

Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado

Resumen: La posibilidad de convertir desechos potencialmente peligrosos para el medio ambiente como son los aceites de freír usados en un combustible ecológico como el biodiesel, puede ser una actividad experimental de laboratorio muy significativa para contextualizar una reacción de transesterificación en cursos universitarios de química orgánica básica. La descripción de la reacción, sus parámetros condicionantes y la técnica experimental para llevarla a cabo, se efectúa desde una perspectiva que posibilita vincular a la química orgánica con un tema de suma importancia tecnológica y con amplias repercusiones económicas, sociales y ambientales.

Introducción

La petroquímica ha sido una de las mayores contribuciones al crecimiento de la química orgánica durante el siglo XX,^[1] pero la racionalización del petróleo junto a su impacto ambiental, ha hecho imperiosa la necesidad de recursos energéticos alternativos que disminuyan su utilización como combustible y lo preserven para aplicaciones más específicas. En ese sentido, la química orgánica posibilita mediante la reacción de transesterificación, convertir aceites vegetales y grasas animales en biodiesel, un combustible renovable con múltiples beneficios ambientales y económicos.

Los mecanismos de reacción en química orgánica, usualmente son percibidos por los estudiantes como modelos teóricos que intentan explicar una química de pizarra o de tubo de ensayo que solo adquiere significado en el ámbito académico, distanciándose de sus propias vidas y de realidades socio-ambientales relevantes y de actualidad. Dentro de este contexto, el presente trabajo pretende, a través de la reacción de transesterificación, resaltar la importancia multidisciplinar de la química orgánica y su implicación en importantes innovaciones tecnológicas con amplias repercusiones económicas, sociales y ambientales, centrándose en los siguientes objetivos:

✍ Abordar la reacción de transesterificación desde una perspectiva teórica usualmente no asequible en los libros de texto, permitiendo la contextualización de una sustitución nucleofílica por el mecanismo de adición-eliminación en la producción de un combustible alternativo a partir de desechos ambientalmente perjudiciales como son los aceites de freír usados.

✍ Conceptualizar los parámetros experimentales de reacción para propiciar el diseño de actividades más abiertas, próximas al trabajo científico y a la futura profesión de los alumnos.

✍ Proporcionar una técnica experimental sencilla, con reactivos asequibles y con una perspectiva de análisis químico que favorezca la integración de diversas técnicas de laboratorio.

✍ Potenciar la relevancia de los mecanismos de reacción en química orgánica, involucrar a los estudiantes en temas de actualidad y desarrollar actitudes positivas hacia una química sustentable.



Favio Daniel Torossi Baudino

La reacción de transesterificación y el Biodiesel

La *transesterificación* es un término general que se utiliza para designar a las reacciones orgánicas en las cuales se produce un intercambio o sustitución del grupo acilo o alquilo de un éster. Así, si un éster interactúa con un alcohol para sustituir su grupo alquilo por el del alcohol, la reacción se denomina *alcoholólisis*; si el

éster reacciona con un ácido carboxílico para sustituir su grupo acilo por el del ácido se conoce como *acidólisis*, y si existe un intercambio entre los grupos acilo y alquilo de dos ésteres diferentes, la reacción se define como *interesterificación*. En la bibliografía, la utilización de esta terminología puede prestarse a confusión, especialmente en la química de las grasas y los aceites, donde algunos autores utilizan el término transesterificación para referirse únicamente a las reacciones de interesterificación, mientras que otros como Fennema, incluyen a las tres reacciones bajo la denominación general de interesterificación.^[2] Si bien es adecuado considerar a la transesterificación como un término inclusor de las tres reacciones mencionadas anteriormente,^[3] en este trabajo, y conforme al consenso que existe actualmente en química orgánica, se lo utilizará en referencia a la alcoholólisis, es decir, cuando un éster reacciona con un alcohol para formar un nuevo éster y un nuevo alcohol.^[4,5,6] En la figura 1 se representa la ecuación general de la reacción de transesterificación que usualmente se expresa en los libros de texto.

Desde una perspectiva más contextualizada, y siguiendo los objetivos de este trabajo, podríamos definir a la transesterificación como la reacción mediante la cual, los triglicéridos (TG) presentes en los aceites vegetales y grasas animales se combinan con un alcohol de bajo peso molecular (usualmente metanol) en presencia de un catalizador adecuado, para formar glicerina y una mezcla de ésteres grasos (Figura 2). La reacción suele describirse en términos del alcohol interviniente, así, el empleo de metanol en la alcoholólisis suele especificarse como "metanolólisis".

