

## Capítulo 4

### Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles

José Trinidad Pérez-Quiroz,<sup>1</sup> Nancy Leticia Araujo-Arreola,<sup>2</sup> Ana Isabel Torres-Murillo,<sup>2</sup> J. Porcayo-Calderón<sup>3</sup>, Mariela Rendón-Belmonte,<sup>1</sup> Jorge Terán-Guillen,<sup>1</sup> Miguel Martínez-Madrid,<sup>1</sup> Ramiro Pérez-Campos<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, México.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CIIAp, Av. Universidad 1001, 62209-Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>4</sup> Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM, México.

[jtperez@imt.mx](mailto:jtperez@imt.mx), [naraujo508@hotmail.com](mailto:naraujo508@hotmail.com), [anima6\\_isa@hotmail.com](mailto:anima6_isa@hotmail.com),  
[mbelmonte@imt.mx](mailto:mbelmonte@imt.mx), [jporcayoc@gmail.com](mailto:jporcayoc@gmail.com), [jteran@imt.mx](mailto:jteran@imt.mx), [martinez@imt.mx](mailto:martinez@imt.mx),  
[ramiro@fata.unam.mx](mailto:ramiro@fata.unam.mx)

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.157>

#### Referenciar este capítulo

Pérez-Quiroz JT, Araujo-Arreola NL, Torres-Murillo AI, Porcayo-Calderón J, Rendón-Belmonte M, Terán-Guillen J, Martínez-Madrid M, Pérez-Campos R. *Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles*. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 69-85.

## **1. Introducción**

El alto costo del petróleo y la tendencia de que éste siga aumentando de precio, así como la disminución de sus reservas, han provocado que la seguridad energética a nivel mundial se vea afectada. Por otra parte se encuentra la constante preocupación por el calentamiento global, causado en gran medida por la liberación de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles. Como consecuencia, es cada vez mayor el interés por el empleo de fuentes de energía renovables como el biodiésel, que posee grandes ventajas con mínimos daños al ambiente.

En el manejo de estos combustibles, son comunes problemas de corrosión que ocasionan graves pérdidas económicas. Por ello se requiere de investigaciones encaminadas a la mejora de los materiales ya existentes o a realizar una selección adecuada de materiales.

Este capítulo describe al biodiésel como uno de los combustibles que se proponen para su uso en el sector automotriz así como las ventajas y desventajas de este. Se describen sus características físicas, químicas así como su desempeño ante diferentes materiales en contacto con biodiésel, por medio de las técnicas gravimétricas y electroquímicas, la información que aportan los diferentes estudios podrían ser empleados para la selección y diseño de materiales usados en la industria automotriz en específico tanque de almacenamiento y componentes del motor del automóvil.

## **2. Marco teórico**

En la actualidad, México al igual que muchos otros países, comienzan una nueva era dentro de la cual los biocombustibles juegan un papel importante, ya que forman parte de las nuevas energías alternativas que se buscan para reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente del planeta. Al estudiar el comportamiento de diversos materiales en contacto con el biocombustible se obtendrían datos que ayuden al desarrollo tecnológico, ambiental y económico del país. Está comprobado que la tecnología genera el avance y desarrollo del país, pero a su vez genera daños, que en ocasiones son irreversibles, que se tienen que contrarrestar por medio de alternativas. Una de ellas es realizar investigaciones que ayuden a utilizar materiales adecuados que minimicen el problema.

Debido a lo anterior las investigaciones hechas hasta la fecha pretenden generar información del comportamiento materiales metálicos y materiales poliméricos en contacto con biodiésel. Los parámetros a medir son velocidades de corrosión y parámetros cinéticos electroquímicos, que permitan seleccionar el material más adecuado para el uso de biodiésel en automóviles como combustible alternativo.

### **2.1. Biodiésel**

Es un combustible de origen vegetal o animal, una fuente de energía limpia, renovable, de calidad y económicamente viable, que además contribuye a la conservación del medio ambiente, por lo que representa una alternativa al uso de combustibles fósiles. Químicamente y de acuerdo con la norma ASTM (American Standards for Testing and Materials) el biodiésel se define como: ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales, grasa animal y aceites usados, dichos ésteres son

utilizados en los motores de combustión interna o ignición (motores diésel) o en calderas de calefacción.<sup>1</sup>

Las propiedades del biodiésel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción (diésel) en cuanto a densidad y número de cetanos, que es un indicativo de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores de combustión interna (ignición). Además, presenta un punto de inflamación superior. Por ello, el biodiésel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente.

En cuanto a la utilización del biodiésel como combustible de automoción, debe señalarse que las características de los ésteres son más parecidas a las del gasóleo que las del aceite vegetal sin modificar. La viscosidad del éster es dos veces superior a la del gasóleo frente a diez veces ó más la del aceite crudo; además el índice de cetanos de los ésteres es superior, siendo los valores adecuados para su uso como combustible.

El biodiésel puede emplearse de cualquiera de las siguientes maneras:

- Como combustible puro (B 100).
- Como combustible mezclado con petrodiésel o gasóleo (B20).
- Como un aditivo del petrodiésel (Menor de 1% a 5%).
- Donde sea que el petrodiésel # 1 o # 2 (kerosene o diésel) sea usado.

El biodiésel se obtiene a partir de un proceso llamado “Transesterificación”, que consiste en combinar los aceites con un alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metil éster. Los productos formados son: glicerina y metil éster. La glicerina, en este caso, es un subproducto que puede ser aprovechada por la industria cosmética, química, entre otras.<sup>1</sup>

Se considera que el único combustible alternativo que puede utilizarse directamente en cualquier motor diésel, sin requerir ningún tipo de modificación siempre y cuando se utilice combinación de 5, 20 y 50%. Hoy en día, dichos motores requieren un combustible que al ser sometido a distintas condiciones en las que opera, permanezca estable y por otra parte sea limpio al quemarlo. Al poseer propiedades similares al diésel derivado del petróleo; ambos se pueden mezclar en cualquier proporción, sin generar problema alguno.

