos se encuentren compuestos resultantes de su degradación química. En la torta obtenida al remover el aceite por prensas de tornillo se encontraron concentraciones tóxicas de estos compuestos que impiden que la misma sea empleada en alimentación animal y que resulta problema disponer de ella (Makkar et al. 2008). Se ha sugerido una digestión anaeróbica para producir biogas y la utilización del residuo sólido como un acondicionador de suelos agrícolas (Achten et al. 2008) aunque todavía se desconoce si presenta fitotoxicidad hacia otras plantas.

La producción de triglicéridos obtenidos de la biomasa de microorganismos, denominados como aceite microbiano es una alternativa para la producción de biodiesel que ha despertado recientemente un interés que amerita su mención en este artículo. Se citan como ventajas sobre los aceites vegetales las siguientes:

- no es necesario emplear tierra agrícola o marginal para su producción,
- no está sujeta a efectos adversos ambientales, como la sequía e inundaciones,
- no se requiere de fertilizantes y plaguicidas,
- se tiene una producción centralizada y controlada, y
- la productividad lograda es imposible de superar por cualquier planta (Li et al. 2008a; Meng et al. 2009).

Cuadro 3.

Intervalos de aproximación a la concentración de ácidos grasos prevalentes en el aceite microbiano (% en peso del aceite)

Microorganismo	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Algas	12-21	-	1-2	58-60	4-20	14-30
Levaduras	11-37	1-6	1-10	28-66	3-24	1-3
Hongos	7-23	1-6	2-6	19-81	8-40	4-42
Bacterias	8-10	10-11	11-12	25-28	14-17	-

Se ha ensayado exitosamente la utilización de una amplia gama de microorganismos incluyendo algas, bacterias autotróficas y heterotróficas, levaduras y hongos. La composición de ácidos grasos del aceite microbiano es atractiva para la producción de biodiesel y aunque existen variaciones entre géneros y especie, y el proceso empleado para su producción, el ácido oleico es predominante como se observa en el Cuadro 3 (Meng et al. 2009).

Los principales problemas en la producción del aceite microbiano están relacionados con:

- la adecuada identificación de cepas capaces de almacenar significativas cantidades de compuestos grasos en su biomasa,
- la adecuada selección de los nutrientes para lograr un crecimiento rápido y abundante de la biomasa microbiana, y
- el diseño del sistema de producción que incluye las etapas del crecimiento y de la recuperación de los sólidos de la biomasa microbiana del medio líquido.

En el caso de las bacterias y algas fijadoras de CO₂ empleando energía solar, la limitación del crecimiento en sistemas acuáticos naturales generalmente lo fijan las cantidades disponibles de nitrógeno y fósforo. Por lo tanto es factible pensar que el diseño del proceso implique un doble propósito al aprovechar el nitrógeno y fósforo proveniente de los efluentes de sistemas de tratamiento aeróbicos-anaeróbicos de aguas servidas y efluentes industriales para lograr, por un lado, un crecimiento microbiano autotrófico rico en grasa, y por el otro, un efluente desprovisto de nitrógeno y fósforo, sustancias que son causantes de acelerar la eutrofización de los lagos y embalses de agua (Li et al. 2008b). Se han ensayado dos tipos de reactores, las llamadas pistas circulantes abiertas y las diferentes geometrías de reactores cerrados con acceso a la energía radiante (Pulz, 2001, Chisti 2007; Eriksen, 2008, Li et al. 2008a). Una fuente de información básica al respecto el lector podrá obtenerla del informe del NREL¹¹. Un reciente estudio que comparó las algas, el piñón, la colza, la soya y la palma como materia prima para aceites, concluyó que las algas salían favorecidas en aspectos relacionados con el ambiente, la sostenibilidad del sistema, los costos asociados al proceso, la seguridad y el desempeño del biodiesel como combustible (Dinh et al. 2009).

¹¹ NREL/TP-580-24190 A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae <http://www.nrel.gov/pdfs/24190.pdf>

En el caso de las levaduras y los hongos filamentosos es indispensable encontrar una fuente de carbono abundante, de disponibilidad centralizada, y de bajo costo. Una propuesta interesante a ese respecto es el uso del glicerol, producido como subproducto en la transesterificación de los aceites, como fuente de carbono y energía para el crecimiento de levaduras ricas en grasa. Este concepto podría considerarse como un reciclaje del glicerol dentro del proceso productivo¹². Se han reportado previamente datos experimentales que demuestran el crecimiento de las levaduras y la acumulación de grasa en las mismas empleando glicerol como fuente de carbono y energía, entre las levaduras citadas están las siguientes: *Yarrowia lipolytica* (Papanikolaou & Aggelis, 2002; Andre et al. 2009), *Cryptococcus curvatus* (Meesters et al. 1996), y *Rhodotorula glutinis* (Easterling et al. 2009).