Los ésteres grasos obtenidos a partir de la reacción anterior, poseen propiedades y tamaños similares a los constituyentes del combustible diesel, y es lo que se conoce como Biodiesel, su origen biológico y renovable viene enfatizado por el prefi-

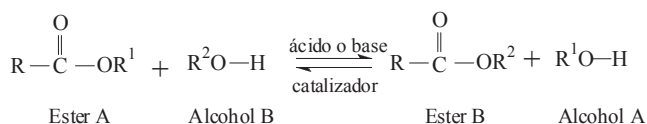


Figura 1. Ecuación general para representar a una reacción de transesterificación

Cátedra de Química Orgánica Ic. Facultad de Bromatología.
Universidad Nacional de Entre Ríos, Perón N° 64, CP. 2820,
Gualedaychú, Argentina.
C-e: ftorossi@infovia.com.ar

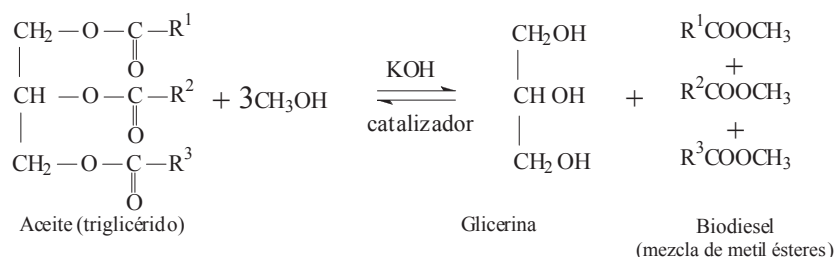


Figura 2. Reacción de transesterificación de triglicéridos (TG) mediante metanol en medio básico; en la bibliografía, suele especificarse como metanolísis.

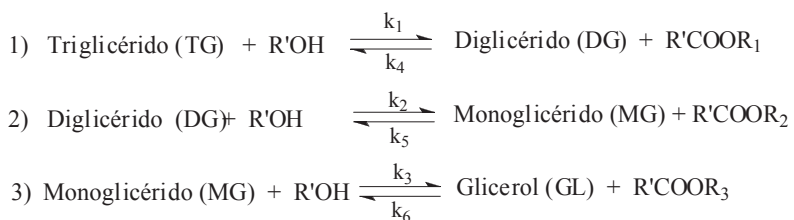


Figura 3. Secuencia de reacciones reversibles en la transesterificación de triglicéridos, (Freedman et al. 1986, citado por Ma y Hanna 1999)

jo "bio" que lo diferencia del tradicional combustible diesel derivado del petróleo. La Norma D 6751-03a de la American Society for Testing and Materials (ASTM) lo define como un combustible constituido por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables como aceites vegetales o grasas animales que pueden ser empleadas en motores diesel o en calderas de calefacción.^[7]

El Biodiesel como combustible y sus implicancias ambientales

El biodiesel puede sustituir total o parcialmente al combustible diesel proveniente del petróleo; es ecológico, biodegradable, atóxico y presenta un perfil de emisiones contaminantes lo suficientemente bajo como para disminuir el efecto invernadero y responder a las exigencias del protocolo de Kyoto.^[8] Es utilizado como disolvente para eliminar hidrocarburos en caso de accidentes marinos^[3] y en cuanto a su producción, es sustancialmente limpia y económica, especialmente si se parte de aceites de freír usados, siendo una alternativa para su reciclaje, dado que usualmente estos productos son desechados a la red colectora cloacal o a rellenos sanitarios, generando problemas ambientales y la pérdida de materia prima valiosa como la glicerina.^[9]

Síntesis del biodiesel y definición de parámetros para una aproximación experimental

Dada la factibilidad de producción de biodiesel en diferentes escenarios de desarrollo, su síntesis se ha plasmado en múltiples recetas divulgativas del tipo "hágalo Ud. mismo" carentes de justificación científica. El objetivo de este apartado es contribuir a su fundamentación, tomando como referentes a la química orgánica y a las recientes investigaciones científicas que, sobre el tema, se han publicado en la bibliografía especializada. En este contexto, el presente trabajo hace una importante aportación al respecto, dado que proporciona un marco teórico que no es asequible en los textos de química orgánica universitaria.

Si bien se han descrito diferentes procesos y condiciones experimentales para la producción de biodiesel,^[10,11,12] la transesterificación de aceites y grasas mediante alcoholes de bajo peso molecular como el metanol y la utilización de catalizadores básicos como el hidróxido de potasio sigue considerándose como la opción más ventajosa en términos de economía, rendimiento, rapidez de reacción y calidad de producto obtenido.