Además resulta un combustible ideal por sus bajas emisiones, en las áreas marinas, parques nacionales, bosques y sobre todo en las grandes ciudades para el transporte público.<sup>2</sup>

### **2.1.1. Características del biodiésel**

El biodiésel, es un combustible de color amarillo ámbar, con una viscosidad similar al diésel su punto de ignición es de 150°C, no es inflamable ni explosivo, en contraste con el diésel de petróleo, que tiene un punto de ignición de 64°C. La característica que presenta de tener un punto elevado de inflamación, provoca que los automóviles que utilicen biodiésel sean mucho más seguros en accidentes que aquellos impulsados por diésel o gasolina. A diferencia del diésel de petróleo, el biodiésel es biodegradable y no tóxico y de manera significativa reduce las emisiones tóxicas y otras cuando se quema como combustible. La norma a seguir acerca de los requisitos del biodiésel es la ASTM D-6751 (Especificación para mezclas de combustible biodiésel (B100) para combustibles de destilación media).<sup>3</sup>

El biodiésel, en cuanto a potencia es ligeramente inferior al diésel convencional. Sin embargo, el biodiésel es mejor que éste, en términos de contenido de Azufre, punto de inflamación, contenido de aromáticos, y la biodegradabilidad. Una precaución a considerar cuando se utiliza éste biocombustible es el tipo de clima, cuando es muy frío, se vuelve gel, ocasionando problemas para el encendido del motor, debido a que presenta un punto de congelación entre 0 y -5 °C. En cuanto a costo, el biodiésel varía en función de la materia prima, área geográfica, los precios del metanol y variabilidad estacional en la producción de cultivos.<sup>4</sup>

### 2.1.2. Materia prima

Las materias primas más utilizadas para la fabricación de biodiésel son: los aceites de cocina usados, el aceite de girasol, de colza (planta perteneciente a la familia de las brasicáceas), y los extractos de plantas oleaginosas, además de cualquier materia que contenga triglicéridos. A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración de biodiésel.<sup>5</sup>

- Aceites vegetales convencionales
  - Aceite de girasol
  - Aceite de colza
  - Aceite de soja
  - Aceite de coco
  - Aceite de palma
- Aceites vegetales alternativos
  - Aceite de *Brassica carinata*
  - Aceite de *Cynara cardunculus*
  - Aceite de *Camelina sativa*
  - Aceite de *Crambe abyssinica*
  - Aceite de *Pogianus*
  - Aceite de *Jatropha curcas*
- Aceite de semillas modificadas genéticamente
  - Aceite de girasol de alto contenido oleico
- Grasas animales
  - Sebo de vaca
  - Sebo de búfalo
- Aceites de cocina usados
- Aceites de otras fuentes
  - Aceites de producciones microbianas
  - Aceites de microalgas

Los aceites de cocina usados, son la materia prima más económica, debido que al utilizarse, se evita un gasto de tratamiento como residuo, y, por otra parte, se disminuye la contaminación que ocasionan.

En cuanto a otros aceites y grasas, se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol o de *Camelina sativa*, mejoran la operatividad del biodiésel a bajas temperaturas, pero disminuyen su estabilidad a la oxidación, que se traduce en un índice de yodo elevado. Por este motivo, se pueden considerar como materias primas para producir biodiésel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que hayan sido modificados genéticamente para reducir esta proporción de ácidos grasos.<sup>5</sup>

#### **2.1.3. Ventajas medio ambientales**

- Se trata de un combustible 100% vegetal y 100% biodegradable, es una energía renovable e inagotable, no genera residuos tóxicos ni peligrosos.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> están, entre un 20 y un 80% menos que las producidas por los combustibles derivados del petróleo tanto en el ciclo biológico en su producción como en su uso. Asimismo, se reducen las emisiones de dióxido de Azufre en casi 100%.
- El biodiésel, como combustible vegetal no contiene ninguna sustancia nociva, ni perjudicial para la salud, a diferencia de los hidrocarburos, que tienen componentes aromáticos y bencenos (cancerígenos). La no emisión de estas sustancias contaminantes disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias.<sup>4</sup>

#### **2.1.4. Ventajas económicas**

- Elaborar biodiésel a partir de los aceites vegetales, se contribuye de manera significativa al suministro energético sustentable, lo que permite reducir la dependencia del petróleo, incrementando la seguridad y diversidad en los suministros, así como el desarrollo socioeconómico del área rural (producción de oleaginosas con fines energéticos).
- El uso de biodiésel puede extender la vida útil de motores porque posee un alto poder lubricante y protege el motor reduciendo su desgaste así como gastos de mantenimiento. También es importante destacar el poder detergente del biodiésel, que mantiene limpios los sistemas de conducción e inyección del circuito de combustible de los motores.<sup>4</sup>

#### **2.1.5. Ventajas en seguridad y transporte**

- El transporte del biodiésel es más seguro debido a que es biodegradable.
- En caso de derrame de este combustible en aguas de ríos y mares, la contaminación es menor que los combustibles fósiles.
- No es una mercancía peligrosa ya que su punto de inflamación está por encima de 150°C; por lo que su almacenamiento y manipulación son seguras, en comparación con la gasolina y el diésel.
- Por su composición vegetal, es inocuo con el medio, es neutro con el efecto invernadero y es totalmente compatible para ser usado en cualquier motor diésel, sea cual sea su antigüedad y estado.