Se ha creído conveniente en esta sección mencionar, aunque en forma breve, tres casos de interés para Guatemala. El primero de ellos se refiere al empleo de aceites comestibles desechados por la industria alimenticia como una posible materia prima para el proceso; existen dos problemas fundamentales con esta materia prima: a) tienen una alta concentración de ácidos grasos libres, se citan cifras de valores ácidos¹³ que están entre 1.9 hasta 7.4 (Fröhlich & Rice, 2005), los cuales inciden negativamente en la eficiencia de los catalizadores alcalinos, promueven problemas en las etapas de purificación (Leung & Guo, 2006) y elevan los costos del proceso considerablemente por ser necesario incluir etapas de pretratamiento (Zheng et al. 2006) y b) es necesario emplear combustible fósil para su recolección, lo que incide en su sostenibilidad. El segundo caso se refiere al posible uso del aceite obtenido de la semilla del árbol de hule, cultivo de exportación importante en la actividad agrícola guatemalteca; dos reportes, uno de Nigeria (Ikwaagwu et al. 2000) y el otro de India (Ramadhas et al. 2005) informan de los resultados experimentales de la producción de biodiesel, los cuales pusieron de manifiesto el problema ocasionado por el alto contenido de ácidos grasos libres del aceite, un valor ácido de 4.0 en el primer informe y de 34, valor excepcionalmente elevado, en el segundo informe. En este último caso el proceso empleado consistió de dos etapas en serie, catálisis ácida seguida de catálisis alcalina. En el caso de Guatemala la semilla de hule estaría disponible en forma centralizada en las plantaciones por lo que es una alternativa digna de consideración. El tercer caso es el denominado "soapstock", tradicional subproducto de la industria de aceites vegetales; como este subproducto está compuesto de ácidos grasos saponificados, es necesario emplear una catálisis ácida para obtener biodiesel (Haas, 2005; Keskin et al. 2008). De nuevo su centralización es una característica atractiva.

Comentarios sobre el proceso: catalizadores

La reacción de transesterificación es la unidad central del proceso de producción de biodiesel. Las operaciones unitarias antes del reactor, consisten en la extracción del aceite de la materia prima seleccionada y en el acondicionamiento, si es necesario, del aceite extraído. Las operaciones después del reactor, implican la separación de la fase acuosa de la fase aceitosa, el lavado con agua de los ésteres formados, la recuperación del alcohol empleado y el tratamiento del efluente líquido (Van Gerpen, 2005).

La reacción de transesterificación necesita de un catalizador para que se lleve a cabo a una velocidad de reacción y un rendimiento de producto final aceptables industrialmente. La catálisis puede ser alcalina, ácida o enzimática (Ma & Hanna, 1999; Van Gerpen, 2005, Al-Zuhair, 2007, Vasudevan & Briggs, 2008, Canakci & Sanli, 2008). La catálisis alcalina se emplea actualmente en la industria por ser más rápida que la catálisis ácida, a pesar de que esta última no está influenciada por un alto contenido de ácidos grasos libres en el aceite empleado en el proceso. Sin embargo, ambas presentan serias desventajas, entre las que están: a) usan intensamente energía, b) el glicerol puede ser difícil de separar de la mezcla de productos y c) requieren de un tratamiento de efluentes. La catálisis enzimática, empleando lipasas comerciales, ofrece una alternativa que requiere menos energía y es más benigna hacia el medio ambiente (Al-Zuhair, 2007; Parawira, 2009).

El procedimiento de operación y el diseño del biorreactor empleados en la catálisis alcalina han sido protegidos por patentes, algunas de las cuales han sido sumariamente descritas en la literatura (Ma & Hanna, 1999; Van Gerpen, 2005). En la catálisis alcalina y ácida el catalizador, hidróxidos de sodio o potasio, alcóxidos de sodio o potasio en la primera, y ácidos sulfúrico, clorhídrico o fosfórico en la segunda, se encuentra disuelto en la fase alcohólica, y el catalizador no se recupera al final de la reacción (Ma & Hanna, 1999). Con las lipasas comerciales, en caso de emplear la catálisis enzimática, no es posible disolver la enzima en el alcohol porque la enzima es inactiva. Se ha usado enzima disuelta en agua en proporción dada por la actividad intrínseca de la enzima, la cual varía según el origen y la firma productora. El alcohol generalmente se agrega al reactor en etapas para minimizar su efecto negativo sobre la actividad de la enzima. En otros casos se han empleado solventes ya que el alcohol disuelto no muestra el anterior efecto, sin embargo, lo anterior introduce complicaciones al proceso pues es necesario recuperarlo (Al-Zuhair, 2007, Akoh et al. 2007).