Como muestra la Figura 2, la estequiometría de la reacción de transesterificación requiere tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido, químicamente consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas (Figura 3), en las cuales el triglicérido es convertido en diglicérido, monoglicérido y glicerol, produciéndose en cada una de ellas, una molécula de éster por cada glicérido involucrado.^[11]

La transesterificación de grasas y aceites en medio básico, es un buen ejemplo de una reacción de sustitución nucleofílica en el grupo acilo (carbonilo) que transcurre a través de un mecanismo de adición-eliminación con la intervención de un intermedio de reacción tetraédrico. Según Eckey, la misma se puede formular en tres pasos (Figura 4), en primer lugar, se produce un ataque nucleofílico del alcóxido al átomo de carbono del carbonilo del triglicérido para formar un intermedio tetraédrico, posteriormente reacciona con una molécula de alcohol para regenerar el anión alcóxido y finalmente, el intermedio de reacción tetraédrico se reorganiza para dar un diglicérido y el correspondiente éster metílico.^[13]

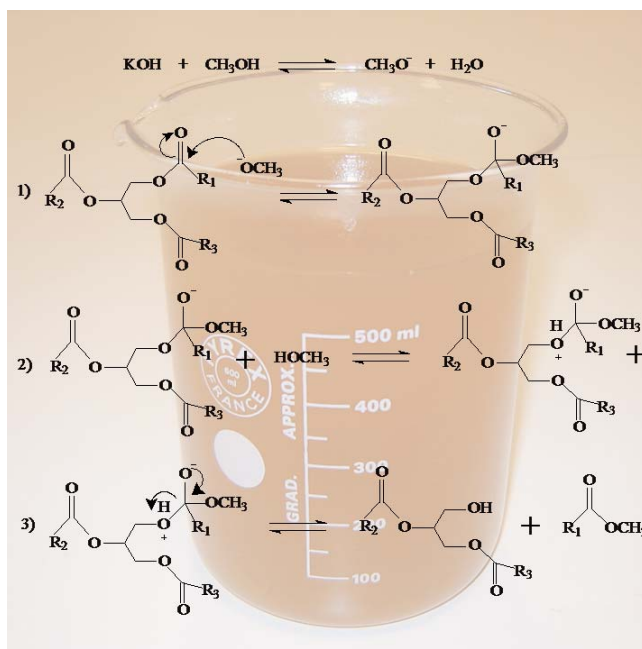


Figura 4. Representación del mecanismo de la primera etapa de la transesterificación de una molécula de triglicérido (TG) en medio básico, el mismo se reitera con las especies iónicas que contienen al diglicérido y monoglicérido hasta una completa conversión del triglicérido en sus correspondientes ésteres metílicos.

Parámetros que afectan a la reacción de transesterificación

La Figura 5 resume las principales variables que afectan a la reacción de transesterificación a partir de aceites de freír usados,^[14,15,16,17] el comprender cómo se relacionan estas variables en el contexto del mecanismo de reacción analizado anteriormente, permite adecuar condiciones operacionales para aumentar la eficiencia de la síntesis de biodiesel a partir de aceites con las más diversas características físico químicas.



Figura 5. Principales variables que afectan a la reacción de transesterificación.

La calidad de los reactivos:

Tanto la acidez del aceite como su contenido acuoso, son parámetros importantes para tener en cuenta; los aceites provenientes de la fritura de alimentos poseen propiedades diferentes de los crudos o refinados. Las altas temperaturas de cocción y el agua de los alimentos aceleran la hidrólisis de los triglicéridos e incrementan su contenido de ácidos grasos libres,^[2] por lo que una valoración previa de su acidez, es fundamental para determinar la cantidad de catalizador capaz de neutralizarla sin disminuir su acción catalítica. Como la neutralización de los ácidos grasos libres conlleva a una saponificación (Figura 6), es recomendable partir de aceites usados de baja acidez para minimizar la formación de jabones que dificultarían la separación del biodiesel luego de la reacción. La transesterificación en medio básico requiere de reactivos anhidros, por lo que la previa eliminación del agua de los aceites y la utilización de hidróxido de potasio y metanol de alta pureza son condiciones para no desestimar.

Relación molar entre el alcohol y el aceite

Es una de las variables más influyentes en el rendimiento de la reacción y en la viscosidad final del biodiesel.^[15] El alcohol más utilizado es el metanol debido a su polaridad y a su estructura de cadena corta.^[11] Si bien la estequiometría para la reacción de transesterificación requiere tres moles de alcohol por mol de aceite (3:1), en la práctica se incrementa a 6:1 para desplazar el equilibrio hacia una mayor formación de ésteres metílicos, una proporción mayor de alcohol dificultaría la posterior separación del glicerol debido a un aumento de su solubilidad.^[15,16,17]

Tipo y concentración de catalizador

La utilización de catalizadores básicos como el hidróxido de potasio, ha sido descrita como la más conveniente para aceites usa-

dos,^[15,17] aunque requieren menos temperatura y tiempo de reacción, presentan el inconveniente de propiciar una saponificación de forma simultánea a la transesterificación (Figura 6). Como la velocidad de reacción viene determinada por el ataque de un nucleófilo (ya sea el ión alcóxido en la transesterificación o bien el hidróxido en la saponificación), es de suma importancia la utilización de reactivos anhidros para minimizar la presencia de agua y por ende la formación de KOH, permitiendo que el ataque del metóxido sea el determinante de la velocidad de reacción,^[18] esto, sumado a un exceso de alcohol que desplace el equilibrio hacia la formación de ésteres metílicos, permitirá atenuar el efecto de la reacción de saponificación que no es reversible. Para aceites con una acidez inferior al 5%, autores como Tomasevic y Siler- Marinkovic sugieren la utilización de un 1% p/p de catalizador siempre que se mantengan constantes los demás parámetros de reacción.^[15]