- Se puede almacenar y manejar de la misma forma que cualquier combustible diésel convencional.<sup>4</sup>

### **2.1.6. Aplicaciones del biodiésel**

- Alquiler de autos movidos a biodiésel. Comenzó la oferta en Maui (Hawai) y Los Ángeles en los EEUU. Son vehículos que alcanzan una autonomía entre 400 y 800 millas por tanque, teniendo en cuenta el valor actual de la gasolina.
- Calefacción para el hogar en base a biodiésel. Mucha gente está apuntando sus ojos hacia el biodiésel como una alternativa para la calefacción de la casa. Las calderas a petróleo pueden funcionar bien con biodiésel (B20), combustible fabricado con 80% de aceite de petróleo y 20% de biodiésel. Hay quienes han reformado sus calderas para biodiésel (B100), un combustible realizado totalmente con aceites vegetales, más limpio que el petróleo convencional.
- Generadores de electricidad con base en combustible biodiésel, estos son una alternativa superior al tradicional quemado de carbón mineral. El biodiésel es más económico, además es limpio y renovable para generar electricidad.
- Camiones de transporte alimentados con biodiésel. Poco a poco, camiones de transporte de carga cambian de diésel a biodiésel, los beneficios que obtienen son numerosos, para no mencionar las ventajas de ayudar al medio ambiente y reducir la dependencia de petróleo extranjero mientras se ahorra dinero.
- Maquinaria agrícola: Aprovecha el aceite biodiésel que ayuda a producir, en los motores de los tractores y las diferentes máquinas del campo, en bombas de irrigación, generadores, sistemas para irrigación, que habitualmente venían usando combustible diésel, ahora el uso de aceite biodiésel como combustible para conseguir energía, cierra un círculo virtuoso en la agricultura, desde productores a consumidores.
- Embarcaciones de fletes comerciales como transbordadores, yates de paseo, botes de vela y de motor son todos candidatos al uso de aceite biodiésel como combustible alternativo. La empresa "Pacific Whale Foundation", localizada en Hawai (EEUU) emplea también el biodiésel en sus barcos.
- Aditivos lubricantes en base a aceite biodiésel, porque es un buen lubricante en comparación al de uso actual en base a petróleo poco sulfurado, los inyectores de combustible y otros tipos de bombas de combustible, pueden perfectamente ser lubricados con aceite biodiésel. Con los aditivos correctos, el desempeño del encendido puede mejorar, haciendo los motores más durables.
- Otras aplicaciones se han pensado, como aditivo para la tolva de concreto y los tractores de asfalto. Por las propiedades solventes, limpia las partes mecánicas con seguridad reduciendo la irritación de ojos asociada con otros limpiadores.<sup>2</sup>

### **2.1.7. Obtención de biodiésel**

La reacción química como proceso industrial utilizado en la producción de biodiésel, es la transesterificación (ver Figura 1), que consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido se transforma sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico se libera. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor

donde se producen las reacciones y en fases posteriores la separación, purificación y estabilización.

Las tecnologías existentes, pueden combinarse de diferentes maneras cambiando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. La elección de la tecnología estará en función de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador. En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación (utilización al mismo tiempo de aceites refinados y reutilizados) suelen utilizar procesos por lotes o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación continua y uniforme.<sup>5</sup>



Figura 1. Reacciones químicas de transesterificación<sup>5</sup>

### 2.1.8. Balance energético de la producción de biodiésel

El balance energético del biodiésel, considerando la diferencia entre la energía que produce 1kg de biodiésel y la energía necesaria para la producción del mismo, desde la fase agrícola hasta la fase industrial es positivo al menos en un 30%. Por lo tanto puede considerarse una actividad sustentable.

Además de las condiciones favorables desde el punto de vista ecológico y energético merece destacarse la posibilidad del empleo inmediato en los motores. El biodiésel se quema perfectamente sin requerir ningún tipo de modificación en motores existentes pudiendo alimentarse alternativamente con el combustible diésel o en mezcla de ambos. Esta es la diferencia importante respecto de otras experiencias de sustitución de combustibles como la del

bioetanol, donde es necesario efectuar en los motores modificaciones irreversibles. El empleo de biodiésel aumenta la vida de los motores debido a que posee un poder lubricante mayor, mientras que el consumo de combustible, la autoignición, la potencia y el torque del motor permanecen inalterados.

### 2.1.9. Importancia de los trabajos de investigación de corrosión por biodiésel

El incremento poblacional y la creciente demanda de energía en el sector transporte han provocado un agotamiento acelerado de las reservas de combustibles fósiles. El consumo elevado de combustibles fósiles en motores de automóviles, ocasiona también la contaminación del medio ambiente. Estos hechos han alentado a los investigadores a buscar combustibles alternativos que prometan una relación armoniosa con el desarrollo sustentable, la conversión de energía, la eficiencia y la conservación del medio ambiente. El biodiésel es un tipo de combustible prometedor que puede cumplir con esta necesidad.<sup>6</sup> Está reportado que existen algunas materias primas potenciales y disponibles para su uso en la obtención de biodiésel. Estos incluyen varios tipos de aceites vegetales, así como grasas animales.

Las fuentes comunes de biodiésel actualmente bajo investigación incluyen el aceite de soya,<sup>7-8</sup> girasol, maíz, aceite usado y aceite de oliva,<sup>9-10</sup> aceite de colza,<sup>11-13</sup> ricino, aceite de lesquerella,<sup>14</sup> aceite semilla de algodóncillo (*Asclepias*),<sup>15</sup> *Jatropha curcas*,<sup>16</sup> *Pongamia glabra* (*Karanja*), *Madhuca indica* (*Mahua*) y *Salvadora oleoides*,<sup>17</sup> aceite de palma,<sup>18-20</sup> aceite de linaza,<sup>21</sup> etc. En general, el biodiésel derivado de estas fuentes se define como ésteres de ácidos grasos monoalquílicos de cadena larga.<sup>22</sup> Los ésteres monoalquílicos son las especies químicas principales del biodiésel, dándole propiedades similares al combustible diésel,<sup>23</sup> este puede utilizarse en los motores modernos a diésel en su forma pura (B100) o puede ser mezclado con diésel de petróleo.<sup>24</sup>