La investigación reciente se ha centrado, por un lado, en eliminar la necesidad de un agente catalítico, y por el otro, el de emplear catalíticos que puedan recuperarse y volverse a emplear en el proceso. En el primer caso se ha descrito en la literatura la operación de la reacción empleando metanol o etanol en condiciones supercríticas, es decir alrededor de 520°K y de 6 a 8 MPa (Demirbas, 2008). Obviamente lo anterior implica un reactor y equipo auxiliar de un mayor costo y el empleo de más energía externa para lograr estas condiciones. En el segundo caso, es pertinente mencionar el empleo de sales de calcio, CaO, CaTiO₃, CaMnO₃, Ca₂Fe₂O₅, CaZrO₃, y CaO-CeO₂, logrando rendimientos de un 90% (Kawashima et al. 2008, 2009). También, de un trabajo realizado en Tailandia en donde el ZrO₂ acidificado mostró ser un catalítico eficaz, en comparación a otros sólidos ensayados, para lograr rendimientos arriba del 90% en la esterificación de aceites de palma y de coco (Jitputti et al. 2006). En el caso de las enzimas cabe mencionar que se han reportado ensayos exitosos empleando enzimas puras o biomasa microbiana productora de lipasas, inmovilizadas ambas en soportes sólidos (Du et al. 2008).

Dado el potencial que Latinoamérica ofrece para producir biodiesel, la compañía BASF ha empezado la construcción de una planta en Guaratinguetá,

¹² El Centro de Procesos Industriales con la colaboración del Centro de Ingeniería Bioquímica, ambos del Instituto de Investigaciones, se encuentran realizando experimentos sobre este concepto.

¹³ El valor ácido de un aceite aproximadamente es el doble del % de ácidos grasos libres.

Brazil, con una producción de 60,000 toneladas métricas de metilato de sodio, catalítico para producir biodiesel¹⁴. El metilato de sodio, también llamado metóxido de sodio, se ofrecerá como una solución en metanol o etanol. Los metilatos de sodio y potasio mostraron ser como catalíticos superiores a los hidróxidos respectivos (Vicente et al. 2004).

Finalmente conviene mencionar que se ha reportado un interesante experimento en el cual la biomasa de levadura, conteniendo más del 50 % de lípidos, fue transesterificada directamente empleando metanol acidificado con ácidos minerales (Liu & Zhao, 2007). Esta posibilidad permite proyectar un proceso más simple que evita cualquier operación unitaria empleada en la extracción del aceite de la materia prima. Sin embargo, lo anterior debe sopesarse considerando las posibles operaciones de limpieza del biodiesel así obtenido. Los rendimientos máximos estuvieron alrededor de 98 %.

Comentarios sobre el producto: aseguramiento de la calidad y evaluación como combustible

El objeto de definir la calidad del biodiesel es la de asegurar una operación libre de problemas al ser usado como combustible en motores de combustión por compresión, o al ser empleado como un combustible en calderas. Los posibles contaminantes se originan principalmente de que ocurran en el proceso una reacción incompleta y una purificación insuficiente. En este caso puede existir en el producto una concentración no aceptable de glicerina, de mono y di glicéridos, de alcohol, del catalítico, de agua y sedimentos (Knothe, 2006).

Existen normas que establecen tanto las concentraciones mínimas permitidas de los contaminantes citados, como los métodos analíticos recomendados para su cuantificación. Así mismo, las normas establecen la metodología para determinar características físico-químicas propias de un combustible, como el punto de vaporización instantánea (*flash point*), la viscosidad cinemática, el valor de cetano, el número de acidez, y el punto de turbidez, entre otras. En los Estados Unidos de Norte América se utiliza la norma ASTM D6751 y en Europa las normas EN 14213 y EN 14214. Una referencia reciente que discute en detalle los métodos de análisis y provee sugerencias es la de Knothe (2006) la cual, además, aborda el problema de cuantificar la proporción del biodiesel en una mezcla con combustibles fósiles. En Centroamérica, el Consejo de Ministros de Integración Económica (COMIECO) en su resolución No. 198-2007 de abril del 2007, aprobó el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07 titulado Biocombustibles. Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones. Dicho reglamento es una adaptación de las especificaciones establecidas en las normas ya citadas.

Existe dentro de la estructura de la National Biodiesel Board, entidad referida con antelación en el artículo, una comisión de acreditación que provee un sello de calidad a productores y distribuidores de biodiesel que cumplen con los requisitos normativos, y así poder asegurar al consumidor final la calidad del producto adquirido.

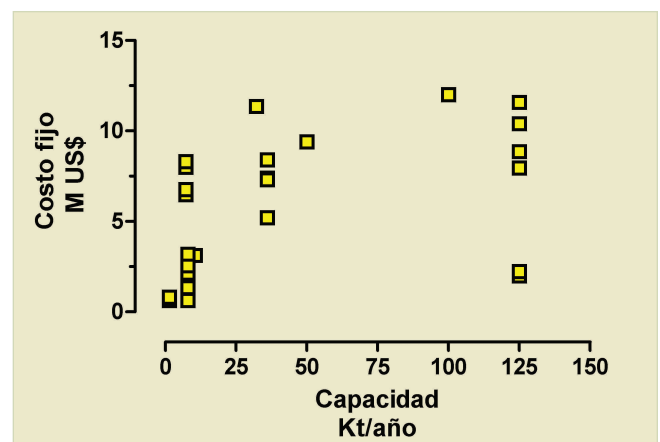
Los motores de combustión por compresión que emplean el diesel del petróleo contribuyen significativamente en los inventarios de óxidos de nitrógeno y partículas totales emitidos al ambiente. La cantidad de monóxido de carbono y de hidrocarburos sin quemar es pequeña en comparación con las emisiones de los vehículos de gasolina de poca potencia. Al emplear el biodiesel, en