Agitación, temperatura y tiempo de reacción:

Los reactivos intervinientes, así como los que se producen en el transcurso de la reacción, constituyen un sistema heterogéneo que requiere de una constante y eficiente agitación de 600 rpm.^[9] La reacción de transesterificación puede ocurrir aún a una temperatura de 25°C,^[15] si bien su incremento es directamente proporcional a la velocidad de reacción, posee un intervalo limitado por el punto de ebullición del metanol (65°C) y por las reacciones secundarias de formación de jabones,^[3] debiéndose mantener entre 25 y 65°C. El tiempo de reacción depende de la temperatura, durante el primer minuto, la reacción transcurre lentamente debido a la dispersión del metóxido, pero aumenta rápidamente alcanzando en cinco minutos, porcentajes próximos al 84.7, 61.6 y 49.3% de ésteres metílicos a 65, 45 y 25°C., respectivamente.^[17]

Materiales y procedimiento experimental

Para llevar a cabo la experiencia, se podrá utilizar muestras de aceites de freír usados provenientes de domicilios particulares, restaurantes y cafeterías. Posteriormente, el control de calidad del biodiesel obtenido podrá efectuarse de acuerdo a algunos de los parámetros estipulados en el apartado de Análisis. Si bien, la técnica analítica más utilizada para deter-

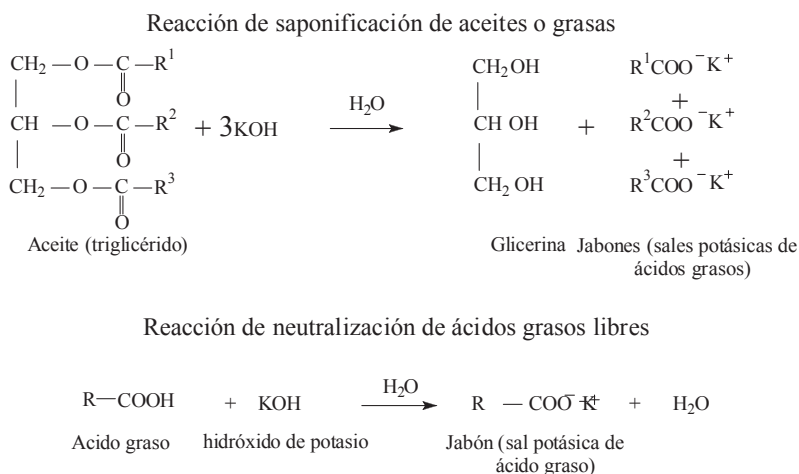


Figura 6. Reacciones secundarias indeseables en la síntesis de biodiesel. La formación de una excesiva cantidad de jabones, incrementa la solubilidad de los ésteres metílicos en la glicerina, produciéndose una emulsión que dificulta la separación y purificación del biodiesel luego de la reacción.

minar la calidad del biodiesel es la Cromatografía en fase gaseosa (CG), una interesante propuesta de esta actividad es que, utilizando instrumentos y materiales asequibles en cualquier laboratorio de docencia, los alumnos puedan determinar la calidad del producto obtenido de forma sencilla, y contrastar los resultados con las especificaciones técnicas. La Figura 7 resume el proceso operativo general y la Tabla 1, los materiales y reactivos necesarios.

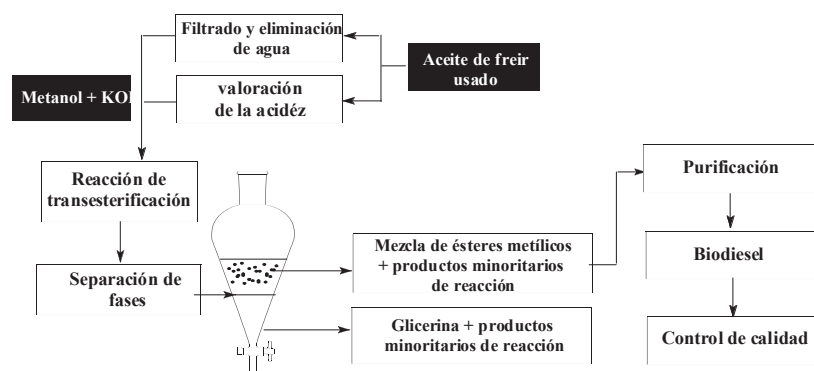


Figura 7. Esquema de la operativa general para llevar a cabo la síntesis de biodiesel en el laboratorio.

Materiales y Reactivos

Tabla 1. Lista general de reactivos y materiales necesarios para llevar a cabo la experiencia.