Como se menciona anteriormente, Además de ser fuente de energía renovable, el biodiésel ofrece una serie de ventajas. Es biodegradable, no tóxico, tiene mayor punto de inflamación, reduce la emisión de gases contaminantes, amigable ecológicamente con el diésel de petróleo.<sup>25-</sup><sup>27</sup> Pero al mismo tiempo, también tiene algunas características desfavorables, como la inestabilidad oxidativa, propiedades pobres a baja temperatura como disolvente. Proporciona energía y torque ligeramente más bajos y un mayor consumo de combustible.<sup>27</sup> Las diferencias entre el diésel de petróleo y el biodiésel pueden atribuirse a su naturaleza química. Petrodiésel se compone de cientos de compuestos con puntos de ebullición de temperaturas diferentes (determinado por el proceso de refinación de petróleo y material de petróleo crudo). El biodiésel esta compuesto principalmente de cadenas largas de carbono de ésteres de alquilo C16-18 (determinada totalmente por la materia prima).<sup>28</sup> Además de los componentes principales de ésteres grasos, componentes menores del biodiésel incluyen monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos residuales resultantes de la reacción de transesterificación, metanol, ácidos grasos libres, esteroides, etc.<sup>29</sup>

Las características del biodiésel, descritas anteriormente causan una serie de problemas operativos en los motores, incluyendo incompatibilidad con materiales metálicos y elastómeros, depósitos duros en motores, carbonizado del inyector, taponamiento del filtro y del anillo del pistón.<sup>30-31</sup> Diversos estudios<sup>32-33</sup> muestran que diferentes características de biodiésel, como inestabilidad térmica, oxidación, polimerización, absorción de agua, incremento de la acidez, son la principal preocupación para garantizar propiedades estables del combustible durante su aplicación.



La compatibilidad de biodiésel con los materiales utilizados actualmente para automóviles es un problema. Aun cuando se han realizado estudios para analizar los problemas de incompatibilidad de los materiales, la interacción entre el biodiésel y los materiales del sector automotriz aún está lejos de ser comprendida totalmente. Los autores del presente capítulo han evaluado la interacción del acero inoxidable ferrítico y el aluminio con biodiésel, como materiales sugeridos para la fabricación de recipientes de almacenamiento que se utilizan en gran parte de piezas del motor respectivamente.

Diversos componentes de motores diésel están hechos de una variedad de materiales, tales como: metales, no metales y elastómeros. Las partes principales del motor / vehículo que están en contacto con el combustible son: depósito de combustible, bomba de alimentación de combustible, líneas de combustible, filtro de combustible, inyector de combustible al cilindro, pistón y sistema de escape. Estas piezas de motor / vehículo están hechas de metal (acero, acero inoxidable, cobre, aluminio, aleación base cobre, aleación base aluminio, aleación base hierro, fundición de hierro gris, fundición de hierro especial, fundición de aluminio, aluminio forjado, fundición de aluminio en arena, fundición de aluminio y fibra de aluminio y materiales no metálicos: elastómeros, plásticos, pintura, revestimiento, corcho, caucho, fibra cerámica y papel. El combustible entra en contacto con las diversas piezas del motor y sus accesorios variando la temperatura, velocidad, carga deslizante, y el estado físico. Se ha encontrado que las impurezas en el biodiésel o la degradación del biodiésel debida a la oxidación incrementa la corrosividad del combustible.<sup>34</sup>

Lo anterior se asocia con investigaciones que involucran metales y no metales en contacto con biodiésel. Cada autor menciona diferentes resultados, sin embargo la mayoría de autores coinciden que el principal factor para generarse el fenómeno de corrosión es el agua y los ácidos grasos encontrados en forma libre, que al estar en contacto con distintos materiales reaccionan de acuerdo a su composición química. Y no solo eso, también se reporta que el agua en el biodiésel es indeseable debido a que ésta promueve el crecimiento de micro-organismos generadores de corrosión.<sup>35</sup>

Tsuchiya et al., afirman que el proceso de oxidación que presenta el biodiésel, provoca un aumento en el contenido de agua libre, además de convertir los ésteres en diferentes mono - ácidos carboxílicos como el ácido fórmico, ácido acético, ácido propiónico y ácido caproico entre otros, que son responsables de aumentar la corrosión. Y que también estos mismos ácidos generan corrosión por picaduras sobre la superficie de un metal, dejando huecos, los cuales pueden reducirse mediante la prevención de la oxidación del biodiésel a través del uso de antioxidantes.<sup>36</sup>

Por su parte Díaz-Ballote et al., encontraron que la interacción de diversas características, tales como cambios en el valor de TAN (número de ácidos totales), el contenido de agua, el Oxígeno disuelto en biodiésel, la oxidación y la presencia de especies de metales, así como moléculas insaturadas; aumentan la corrosividad provocada por el biodiésel. Y que un factor que la disminuye, es un contenido de impurezas bajo, cuando se procesa el biodiésel.<sup>37-38</sup> Otros artículos sobre combustibles, reportan que el biodiésel está constituido por diferentes tipos y cantidades de ácidos grasos saturados e insaturados. Estos últimos al ser insaturados, presentan dobles enlaces en sus estructuras y son los más susceptibles a la oxidación, ejemplo de ello, el aceite de soja y el aceite de girasol.<sup>35</sup>

Asociado a lo anterior Labeckas y Slavinskasthe, probaron que el aceite de colza, contiene muchos ácidos grasos de cadena larga y una cantidad 2,7 veces mayor de agua, que incrementa

significativamente su densidad y viscosidad, reduciendo el número de cetano, y estimulando la acidez y así mismo la actividad de la corrosión.<sup>39</sup> Una aportación más es la de Winfried et al., quien determino que los ácidos grasos libres no esterificados y diferentes tipos de sales ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), pueden causar corrosión en un motor y catalizar procesos de oxidación.<sup>40-41</sup>