diferentes mezclas, o en una sustitución total, se reducen drásticamente las emisiones siguientes: hidrocarburos sin quemar, monóxido y dióxido de carbono, sulfatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y las partículas totales emitidas. Sin embargo, datos experimentales obtenidos muestran un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno, lo cual es importante y obliga a realizar estudios empleando motores modernos (1988 y posteriores) con una tecnología más avanzada (Knothe et al. 2004; Demirbas 2008; Muguseran et al. 2009). La longitud de la cadena del ácido graso empleado en la producción del biodiesel no tiene algún efecto sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno, pero el grado de insaturación en la cadena si lo tiene en una forma directamente proporcional (Demirbas, 2009).

Aspectos económicos

La factibilidad económica del biodiesel depende de factores influenciados por el lugar específico en donde se llevará a cabo su producción. Por lo tanto los datos extrapolados de otras latitudes y circunstancias deben de valorarse únicamente como una guía de uso comparativo. A continuación, se presentaran elementos de los estudios económicos consultados en la literatura libre al respecto (Bender, 1999; Zhang et al. 2003; Nelson & Schrock 2006; Haas et al. 2006; Dorado et al. 2006; van Kasteren & Nisworo 2007; Canacki & Sanli 2008; Bozbas 2008; West et al. 2008; You et al. 2008; Marchetti et al. 2008, Marchetti & Errazu, 2008; Apostolaku et al. 2009; Sakai et al. 2009). Las referencias cubren una gama amplia de materias primas vegetales y diferentes alternativas catalíticas de proceso por lo que las cifras son representativas de la producción actual industrial.

En la Gráfica 5 se ilustra la variación del costo fijo del sistema de producción industrial de biodiesel en función de la capacidad de producción anual de diseño. El intervalo de los estimados del costo fijo a una producción dada es amplio debido a varios factores entre los que están: diferentes autores, la localización de la planta, las condiciones de proceso, la materia prima utilizada, el catalítico empleado, el rendimiento logrado y el grado de purificación de la glicerina producida como subproductos, entre otros. A pesar de esta limitación se observa que hasta llegar a una capacidad de 50,000 toneladas de biodiesel al año, en la cual la inversión fija está ligeramente debajo de los 10 millones de dólares, existe una tendencia clara de incremento. Arriba de este valor, aunque continúa el incremento, la tendencia anterior disminuye.



Gráfica 5. Inversión fija en millones de dólares como una función de la capacidad de producción de la planta en toneladas por año.

¹⁴ <http://www.basf.com/biodiesel>

Los datos del costo de producción oscilan, por las observaciones anteriores, entre US\$ 0.22 a US\$0.72 dólares por litro (Q6.67 a Q21.80 quetzales por galón), del cual el costo de la materia prima oleaginosa representa alrededor del 85 %.

Las cifras anteriores resaltan la importancia de la selección de la materia prima oleaginosa a emplear en el proceso, su costo unitario y el contenido de aceite que contenga.

Sostenibilidad en la producción de los biocombustibles

Una metodología aceptada para asegurar la sostenibilidad de un proceso productivo es el análisis del ciclo de vida (*de la cuna a la sepultura*) y se ha aplicado al proceso de producir biocombustibles en sistemas agrícolas (Fredriksson et al. 2006).

Un estudio reciente sobre el empleo de jathropa como materia prima en la producción de biodiesel fue elaborado por Achten et al. 2007. Los balances de energía y de producción de gases de invernadero fueron positivos, pero dependen significativamente de la naturaleza de la tierra empleada para su cultivo. Por ejemplo, si se cortan árboles de un bosque tropical para sembrar jathropa los resultados ya no son aceptables. La situación mejora si se emplea tierra no utilizada o degradada. Sin embargo, los autores enfatizan que existe todavía incertidumbre en las predicciones debido a la falta de información veraz en el cultivo.

Lam et al. (2009) llevaron a cabo el análisis para condiciones existentes en Malasia, y compararon el empleo de la palma africana o del piñón como materia prima en la elaboración del biodiesel. La comparación se basó en los indicadores siguientes:

- a) balance energético y
- b) consecuencias ambientales relacionadas con el uso de la tierra y el potencial de captura de gases de invernadero.

Las fronteras del estudio se trazaron de manera que el proceso se aisló de las condiciones externas. El proceso considerado tomó en cuenta tres etapas por las cuales la materia fluye en serie. Estas eran:

- a) la producción agrícola del cultivo,
- b) la extracción de la grasa y
- c) la reacción de transesterificación.