Lista de materiales y reactivos	
Materiales	Reactivos
Acondicionamiento de la muestra	
Estufa y material de soporte de uso general	
Cedazo y papel de filtro para café	
Reacción de transesterificación	
Matraz de 3 bocas de 250 mL con refrigerante	Aceite de freír usado
Agitador mecánico a hélice o magnético	Metanol anhidro grado analítico
Baño termostático o plancha calefactora	Hidróxido de Potasio anhidro grado analítico
	Tubo de secado con cloruro de calcio
Valoración	
Bureta de 25 mL	Alcohol isopropílico (propan-2-ol)
Vaso de 250 mL	Agua destilada
	Disolución de fenolftaleína
	Papel indicador de pH
Cromatografía en capa fina (TLC)	
Placas para cromatografía Merck soporte de aluminio. 20 x 20 cm.	Hexano
Dos cubas cromatográficas	Eter di etílico
	Acido acético
	Yodo en escamas o perlas
Purificación o Refinado	
	Sulfato de sodio anhidro

Seguridad Química



Hidróxido de potasio: es una base fuerte, corrosiva, absorbe rápidamente dióxido de carbono y agua a partir del aire. El contacto con la humedad o el agua puede generar desprendimiento de calor. FRASES R: 22–35. FRASES S: (1/2)26–37/39–45



Metanol: inflamable y muy tóxico por inhalación, por contacto con la piel e ingestión. Peligro de efectos irreversibles muy graves. Manipular bajo campana, con guantes y protección ocular. FRASES R: 11–23/24/25–39–23/24/25. FRASES S: (1/2)–7–16–36/37–45.



Metóxido de potasio: se genera al disolver KOH en metanol, actúa como catalizador, es altamente inflamable y corrosivo. Es un agente reductor que reacciona violentamente con oxidantes y una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos. FRASES R: 11–14–34. FRASES S: (1/2)–8–16–26–43–45

Procedimiento Experimental

Acondicionamiento del aceite

La muestra de aceite se calienta a 35 °C y se filtra primero mediante un cedazo y luego a través de un papel de filtro para café (tener en cuenta que es un procedimiento lento), posteriormente se calienta a 120°C con agitación constante durante 10 minutos para eliminar el agua presente.

Determinación del índice de acidez

Se disuelve 1g de aceite en 10 mL de alcohol isopropílico a 60°C (también puede utilizarse etanol), se adicionan 3 gotas de disolución de fenolftaleína y se titula con disolución de KOH 0,1 M hasta coloración débilmente rosa que persista durante escasos segundos (teniendo en cuenta que el cambio de coloración se ve afectado por reacciones reversibles). En la Figura 8, se presentan las formas de expresar la acidez y sus correspondientes ecuaciones para calcularlas.^[19]

Debido a que los aceites para freír usados son generalmente mezclas de composición desconocida, a los fines de los cálculos estequiométricos se considerará un PM promedio para el aceite de 873,4 g/mol, conforme al trabajo de Encinar et al.^[17]

La cantidad de KOH a utilizar debe ser aquella que no solo permita la catálisis de la reacción sino también, neutralizar los ácidos libres del aceite, por lo que hay que tener en cuenta que para aceites con un índice de acidez inferior al 5% un 1% p/p de catalizador es adecuado siempre y cuando se mantengan constantes los demás parámetros de reacción; para aceites con una acidez mayor de cinco, la cantidad extra de catalizador que se debe agregar, puede estipularse considerando que cada mL de solución de KOH 0,1 M necesaria para neutralizar una acidez por encima del 5% equivale a 1 g de catalizador por 1000 g de aceite a ensayar.^[20] En esta experiencia, los cálculos estequiométricos se efectuaron a partir de un aceite con una acidez inferior al 5%.

Preparación del metóxido

Efectuar bajo campana y con pantalla protectora. Es requisito indispensable que los reactivos sean anhidros y que el metóxido de potasio sea preparado antes de usarse; dado que la humedad y el dióxido de carbono del aire disminuyen su actividad, debe mantenerse completamente cerrado hasta el momento de agregarse al reactor. En un erlenmeyer de 250 mL se coloca 1 g de KOH (1% p/p de aceite) con 30 mL de CH₃OH (relación molar alcohol/aceite 6:1), se tapa y se agita hasta completa disolución.

Reacciones en contexto

Grado de acidez (GA): indica el % de ácidos grasos contenidos en el aceite o grasa animal, expresado generalmente como % de ácido oleico:

$$\% \text{ AGL (ácido oleico)} = \frac{\text{mL NaOH} \times 0,1\text{N} \times 28,2}{\text{peso de la muestra}}$$

Índice de acidez (IA): expresa el peso, en mg de hidróxido potásico necesario para neutralizar un gramo de materia grasa.

$$\text{IA} = \% \text{ AGL} \times 1,99$$

Figura 8. Ecuaciones que permiten calcular el Grado de acidez (GA) y el Índice de acidez (IA) de aceites y grasas tanto vegetales como animales.