Por otra parte, respecto al comportamiento de los materiales en general, se reporta que el Bronce, Latón, Cobre, Plomo, Estaño y Zinc se corroen en biodiésel. Estos elementos aceleran la oxidación y crean sedimentos, sin embargo, materiales como, Aluminio, acero inoxidable se reportan como materiales compatibles. Sin embargo el acero al Carbono no es recomendable debido a que sufre de lixiviación por parte del Hierro.<sup>42</sup> Diaz-Ballote et al. Estudiaron la corrosión del Aluminio puro en biodiésel elaborado a base de aceite de canola mediante técnicas electroquímicas. Ellos observaron que la velocidad de corrosión del Aluminio dependía fuertemente del nivel de impurezas en el biodiésel, originadas a partir del proceso de transesterificación. Por ello recomiendan una limpieza del biodiésel mediante el proceso de lavado consiguiendo una disminución enorme en la velocidad de corrosión.<sup>35-38</sup>

Sin embargo, otros estudios realizados por M.A. Fazal et al., para la determinación de las características corrosivas del Aluminio (99% comercialmente puro), Cobre y acero inoxidable (316); en contacto con diésel y biodiésel de palma, tras un tiempo de exposición de 1200 horas. Reportan que la velocidad de corrosión del Cobre y Aluminio en contacto con biodiésel es mucho mayor que la presentada con diésel, mientras que el acero inoxidable no muestra cambios significativos. Las velocidades de corrosión para Cobre, Aluminio y acero inoxidable son 0.586, 0.202 y 0.015 mm/año respectivamente.<sup>42</sup>

Para Kaul et al., utilizando biodiésel a partir de *Jatropha curcas*, *Karanja*, *Mahua* y *Salvadora*, para un tiempo de 12600 horas de exposición, se obtienen las siguientes velocidades de corrosión 0.0784, 0.0065, 0.1329 y 0.1988 mm/año.<sup>43-44</sup>

Comparando los anteriores resultados de velocidad de corrosión, con los obtenidos por los autores de este capítulo de libro, 2.60E-15 mm/año velocidad mínima y 1.03 mm/año velocidad máxima, para la velocidad de corrosión del Aluminio con un tiempo de exposición de 1492 horas (63 días) en biodiésel producto de aceites de cocina utilizados. Se deduce que el biodiésel menos corrosivo es el elaborado a partir de aceites de cocina utilizados, seguido por el elaborado a partir de *Jatropha curcas*, *Karanja*, *Mahua* y *Salvadora* y por ultimo el biodiésel de palma esto debido a la menor cantidad de humedad que contenía la muestra de biodiésel utilizada por los autores de este capítulo.

Este ultimo compuesto es un factor muy importante por ello se determino el porcentaje de humedad utilizando el método AOCS Ca 2b-38, del cual resulto que el biodiésel contiene 1.038 % de humedad, que se considera elevado de acuerdo con las normas ASTM D975 y D6751<sup>44-45</sup> las cuales permiten un 0.05% en volumen máximo.<sup>42</sup> Por ello se asocia que los resultados del análisis mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) presenten crecimiento de bacterias en algunas muestras, además de depósitos carbonosos, presencia de Oxígeno y otros elementos como el Cloro y Azufre (provenientes de la materia prima del biodiésel) que estén contribuyendo a la presencia del fenómeno de la corrosión.

### 2.1.10. Resultados

Cabe mencionar que los resultados fueron obtenidos mediante la técnica gravimétrica recomendada por la norma ASTM G1, NACE TMO 169 y por Meas et al.,<sup>46-48</sup> las Figuras 2 y 3 muestran las características de los testigos y el dispositivo de montaje, mientras que la Figura 4 muestra la gráfica de los resultados obtenidos por esta técnica.

Se prepararon 32 placas de acero inoxidable y 32 de aluminio con las siguientes dimensiones 2.0 x 2.0 x 0.1 cm con un barreno de 2 mm de diámetro en una de las esquinas como se muestra en la Figura 2 (ASTM G1 y NACE TMO 169). La composición química de cada uno de los materiales usados se reporte en las Tablas 1 y 2. El biodiésel empleado en este trabajo fue donado por la empresa MORECO, que lo produce a partir de aceite de cocina.

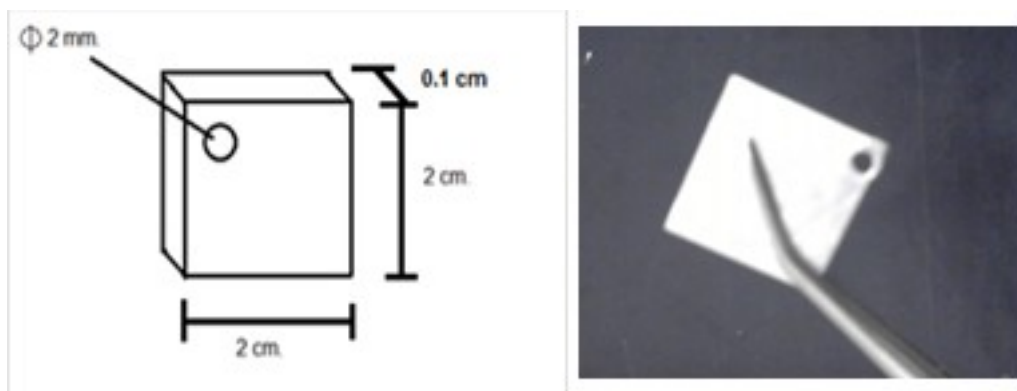


Figura 2. Dimensiones de muestras de acero inoxidable y aluminio

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Al	% Co	% Cu	% Nb	% Ti	% V	% Pb	% Fe
0.0207	0.4526	0.2074	0.0623	0.0299	>6.00	0.06	0.2352	0.0163	0.0341	0.1208	0.0995	0.1059	0.1000	0.0060	85.8

Tabla 1. Composición química de la muestra de acero inoxidable

% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
0.1354	0.3437	0.0285	0.0102	< 0.0050	< 0.0050	0.0020	< 0.0010	< 0.0020	0.0251	0.0076	< 0.0020	0.0001	99.4