En estudios de esta índole generalmente se toman en cuenta los factores externos, por ejemplo, cuanta energía se gasta en producir el metanol y que cantidad de CO₂ se desprende en el proceso. Sin embargo los autores mencionan que el objetivo del estudio era comparar dos materias primas alternas, y no una comparación, por ejemplo, entre el biodiesel y el diesel derivado del petróleo. Ellos concluyeron que, aún considerando el mejor de los casos para el piñón, la palma africana era la mejor materia prima. Ellos citan que para producir una tonelada de biodiesel de piñón, el requerimiento de tierra resultó 118% más alto que la cantidad requerida para producir una tonelada de biodiesel de palma africana. El cociente de la energía producida y la energía consumida en el cultivo, el proceso y el transporte del producto, fue positivo para ambos casos considerados, siendo 2.3 para la palma y 1.9 para el piñón. Finalmente, la captura de CO₂ fue 20 veces más alta para la palma que para el piñón.

Por otro lado Harding et al. (2007) encontraron que los resultados de un análisis del ciclo de vida favorecían a la catálisis enzimática en comparación con la catálisis química, siendo la primera ambientalmente más favorable.

Indiscutiblemente es necesario estudios de esta índole con el objeto de emplearse como guía en la toma de decisiones. Debe señalarse además, que deben tomarse en cuenta factores sociales que justificadamente pueden obligar a cambios parciales o totales de enfoque. A este respecto, conviene concluir citando el esfuerzo normativo de grupos interesados en que lo anterior ocurra. Es así que la Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suiza, ha auspiciado la denominada *Roundtable on Sustainable Biofuels* (RSB) la cual es una iniciativa que busca normalizar las actividades de los proyectos de la producción de biocombustibles derivados de productos agrícolas renovables, por ejemplo, el etanol obtenido por fermentación de la caña de azúcar y sus subproductos, y el biodiesel producido del aceite de semillas oleaginosas o de otro fuente renovable¹⁵.

Para tal efecto, la RSB ha realizado mesas de trabajo en diferentes regiones del mundo con el objeto de analizar y discutir la denominada *Versión cero* de dicha norma. Actualmente se ha aprobado ya la *Versión uno* que es la vigente para analizar nuevos proyectos de gran escala.

Los principios y criterios para *Biocombustibles Sostenibles de la RSB* (RSB-STD-20-001) brindan las pautas sobre las mejores prácticas a seguir en la producción y el procesamiento de la materia prima y para la producción, uso y transporte del producto líquido resultante y para el uso en el transporte.

La norma descrita está basada en 12 principios que abarcan desde el cumplimiento legal hasta los derechos del uso de la tierra, pasando por derechos humanos laborales, desarrollo social, impactos ambientales, agua, suelo, y tecnologías seguras. Los principios son los siguientes:

Principio 1. Las operaciones cumplirán con todas las leyes y reglamentos aplicables.

Principio 2. Las operaciones para la producción sostenible se planificarán, implementarán y mejorarán continuamente mediante:

- a) una evaluación del impacto ambiental y social (ESIA por sus siglas en inglés) que sea abierta, transparente y de consulta y
- b) de un análisis de viabilidad económica.

Principio 3. Los productos resultantes contribuirán a la mitigación del cambio climático reduciendo significativamente las emisiones de los llamados gases de invernadero a lo largo del ciclo de vida del combustible en comparación con los combustibles fósiles.

Principio 4. Las operaciones no violarán los derechos humanos ni los derechos laborales y promoverán el trabajo digno y el bienestar de los trabajadores.

Principio 5. En regiones pobres, las operaciones contribuirán al desarrollo social y económico de los pueblos y comunidades locales, rurales e indígenas.

Principio 6. Las operaciones garantizarán el derecho humano a recibir una alimentación adecuada y a mejorar la seguridad alimentaria en regiones de inseguridad.

Principio 7. Las operaciones evitarán los impactos negativos sobre la diversidad biológica, los ecosistemas y otros valores de conservación.

Principio 8. Las operaciones de implementarán prácticas con el fin de revertir la degradación del suelo y/o a mantener la salud del suelo.

¹⁵ Roundtable on Sustainable Biofuels. RSB-STD-20-2001 (Versión 1.0). Principios y criterios RSB 12/11/09 <http://energycenter.epfl.ch>

Principio 9. Las operaciones de mantendrán o mejorarán la calidad y cantidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos, y respetarán los derechos al agua formales o consuetudinarios existentes.

Principio 10. La contaminación del aire debida a las operaciones se reducirá al mínimo a lo largo de la cadena del suministro.

Principio 11. El uso de las tecnologías en las operaciones para la producción buscará maximizar la eficiencia productiva y el desempeño social y ambiental, y minimizar el riesgo de causar daños al medio ambiente y a las personas.

Principio 12. Las operaciones respetarán los derechos a la tierra y los derechos al uso de la tierra.