Reacción de transesterificación

En un matraz de fondo redondo de tres bocas con capacidad de 250 mL equipado con refrigerante a reflujo, tubo de secado con cloruro de calcio y agitación a hélice se colocan 100 g (0,12 mol) del aceite previamente acondicionado, se atempera a 60 °C mediante un baño de agua termostatzado. Una vez alcanzada la temperatura de reacción en el interior del reactor se conecta el refrigerante de reflujo, se enciende el agitador y se introduce rápidamente la disolución de metóxido de potasio, este instante es el considerado como tiempo inicial ($t = 0$) de la reacción. Se calienta a 60 °C durante 1 hora con agitación constante a 600 rpm. Una vez alcanzado el tiempo estipulado, la mezcla se transfiere a un embudo de decantación y se deja reposar 12 horas para que se produzca la separación de dos capas bien definidas, una superior constituida por el biodiesel y una inferior integrada principalmente por glicerina y residuos de reacción. Se separa el biodiesel, se lava con 4 volúmenes de agua caliente a 80°C (aproximadamente un 40% respecto a la cantidad de aceite) hasta pH neutro. Finalmente, el biodiesel obtenido se seca con 10 g de sulfato de sodio anhidro y se filtra o se lleva a estufa a 120°C. La glicerina, principal subproducto generado en la reacción de transesterificación, puede ser neutralizada y utilizada posteriormente para la síntesis de jabones. La figura 9 muestra las características del aceite utilizado para la experiencia y la del biodiesel obtenido.



Figura 9. Características del aceite de partida y del biodiesel obtenido. Luego del proceso de lavado y refinado, el biocombustible adquiere un aspecto límpido y cristalino permanente.

Monitoreo del transcurso de la reacción mediante cromatografía en capa fina (TLC)

Para llevarla a cabo, se expone la propuesta presentada en el trabajo de Gemma Vicente Crespo,^[3] en la cual se utilizan placas de sílica gel G soporte aluminio de 20 x 20 cm. Merck.

El disolvente de desarrollo es una mezcla de hexano, éter dietílico y ácido acético (88,5:11,5:1 v/v/v) y como revelador se utiliza vapores de yodo. Las muestras de 0,5 cm³ se extraen mediante una jeringuilla a través del cierre hermético de goma instalado en una de las bocas del matraz, introduciéndose rápidamente en viales con 0,5 cm³ de agua y una cantidad estequiométrica de ácido clorhídrico para neutralizar e impedir que la reacción continúe, se centrifuga dos minutos a 5000 rpm y se extrae con 1 mL de diclorometano, se eliminan los restos de humedad de la capa orgánica con sulfato sódico y se evapora el disolvente. Después del tratamiento y hasta el momento de su análisis, las muestras se deben mantener en el frigorífico.

Esta técnica se puede utilizar para la identificación cualitativa de esteres metílicos, triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos. Al mismo tiempo, la comparación de los tamaños de las manchas cromatográficas de estos compuestos con la de estándares preparados con cantidades conocidas pueden dar una idea cuantitativa aproximada de las especies presentes en la muestra de análisis. Por ejemplo: si se prepara una muestra estándar de triglicéridos y otra de ácidos grasos con las cantidades máximas especificadas por la Norma Europea prEN 14214 (triglicéridos: 0,2 % p/p y ácidos grasos: 0,5 mgKOH/g), a través de la comparación de las manchas se puede determinar aproximadamente si los ésteres metílicos están dentro de las especificaciones.

Análisis y Parámetros de calidad para el Biodiesel

Existen diferentes normas internacionales que especifican las características del biodiesel y sus métodos de ensayo, al tratarse de un combustible de origen vegetal, sus cualidades son valoradas por un lado, como las de los combustibles fósiles y por el otro, como la de ésteres metílicos. A fin de simplificar, la Tabla 2, proporciona los estándares fijados por la Norma ASTM D 6751-03a, en la cual se han sumado algunos métodos de análisis de Normas ISO y anexado finalmente, algunas propiedades para valorar la calidad del biodiesel como éster. Los métodos de análisis pueden ser consultados en el Biodiesel Analytical Methods de la National Renewable Energy Laboratory disponible en Internet.^[2] Diferentes autores coinciden en indicar que los principales condicionantes de la calidad del biodiesel obtenido son los siguientes parámetros: índice de acidez, densidad, viscosidad, índice de yodo, índice de saponificación, N° de cetano, puntos de enturbamiento, inflamación y combustión. Por lo que deberán ser tenidos en cuenta al momento de planificar las pruebas de calidad que se pretendan realizar en el laboratorio.

Implicaciones didácticas

El desarrollo de una actividad fundamentada en la obtención de un combustible ecológico a partir de desechos, es una cuestión de indiscutible solidez como para planificar y desarrollar un trabajo práctico desde una perspectiva que considere a la química orgánica dentro de una gestión de desarrollo sostenible.