Tabla 2. Composición química de la muestra de aluminio

#### Técnica gravimétrica

Antes de iniciar el ensayo, las piezas deben estar perfectamente limpias, secas y libres de cualquier sustancia, no fue necesario lijarlas ya que mostraban una textura tersa y lisa, solo se uso detergente en polvo, agua destilada y alcohol etílico. La limpieza se llevó a cabo por medio de un cepillo de cerdas plásticas para asegurar una limpieza adecuada. Una vez limpias las placas la manipulación fue con guantes y pinzas de disección. Para esta prueba, cada una de las 32 piezas limpias y secas se pesan tres veces se registran los pesos y se cálculo del promedio de cada una de ellas, para pesar las piezas se uso una balanza analítica marca Voyager. Una vez registrados los valores, las placas se sujetaron con hilo de nylon a las tapas de los recipientes de vidrio; que contenían biodiésel garantizando que las piezas quedaran completamente

sumergidas en el biodiésel. Se colocaron 2 placas por recipiente evitando el contacto entre ellas y con las paredes del recipiente, al final se sellan los recipientes y se inicia el ensayo, cabe mencionar que el ensayo se realizó a temperatura ambiente (Figura 3).



Figura 3. Piezas de acero inoxidable sumergidas en recipientes de vidrio sellados

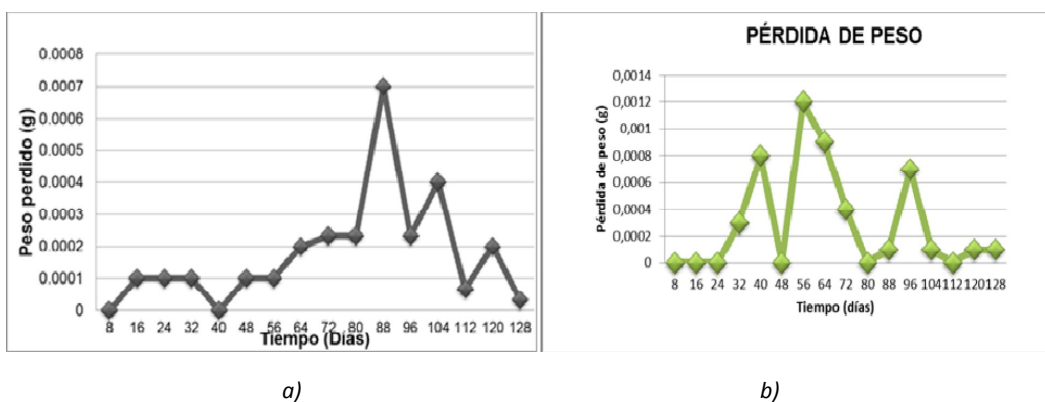


Figura 4. a) Gráfico de pérdida de peso para acero inoxidable y b) Gráfico de pérdida de peso para aluminio

Las placas fueron retiradas del recipiente cada 8 días, aun cuando la literatura recomienda que las piezas estén sumergidas en periodos de tiempos cortos o durante 90 días en un año.<sup>46-48</sup> Otra característica por la que se decidió retirar las placas cada 8 días fue debida a que esta reportado que el biodiésel se degrada incrementando la acidez. De acuerdo con los tiempos seleccionados las muestras fueron retiradas, observando la superficie para buscar productos de corrosión, y a simple vista no se observaron rastros de productos de corrosión; por lo que se procedió a enjuagar con jabón y se tallaron con cepillo de cerdas de plástico para un segundo enjuague con agua destilada y alcohol etílico y retirar cualquier rastro de grasa y se secaron con aire. Una vez terminado el proceso de limpieza, se pesaron inmediatamente en la balanza analítica y se registro su peso, las placas se pesaron tres veces para después obtener un promedio de los pesos. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tiempo (días)	Acero inoxidable		Aluminio	
	Pérdida de peso (g)	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	Pérdida de peso (g)	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )
8	0	0.0000	0	0.00000
16	0.0001	0.0004	0	0.00000
24	0.0001	0.0002	0	0.00000
32	0.0001	0.0002	0.0003	0.00054
40	0	0.0000	0.0008	0.00116
48	0.0001	0.0001	0	0.00000
56	0.0001	0.0001	0.0012	0.00125
64	0.0002	0.0002	0.0009	0.00082
72	0.0004	0.0002	0.0004	0.00032
80	0.0003	0.0002	0	0.00000
88	0.0007	0.0005	0.0001	0.00007
96	0.0003	0.0002	0.0007	0.00042
104	0.0004	0.0002	0.0001	0.00006
112	0.00005	0.00025	0	0.00000
120	0.0002	0.0001	0.0001	0.00005
128	0.0001	0.00005	0.0001	0.00005

Tabla 3. Pérdida de peso y velocidad de corrosión de las placas de acero inoxidable y aluminio