CONCLUSIÓN

La información proporcionada en este artículo resalta las alternativas de materias primas que existen y la variedad de procesos disponibles para producir biodiesel. Debe estimular a que avancen las políticas que promuevan, no solo el biodiesel, sino también los otros combustibles renovables como el etanol y el metano, para que en un cercano futuro en el país se satisfaga la demanda actual de combustibles de orígenes fósiles e importados. El artículo proporciona además una fuente de información reciente y de consulta, tanto por la industria, como por la academia.

BIBLIOGRAFÍA

- Achten, W. M., E. Mathijs, L. Verchot, V.P. Singh, R. Aerts, B. Muys, (2007). *Jatropha biodiesel fueling sustainability?* **Biofuels, Bioprod. Bioref.** **1**: 283-291.
- Achten, W. M. J., L. Verchot, Y.J. Franken, E. Mathijs, V.P. Singh, R. Aerts, B. Muys (2008). *Jatropha bio-diesel production and use.* **Biomass and Bioenergy** **32**(12): 1063-1084.
- Akoh, C. C., S.-W. Chang, Lee, G-C, Shaw, J-F. (2007). *Enzymatic Approach to Biodiesel Production.* **J. Agric. Food Chem.** **55**: 8995-9005.
- Al-Zuhair, S. (2007). *Production of biodiesel: possibilities and challenges.* **Biofuels, Bioprod. Bioref.** **1**: 57-66.
- Andre, A., A. Chatzifragkou, P. Diamantopoulou, D. Sarris, A. Philippoussis, M. Galiotou-Panayotou, M. Komaitis, S. Papanikolaou (2009). *Biotechnological conversions of bio-dieselderived crude glycerol by Yarrowia lipolytica strains.* **Eng. Life Sci.** **9**: 468-478.
- Apostolou, A.A., I.K. Kookos, C. Marazioti, K.C. Angelopoulos (2009). *Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils.* **Fuel Processing Technol.** **90**: 1023-1031.
- Azurdia, C. (2010) comunicación personal (OM)
- Becker, K., H. P. S. Makkar (2008). *Jathropa curcas: a potential source for tomorrow's oil and biodiesel.* **Lipid Technology** **20**: 104-107.
- Bender, M. (1999) *Economic feasibility review for community-scale farmer cooperatives for biodiesel.* **Bioresource Technol.** **70**: 81-87.
- Berchmans, H. J., S. Hirata (2008). *Biodiesel production from crude Jatropha curcas L. seed oil with a high content of free fatty acids.* **Bioresource Technology** **99**: 1716-1721.
- Bozbas, K. (2008). *Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union.* **Renewable Sustainable Energy Reviews** **2**: 542-552.
- Canakci, M., H. Sanli (2008). *Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties.* **J Ind Microbiol Biotechnol** **35**: 431-441.
- Chisti, Y. (2007). *Research review paper Biodiesel from microalgae.* **Biotechnology Advances** **25**: 294-306.
- Demirbas, A. (2008). *Studies on cottonseed oil biodiesel prepared in non-catalytic SCF conditions.* **Bioresource Technology** **99** 1125-1130.
- Demirbas, A. (2009). *Progress and recent trends in biodiesel fuels.* **Energy Conversion and Management** **50**: 14-34.
- Dinh, L. T. T., Y. Guo, M. Sam Mannan (2009). *Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making.* **Environmental Progress & Sustainable Energy** **28**: 38-46.
- Dorado, M.P., F. Cruz, J.M. Palomar, F.J. López (2006). *An approach to the economics of two vegetable oil-based biofuels in Spain.* **Renewable Energy** **31**: 1231-1237.
- Du, W., W. Li, Sung, T., Chen, X., Liu, D. (2008). *Perspectives for biotechnological production of biodiesel and impacts.* **Applied Microbiology and Biotechnology** **79**: 331-337.
- Easterling, E. R., W. T. French, R. Hernandez, M. Licha (2009). *The effect of glycerol as a sole and secondary substrate on the growth and fatty acid composition of Rhodotorula glutinis.* **Bioresource Technology** **100**: 356-361.
- Eriksen, N. T. (2008). *The technology of microalgal culturing.* **Biotechnol Lett** **30**: 1525-1536.
- Estrada, R (2010) Comunicación personal (OM)
- Foidl, N., G. Foidl, M. Sánchez, M. Mittlebach, S. Hackel (1996). *Jatropha curcas L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua.* **Bioresource Technology** **58**: 77-82.
- Fredriksson, H., A. Baky, S. Bernesson, A. Nordberg, O. Noren, P.-A. Hansson (2006). *Use of on-farm produced biofuels on organic farms. Evaluation of energy balances and environmental loads for three possible fuels.* **Agric. Sys.** **89**: 184-203.
- Fröhlich, A., B. Rice (2005). *Evaluation of recovered vegetable oil as a biodiesel feedstock.* **Irish J. Agric. Food Research** **44**: 129-139.
- Goel, G., H. P. S. Makkar, G. Francis, K. Becker (2007). *Phorbol Esters: Structure, Biological Activity, and Toxicity in Animals.* **International Journal of Toxicology** **26**: 279-288.
- Haas, M. J. (2005). *Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock.* **Fuel Processing Technology** **86**: 1087-1096.
- Haas, M.J. (2006). *A process model to estimate biodiesel production costs.* **Bioresource Technology** **97**: 671-678.
- Harding, K.G., J.S. Dennis, H. von Blottnitz, S.T.L. Harrison (2007) *A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel.* **J. Cleaner Production** **16**: 1368-1378.
- Ikwaagwu, O. E., I. C. Ononogbu, O.U. Njoku (2000). *Production of biodiesel using rubber [Hevea brasiliensis (Kunth. Muell.)] seed oil.* **Industrial Crops and Products** **12**: 57-62.