Como se ha analizado a lo largo del artículo, en la reacción de transesterificación, intervienen un número interesante de variables operativas que posibilitan la planificación por parte del docente, de actividades más abiertas, en las cuales se pueda dar al estudiante el protagonismo en el diseño y traba-

Tabla 2. A) Especificaciones del biodiesel (como combustible) según Norma ASTM D 6751-03a. B) Especificaciones del biodiesel (como éster) según Normas AOCS descritas en la bibliografía.

A - Propiedades del Biodiesel como Combustible			
Propiedad	Método	Valor	Unidad
Punto de inflamación (Flash Point, en copa cerrada).	ASTM D 93	130,0 mín.	�C
	ISO CD 3679	120,0 m�n.	
Contenido de agua y sedimento	ASTM D 2709	0,050 máx.	% volumen
Viscosidad cinemática (40�C)	ASTM D 445	1,9 - 6,0	mm ² /s
	ISO 3104	3,5 - 5	mm ² /s
Ceniza sulfatada	ASTM D 874	0,020 máx.	% en masa
Sulfuros	ASTM D 5453	0,05 máx.	% en masa (ppm)
Corrosión en lámina de cobre	ASTM D 130	N� 3 máx.	
Número de cetano	ASTM D 613	47 mín.	
	ISO 5565	49 m�n.	
Punto de enturbiamiento (cloud point)	ASTM D 2500	-----	�C
Residuo carbonoso	ASTM D 4530	0,050 máx.	% en masa
Número �cido	ASTM D 664	0,80 máx.	mg KOH/g
	ISO 660-1983E	0,50 máx.	
Glicerina libre	ASTM D 6584	0,020 máx.	% en masa
Glicerina total	ASTM D 6584	0,240 máx.	% en masa
Temperatura de Destilación (90 %)	ASTM D 1160	360 máx.	�C
Densidad	ASTM D 1298	0,875-0,900	g/cm ³
B - Propiedades del Biodiesel como éster			
Propiedad	Método	Valor	Unidad
Densidad mediante picnómetro	AOCS Cc-10a-25	0,86-0,90	g/cm ³
Viscosidad (20�C)	DIN 5156	6,5-9,0	mm ² /s
�ndice de acidez	AOCS: Cd-3a-63	0,5 máx.	mg KOH/g
Grado de acidez	AOCS: Cd-3a-63	0,25 máx.	mg KOH/g
�ndice de peróxido	AOCS Cd-8-53		
�ndice de saponificación	AOCS: Cd 3b-76	189 máx.	mg KOH/g
	AOCS: Cd-3a-94		
�ndice de Iodo	AOCS Cd-1-25	115 máx.	----

jo experimental, redimensionando así los trabajos prácticos de laboratorio tradicionales por un aprendizaje más coherente con la actividad científica.

La formulación de preguntas como las propuestas por Wade^[6] y las sugeridas a partir de la Metodología de Resolución de Problemas como Investigación (MRPI) desarrollada por Martínez y Varela^[22,23] (Figura 10), pueden guiar y ayudar a los estudiantes en el proceso de enseñanza aprendizaje. Cuando este tipo de preguntas se plantean y responden en el marco de la experiencia misma, las acciones y los instrumentos toman sentido y se conjugan para dotar de significado al trabajo práctico de laboratorio.

La posibilidad de analizar la calidad del biodiesel a través de técnicas de laboratorio abordadas en diferentes asignaturas, propicia la integración de contenidos y el hábito de pensar estratégicamente, puesto que no solo se trata de enseñar aspectos instrumentales de una tecnología que progresa aceleradamente, sino de fomentar en los estudiantes, habilidades de pensamiento basadas en conocimientos concretos que les permitan tomar decisiones ante nuevas y diferentes situaciones.

El hecho de que los alumnos puedan contrastar los datos obtenidos con estándares internacionales de calidad, tiene el explícito sentido pedagógico de enfrentarlos al juicio crítico de los resultados y de la



A) Preguntas para guiar la comprensión del mecanismo de reacción de la transesterificación:

- 1) Teniendo en cuenta los esqueletos carbonados de los reactivos y productos  qu  átomos de carbono de los productos se derivan de los átomos de carbono de los reactivos?
- 2)  Es alguno de los reactivos lo suficientemente electrofílico para que reaccione sin ser activado? En caso contrario,  c mo se puede transformar uno de los reactivos en un electrófilo fuerte por protonación de un átomo básico?
- 3)  C mo un átomo nucleofílico de otro reactivo puede atacar al electrófilo fuerte para formar el enlace que se necesita en el producto?
- 4)  C mo se puede transformar el producto del ataque nucleofílico en el producto final o reactivarlo para que forme otro enlace, el cual se necesita en el producto?
- 5) Representar todos los pasos del mecanismo, utilizando flechas curvadas para indicar el movimiento de los electrones.