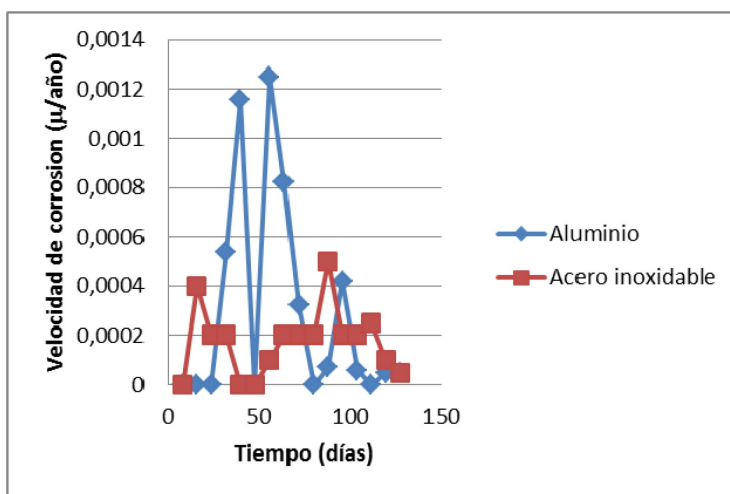


Figura 5. Gráfico de velocidad de corrosión acero inoxidable y aluminio

Estos valores son similares a los reportados por Fazal et al.,<sup>42</sup> en magnitud aunque las velocidades de corrosión son más bajas, que las reportadas por Fazal. Por otro lado, Kaul.<sup>43-44</sup> describe que la presencia de ácidos grasos libres, trazas de oxígeno y la absorción de agua incrementan la corrosividad del biodiésel, comparada con el diésel de petróleo, sugiere que el biodiésel es más corrosivo debido a la presencia de compuestos ácidos insaturados debido al incremento en el número total de acidez, este aumento indica oxidación del biodiésel. Tsuchiya et al. Reporta que el incremento en el valor de número de acidez total y la retención de agua hacen más corrosivo al biodiésel.<sup>36</sup>

### 3. Conclusiones

La técnica gravimétrica utilizada en los trabajos permitió identificar el comportamiento de la corrosión de la aleación de aluminio y acero inoxidable 439 en contacto con biodiésel. Los resultados muestran que el material después de estar expuesto durante un período de 128 días presenta una tendencia a corroerse. Sin embargo los valores obtenidos no aportan información del mecanismo de corrosión.

El comportamiento anterior se asocia con la composición química de cada placa, la cual debido a la heterogeneidad del material, causada por el proceso de fabricación, permitiría que se presente el fenómeno de corrosión. Y no solo los elementos presentes en el material, sino también los involucrados en el biodiésel, que por su parte esta compuesto por diferentes tipos de ésteres, que con el paso del tiempo provocan envejecimiento u oxidación de estos, lo que pudiese generar materia in-saponificable como: ácidos grasos, gomas (polipéptidos, fosfátidos, lecitina, proteínas, mucílagos, esteroides e hidrocarburos), sedimentos, óxidos y agua.

Este último componente es un factor muy importante por ello se dedujo el porcentaje de humedad mediante la aplicación del método AOCS Ca 2b-38, del cual resultó que el biodiésel contiene 1.038% de humedad, lo que concluye que es un valor alto de acuerdo a lo que marca las normas ASTM D975 y D6751, las cuales permiten un 0.05% en volumen máximo. Por ello se asocia que los resultados del análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) presenten crecimiento de bacterias en algunas muestras, además de depósitos carbonosos, presencia de Oxígeno y otros elementos como el Cloro y Azufre (provenientes de la materia prima del biodiésel) que estén contribuyendo a la presencia del fenómeno de la corrosión.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa MORECO, la donación del biodiésel para realizar los experimentos. También agradecen al M. I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo del laboratorio de fundición del departamento de Metalurgia de la Facultad de Química de la UNAM; Al Instituto Mexicano del Transporte y al Centro de Física Avanzada y Tecnología Avanzada por las facilidades otorgadas.

### Referencias

1. Gupta RB, Demirbas A. *Gasoline diésel and Ethanol Biofuels From Grasses and Plants*. Cambridge University Press. 2010: 22-36. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511779152>
2. Ciria JI. *Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel*. Disponible en web: [www.wearcheckiberica.es/combustibles/](http://www.wearcheckiberica.es/combustibles/). Fecha último acceso: Agosto 2011.
3. ASTM D6751-12. *Standard Specification for Biodiésel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*.
4. Knothe G, Von Gerpen J, Krahl J. *The Biodiésel Handbook*. Champaign, Illinois Edition, 2005: 84-87. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439822357>
5. *Biodiésel, materias primas para su producción* Disponible en web: [www.biodisol.com](http://www.biodisol.com). Fecha último acceso: Julio 2011.

6. Haseeb ASMA, Fazal MA, Jahiril MI, Masjuki HH. *Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review*. Fuel. 2011; 90: 922-31.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.042>
7. Valente OS, Silva da MS, Pasa VMD, Belchior CRP, Sodre JR. *Fuel consumption and emissions from a diesel power generator fuelled with castor oil and soybean biodiesel*. Fuel. 2010; 89: 3637-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.041>
8. He CH, Ge Y, Tan J, You K, Han X, Wang J. *Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions of diesel engine fueled with biodiesel and diesel*. Fuel. 2010; 89: 2040-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.014>
9. Anastopoulos G, Lois E, Karonis D, Kalligeros S, Zannikos F. *Impact of oxygen and nitrogen compounds on the lubrication properties of low sulfur diesel fuels*. Energy. 2005; 30: 415-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.026>
10. Karonis D, Anastopoulos G, Zannikos F, Stournas S, Lois E. *Determination of physical properties of fatty acid ethyl esters (FAEE) – diesel fuel blends*. SAE Technical Paper No. 2009-01-1788.
11. Kousoulidou M, Fontaras G, Ntziachristos L, Samaras Z. *Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions*. Fuel. 2010; 89: 3442-9.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.034>
12. Mamat R, Abdullah NR, Hongming Xu, Wyszynski ML, Tsolakis A. *Effect of fuel temperature on performance and emissions of a common rail diesel engine operating with rapeseed methyl ester (RME)*. SAE Technical Paper No. 2009-01-1896.
13. Jin F, Zeng X, Cao J, Kawasaki K, Kishita A, Tohji K et al. *Partial hydrothermal oxidation of unsaturated high molecular weight carboxylic acids for enhancing the cold flow properties of biodiesel fuel*. Fuel. 2010; 89: 2448-54.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.004>
14. Goodrum JW, Geller DP. *Influence of fatty acid methyl esters from hydroxylated vegetable oils on diesel fuel lubricity*. Bioresour Technol. 2005; 96: 851-5.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.07.006>
15. Holser RA, Harry-O’Kuru R. *Transesterified milkweed (Asclepias) seed oil as a biodiesel fuel*. Fuel. 2006; 85: 2106-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.001>
16. Ilham Z, Saka S. *Two-step supercritical dimethyl carbonate method for biodiesel production from Jatropha curcas oil*. Bioresour Technol. 2010; 101: 2735-40.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.053>
17. Kaul S, Saxena RC, Kumar A, Negi MS, Bhatnagar AK, Goyal HB et al. *Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts*. Fuel Process Technol. 2007; 88: 303-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.10.011>
18. Benjumea P, Agudelo J, Agudelo A. *Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends*. Fuel. 2008; 87: 2069-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.11.004>
19. Tan KT, Lee KT, Mohamed AR. *A glycerol-free process to produce biodiesel by supercritical methyl acetate technology: an optimization study via response surface methodology*. Bioresour Technol. 2010; 101: 965-9.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.004>
20. Boey P, Maniam GP, Hamid SA. *Biodiesel production via transesterification of palm olein using waste mud crab (Scylla serrata) shell as a heterogeneous catalyst*. Bioresour Technol. 2009; 100: 6362-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.036>
21. Agarwal AK. *Performance evaluation and tribological studies on a biodiesel fuelled compression ignition engine*. PhD thesis. Center for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Delhi, India; 1999.