- Jitputti, J., B. Kitiyanan, P. Rangsunvigit, K. Bunyakiat, L. Attanatho, P. Jenvanitpanjakul (2006). *Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts*. **Chemical Engineering Journal** **116**: 61-66.
- Kawashima, A., K. Matsubara, K. Honda (2008). *Development of heterogeneous base catalysts for biodiesel production*. **Bioresource Technology** **99**: 3439-3443.
- Kawashima, A., K. Matsubara, K. Honda (2009). *Acceleration of catalytic activity of calcium oxide for biodiesel production*. **Bioresource Technology** **100**: 696-700.
- Keskin, A., M. Gürü, D. Altıparmak, K. Aydin (2008). *Using of cotton oil soapstock biodiesel-diesel fuel blends as an alternative diesel fuel*. **Renewable Energy** **33**: 553-557.
- Knothe, G.; J. Krahl, J. Van-Gerpen (Eds.) (2004) *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press, Champaign, IL. Pp. 165-166.
- Knothe, G. (2006). *Analyzing biodiesel: standards and other methods*. **J. American Oil Chem. Soc.** **83**: 823-833.
- Lam, M. K., K. T. Lee, A.R. Mohamed (2009). *Life cycle assessment for the production of biodiesel: A case study in Malaysia for palm oil versus jatropha oil*. **Biofuels, Bioprod. Bioref.** **3**: 601-612.
- Leung, D. Y. C., Y. Guo (2006). *Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production*. **Fuel Processing Technology** **87**: 883-890.
- Li, Q., W. Du, D. Liu (2008a). *Perspectives of microbial oils for biodiesel production*. **Appl Microbiol Biotechnol** **80**: 749-756.
- Li, Y., M. Horsman, N. Wu, C.Q. Lam, N. Dubois-Calero (2008b). *Biofuels from Microalgae*. **Biotechnology Progress** **24**: 815-820.
- Liu, B., Z. K. Zhao (2007). *Biodiesel production by direct methanolysis of oleaginous microbial biomass*. **J Chem Technol Biotechnol** **82**: 775-780.
- Ma, F., M. A. Hanna (1999). *Biodiesel production: a review*. **Bioresource Technology** **70**: 1-15.
- Makkar, H. P., G. Francis, K. Becker (2008). *Protein concentrate from Jatropha curcas screw-pressed seed cake and toxic and antinutritional factors in protein concentrate*. **J Sci Food Agric** **88**: 1542-1548.
- Makkar, H., J. Maes, W. De Greyt, K. Becker (2009). *Removal and Degradation of Phorbol Esters during Pre-treatment and Transesterification of Jatropha curcas Oil*. **J Am Oil Chem Soc** **86**: 173-181.
- Marchetti, J.M., A.F. Errazu (2008). *Technoeconomic study of supercritical biodiesel production plant*. **Energy Conversion Management** **48**: 2160-2164.
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel, A.F. Errazu (2008). *Technoeconomic study of different alternatives for biodiesel production*. **Fuel Processing Technology** **89**: 740-748.
- Meesters, P. A. E. P., G. N. M. Huijberts, G. Eggink (1996). *High-cell-density cultivation of the lipid accumulating yeast Cryptococcus curvatus using glycerol as a carbon source*. **Appl Microbiol Biotechnol** **45**: 575-579.
- Meng, X., J. Yang, X. Xu, L. Zhang, Q. Nie, M. Xian (2009). *Biodiesel production from oleaginous microorganisms*. **Renewable Energy** **34**: 1-5.
- Murugesan, A., C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian (2009) *Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines. A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **13**: 653-662.
- Nelson, R.G., Schrock, M.D. (2006). *Energetic and economic feasibility associated with the production, processing and conversion of beef tallow to a substitute diesel fuel*. **Biomass Bioenergy** **30**: 584-591.
- Papanikolaou, S., G. Aggelis (2002). *Lipid production by Yarrowia lipolytica growing on industrial glycerol in a single-stage continuous culture*. **Bioresource Technology** **82**: 43-49.
- Parawira, W. (2009) *Biotechnological production of biodiesel fuel using biocatalysed transesterification: A review*. **Critical Reviews in Biotechnology** **29**: 82-93.
- Pulz, O. (2001). *Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms*. **Appl Microbiol Biotechnol** **57**: 287-293.
- Ramadhass, A. S., S. Jayaraj, C. Muraleedharan (2005). *Biodiesel production from high FFA rubber seed oil*. **Fuel** **84**: 335-340.
- Sakai, T., Kawashima, A., Koshikawa, T. (2009). *Economic assessment of batch biodiesel production processes using homogenous and heterogeneous alkali catalysts*. **Bioresource Technology** **100**: 3268-3276.
- Sunil, N., K. S. Varaprasad, N. Sivaraj, T. Suresh Kumar, B. Abraham, R.B.N. Prasad (2008). *Assessing Jatropha curcas L. germplasm in-situ--A case study*. **Biomass and Bioenergy** **32**: 198-202.
- Tiwari, A. K., A. Kumar, H. Raheman (2007). *Biodiesel production from jatropha oil (Jatropha curcas) with high free fatty acids: An optimized process*. **Biomass and Bioenergy** **31**: 569-575.
- Van-Gerpen, J. (2005). *Biodiesel processing and production*. **Fuel Processing Technology** **86**: 1097-1107.
- Van-Kasteren, J.M.N., A.P. Nisworo (2007). *A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification*. **Resources Conservation Recycling** **50**: 442-458.
- Vasudevan, P., M. Briggs (2008). *Biodiesel production—current state of the art and challenges*. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology** **35**: 421-430.
- Vicente, G., M. Martínez, J. Aracil (2004). *Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems*. **Bioresource Technology** **92**: 297-305.
- West, A.H., D. Posarac, N. Ellis (2008) *Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant*. **Bioresource Technology** **99**: 6587-6601.
- You, Y-D., Shie, J-L., Chang, Ch-Y., Huang, S-H., Pai, Ch-Y., Chang, Ch-H. (2008) *Economic cost analysis of biodiesel production: case in soybean oil*. **Energy Fuels** **22**: 182-189.
- Zhang, Y., Dubé, M.A., McLean, D.D., Kates, M. (2003) *Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis*. **Bioresource Technology** **90**: 229-240.
- Zheng, S., M. Kates, M.A. Dubé, D.D. McLean (2006). *Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil*. **Biomass and Bioenergy** **30**: 267-272.