B) Preguntas para guiar al estudiante durante la actividad experimental:

- 1)  Cu l es la calidad del aceite con la cual se pretende hacer la experiencia?
- 2)  C mo se reformular a la cuestión en términos operativos?
- 3)  Qu  hipótesis se pueden emitir acerca de los factores que puedan influir en la reacción?
- 4)  Qu  factores deberías tener en cuenta para diseñar el experimento?  Cu l es la variable independiente?
- 5)  Qu  resultados son previsibles de obtener?  cu l es la variable dependiente, cómo la observarás?
- 6)  C mo dise ar as la experiencia?
- 7)  Qu  aparatos o instrumentos necesitarás?
- 8)  Cu l es tu análisis de los resultados obtenidos?
- 9)  C mo se relacionan los resultados a la luz de las hipótesis y del marco teórico utilizado?
- 10)  Ser a necesaria alguna reformulación?

Figura 10. A) Preguntas sugeridas por Wade para guiar al alumno en la comprensión del mecanismo de reacción de la transesterificación tanto en medio básico como  cido. B) Preguntas elaboradas a partir de la Metodología de Resolución de Problemas como Investigación (MRPI) desarrollada por Martínez Aznar y Varela Nieto.

Reacciones en contexto

metodología utilizada. Diferentes investigaciones didácticas evidencian el corto tiempo que los docentes le dedican al análisis y discusión de los resultados obtenidos en las experiencias de laboratorio. La metodología propuesta en este trabajo pretende revalorizar esta actividad científica fundamental y concientizar a los alumnos sobre los criterios de calidad y desempeño.

Agradecimientos

A la Dra. Manuela Martín Sánchez, Directora del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Facultad de Educación. UCM., por el apoyo y la posibilidad de disponer del laboratorio para la puesta a punto de esta experiencia. A la Agencia Española de Cooperación Internacional por la beca otorgada para realizar el programa de doctorado en dicho departamento y al Dr. José María Encinar de la Universidad de Extremadura por el generoso aporte técnico.

Referencias

- [1] F. A. Carey, *Organic Chemistry, 3rd edition*. Prentice-Hall, USA. **1999**.
- [2] O. R. Fennema, *Química de los alimentos. 2da Edición*. Editorial Acribia. España. **2000**.
- [3] G. Vicente, *Estudio del proceso de producción de biodiesel*. Tesis doctoral inédita: Departamento de Ingeniería Química. UCM. España. **2001**
- [4] R. Morrison, R. Boyd, *Química Orgánica*. Longman Addison Wesley. México. **1998**
- [5] P. Bruice, *Organic Chemistry, 3rd Edition*. Prentice-Hall. USA. **2001**
- [6] L. G. Wade, *Química Orgánica, 5ta Edición*. Pearson. Prentice Hall. Madrid. **2004**
- [7] American Society for Testing and Materials, *Standard Specification D 6751-03a for Biodiesel Fuel (B100)*. **2003**
- [8] L. J. Ferreiro, *Residuos*, **2004**, 81, 110–116.
- [9] R. Alcántara, J. Amores, L. Canoira, E. Hidalgo, M. Franco, A. Navarro, *Biomass Bioenergy*. **2000**, 18 (6), 515–527.
- [10] U. Schuchardt, R. Sercheli, Vargas Matheus, *J. Braz. Chem. Soc.*, **1998**, 9 (1), 199–210.
- [11] F. Ma, M. Hanna, *Bioresource Technology*, **1999**, 70 (1), 01–15.
- [12] H. Fukuda, A. Kondo, H. Noda, *J. Bioscience Bioengineering*, **2001**, 92 (4), 405–416
- [13] E. W. Eckey, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1956**, 33, 575–579.
- [14] B. Freedman, E. H. Priyde, T. L. Mounts, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1984**, 61 (10), 1638–1643.
- [15] A. Tomasevic, S. Siler-Marinkovic, *Fuel Processing Technology*, **2003**, 81, 1–6
- [16] Y. Zhang, M. Dubé, D. McLean, M. Kates, *Bioresource Technology*. **2003**, 89 (1), 01–16.
- [17] J. Encinar, J. Gonzalez, A. Rodriguez, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2005**, 44, 5491–5499.
- [18] R. Glass, *Lipids*. **1971**, 6, 919.
- [19] S. Nielsen, *Food Analysis, 2nd Edition*. An Aspen Publication. USA. **1994**
- [20] D. Jacobs, D. Adams. *Used frying oil to Diesel: An opportunity for micro-enterprise creation?* University of Cape Town. South Africa. **2001**
- [21] National Renewable Energy Laboratory, *Biodiesel Analytical Methods*. USA. **2004**. Se puede encontrar en: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36240.pdf>
- [22] P. Varela, M. Martínez, *Enseñanza de las Ciencias*. **1997**, 15(2), 173–188.
- [23] M. Martínez, P. Ovejero, *Enseñanza de las Ciencias*. **1997**, 15 (3), 401–422.



Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química

La mejor forma de presentar sus productos a los profesionales del sector.

Si quiere aprovechar nuestro medio de comunicación, sólo tiene que ponerse en contacto con nuestro departamento comercial que gustosamente le facilitará las distintas posibilidades.

Departamento Publicidad
Tel.: 902 933 093
info@centauromultimedia.com