22. Rashid U, Anwar F, Bryan RM, Knothe G. *Moringa oleifera* oil: a possible source of biodiesel. *Bioresour Technol.* 2008; 99: 8175-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.066>
23. Fernando S, Karra P, Hernandez R, Kumar SJ. *Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality.* *Energy.* 2007; 32: 844-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.019>
24. Lebedevas S, Vaicekaskas A. *Research into the application of biodiesel in the transport sector of Lithuania.* *Transport.* 2006; 2: 80-7.
25. Knothe G. "Designer" biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. *Energy Fuels.* 2008; 22: 1358-64. <http://dx.doi.org/10.1021/ef700639e>
26. Fazal MA, Haseeb ASMA, Masjuki HH. *Biodiesel feasibility study: an evaluation of material compatibility, performance, emission and engine durability.* *Renew Sustain Energy Rev.* In press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.004>
27. Demirbas A. *Progress and recent trends in biofuels.* *Prog Energy Combust Sci.* 2007; 33: 1-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2006.06.001>
28. Graboski MS, McCormick RL, Alleman TL, Herring AM. *The effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC series 60 diesel engine.* National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-2003-510-31461.
29. Knothe G. *Biodiesel and renewable diesel: a comparison.* *Prog Energy Combust Sci.* 2010; 36: 364-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.004>
30. Terry B, McCormick RL, Natarajan M. *Impact of biodiesel blends on fuel system component durability.* SAE Technical Paper No. 2006-01-3279.
31. Mushrush GW, Mose DG, Wray CL, Sullivan KT. *Biofuels as a means of improving the quality of petroleum middle distillate fuels.* *Energy Sources.* 2001; 23: 649-55. <http://dx.doi.org/10.1080/00908310152004746>
32. Tao Y. *Operation of a cummins N14 diesel on biodiesel: performance, emissions and durability.* National Biodiesel Board, Ortech Report No. 1995-95-E11-B004524.
33. Monyem A, Van Gerpen JH. *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions.* *Biomass Bioenergy.* 2001; 20: 317-25. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00095-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00095-7)
34. Singh B, Korstad J, Sharma YC. *A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2012; 16: 3401-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.042>
35. Haseeb ASMA, Fazal MA, Jahirul MI, Masjuki HH. *Compatibility of automotive materials in biodiesel.* Elsevier, 2010.
36. Tsuchiya T, Shiotani H, Goto S, Sugiyama G, Maeda A. *Japanese standards for diesel fuel containing 5% fame blended diesel fuels and its impact on corrosion.* SAE Technical Paper No. 2006-01-3303.
37. Haseeb ASMA, Masjuki HH, Ann LJ, Fazal MA. *Corrosión characteristics of copper and leaded bronze in palm biodiesel.* Elsevier, 2009.
38. Diaz-Ballote L, Lopez-Sansores JF, Maldonado-Lopez L, Garfías-Mesias LF. *Corrosion behavior of aluminium exposed to a biodiesel.* *Electrochemistry Communications.* 2009; 11: 41-4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elecom.2008.10.027>
39. Labeckas G, Slavinskis S. *Performance of direct-injection off-road diesel engine on rapeseed oil.* *Renew Energ.* 2006; 31(6): 849-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.009>



40. Winfred R, Roland MP, Alexander D, Jürgen LK. *Usability of food industry waste oils as fuel for diésel engines*. J Environ Manage. 2008; 86(3): 427-34.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.042>
41. Karamangil MI, Taflan RA. *Experimental investigation of effect of corrosion on injected fuel quantity and spray geometry in the diésel injection nozzles*. Elsevier, 2011.
42. Fazal MA, Hasseb ASMA, Masjuki HH. *Comparative corrosive characteristics of petroleum diésel and palm biodiésel for automotive materials*. Elsevier, 2010.
43. Kaul S, Saxena RC, Kumar A, Negi MS, Bhatnagar AK, Goyal HB, Gupta AK. *Corrosion behavior of biodiésel from seed oils of Indian origin on diésel engine parts*. Elsevier, 2006.
44. Kaul S, Saxena RC, Kumar A, Negi MS, Bhatnagar AK. *Corrosion behavior of biodiésel from seed oils of Indian origin on diésel engine parts*. Fuel Process Technol. 2007; 88: 303-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.10.011>
45. ASTM D975. *Standard Specification for diésel Fuel Oils , biodiésel, biodiésel blend, diésel, fuel oil, petroleum and petroleum products*.
46. ASTM G1. *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. 2003.
47. NACE standard TM0169. *Laboratory Corrosion Testing of Metals for the Process Industries*. 2000
48. Meas Y, López W, Rodríguez P, Ávila J, Genescá J. *Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión*. Ingeniería hidráulica en México. 1991: 21-35.