VIÑETA:

EXPERIENCIAS ACADÉMICAS en el Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería

Se ha impulsado e implementado la producción de biodiesel desde el año 2007 con la participación de estudiantes del 5to año de la carrera de Ingeniería Química. Se diseñó y construyó una planta piloto de biodiesel la cual cuenta con un reactor de acero inoxidable con capacidad para 60 litros y una presión máxima de 50 psi. Junto con este reactor se instaló un tanque de acero inoxidable para realizar la mezcla de metóxido o etóxido (mezcla de un alcohol y una base fuerte) y alimentarlo al reactor mediante una bomba centrífuga. Se instaló una prensa de tornillo y equipo de filtración para pretratar los aceites vegetales. Un reactor de alta presión para la conversión catalítica de la glicerina. Se implementó además un laboratorio de análisis físico-químico para el análisis completo del biodiesel. Algunas actividades realizadas y publicadas internamente son: a) José Andrés Hernández, "Diseño del proceso para la extracción de aceite de la semilla de *Jatropha*, especie curcas, utilizando medios mecánicos y por solventes, para la producción de biodiesel a partir del aceite extraído, a nivel laboratorio" 2009, b) Ramiro Cifuentes, "Extracción de aceite a partir de la semilla de *Jatropha crotillata* para la producción de biodiesel a nivel de laboratorio y planta piloto" 2009, c) Sergio Meléndez, "Diseño y construcción de un fotoreactor tubular continuo para crecimiento de biomasa a partir de microalgas" 2010, y d) Diego Sandoval, "Diseño y selección de equipo del proceso de producción de propilenglicol a presión y temperatura moderadas a partir de glicerina como subproducto de la producción de biodiesel" 2010.

Se ha experimentado con los aceites de piñón, palma, ricino, macadamia y aceite vegetal usado. También, se han hecho pruebas con grasa de pollo, cebo y manteca. Se ha estudiado el efecto de las relaciones molares alcohol: aceite tanto en catálisis alcalina empleando hidróxidos de sodio y potasio, metanol y etanol, como en catálisis ácida, en donde se ha empleado el ácido sulfúrico. Se han realizado esterificaciones en secuencia ácido/alcalino con materias primas de un alto contenido de ácidos grasos. En el reactor piloto se han obtenido rendimientos entre 80 a 87% de producto final.



Carlos Rolz
carlosrolz@uvg.edu.gt

Oscar Maldonado
oamaldonado@uvg.edu.gt

Gamaliel Zambrano
zambrano@uvg.edu.gt

Ilustración del equipo de Planta Piloto



► Extractor del aceite de semillas oleaginosas



► Filtro prensa



► Panorámica del reactor y accesorios