

# EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DE ACERO AL CARBONO ASTM 1005 Y COBRE EXPUESTOS A BIODIESEL DE JATROPHA

LIBIA MARÍA BAENA PÉREZ<sup>1</sup>, JORGE ANDRÉS CALDERÓN GUTIÉRREZ<sup>2</sup>

*1Grupo de Calidad, Metrología y Producción, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín, Colombia.*

*2Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales-CIDEMAT, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Tel +57-4405290*

*E-mails: [libiabaena@itm.edu.co](mailto:libiabaena@itm.edu.co) / [andres.calderon@udea.edu.co](mailto:andres.calderon@udea.edu.co).*

## RESÚMEN

El carácter corrosivo del biodiesel de Jatropha es un tema de interés desde el punto de vista de compatibilidad de materiales. El biodiesel de Jatropha posee una mayor cantidad de ácidos grasos insaturados oleico y linoleico en comparación con el biodiesel de palma, lo cual acelera su degradación, ya que las posiciones alílicas de los dobles enlaces presentes en los ácidos oleico y linoleico son característicamente susceptibles a la oxidación. Por tanto, es de gran importancia establecer el grado de corrosividad del biodiesel de jatropha para mejorar los materiales usados en autopartes o realizar una selección adecuada de los materiales que sean compatibles con el biodiesel. En este trabajo se evaluó el desempeño frente a la corrosión de un acero al carbono SAE 1005 y cobre electrolítico (99%). Los metales fueron evaluados mediante ensayos de inmersión estática en biodiesel de Jatropha durante 180 días a 45°C. La morfología y la composición de los productos de corrosión fueron caracterizadas mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y Raman. El acero al carbono presentó mayor deterioro por corrosión en el biodiesel de jatropha en comparación con el biodiesel de palma debido a que el biodiesel de jatropha presenta un alto grado de ácidos insaturados fácilmente oxidables, lo cual lo hace más corrosivo. Caso contrario fue observado para el cobre, el cual presentó menor deterioro por corrosión en el biodiesel de Jatropha que en el de palma. Este resultado puede ser asociado a las diferencias en la solubilidad del oxígeno en ambos biodiesel cuando están contaminados con cobre. Al parecer la solubilidad del oxígeno en el biodiesel de jatropha disminuye con la exposición del cobre.

Palabras clave: Corrosión, biodiesel de jatropha, metales, ensayo de inmersión, biocombustibles.

## EVALUATION OF CORROSION OF CARBON STEEL ASTM 1005 AND COPPER EXPOSED TO BIODIESEL DE JATROPHA.

### ABSTRACT

The corrosive nature of Jatropha biodiesel is a topic of interest from the point of view of material compatibility. Jatropha biodiesel has a higher amount of oleic and linoleic unsaturated fatty acids compared to palm biodiesel, which accelerates its degradation, since the allylic positions of the double bonds present in oleic and linoleic acids are characteristically susceptible to oxidation. Therefore, it's of great importance to establish the corrosivity degree of jatropha biodiesel to improve the materials used in auto parts or to make an adequate selection of materials that are compatible with biodiesel. In this paper, the corrosion performance of SAE1005 carbon steel and electrolytic copper (99%) was evaluated. The metals were evaluated by static immersion tests on Jatropha biodiesel for 180 days at 45 ° C. The morphology and composition of corrosion products were characterized by techniques of scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and Raman. Carbon steel showed greater corrosion deterioration in jatropha biodiesel compared to palm biodiesel because jatropha biodiesel has high degree of easily oxidizable unsaturated acids, which makes it more corrosive. Otherwise it was observed for copper, which presented less corrosion deterioration in Jatropha biodiesel than in palm. This result can be associated with the differences in oxygen solubility in both biodiesels when they are contaminated with copper. Apparently the solubility of oxygen in jatropha biodiesel decreases with copper exposure.

**Keywords:** Corrosion, jatropha biodiesel, metals, immersion testing, biofuels.

## INTRODUCCIÓN

Los aceites vegetales, son una de las materias primas renovables más promisorias para la producción de biodiesel debido a sus beneficios económicos y ambientales. Algunas de sus ventajas son la biodegradabilidad, y menor contenido de azufre y aromáticos, entre otras. Entre los aceites vegetales más investigados como fuente de combustible diesel se encuentran el aceite de palma, soja, girasol, canola, coco, colza, *Pongamia pinnata* y *Jatropha curcas* (Koh y Tinia, 2011). El aceite de *Jatropha* tiene ciertas ventajas sobre otros aceites como son la baja acidez, buena estabilidad, baja viscosidad y mayor número de cetano en comparación con el diésel, lo cual hace que éste sea una excelente materia prima para la producción de combustibles usados en motores diésel sin requerir modificaciones adicionales (Tapanes, Gomes, de Mesquita, Ceva, 2008). A pesar de todas estas ventajas, el aceite de *Jatropha* posee una alta cantidad de ácidos grasos libres, lo cual es perjudicial en cuanto al rendimiento del motor y compatibilidad de materiales (Kaul et al., 2007). El aceite de *Jatropha* tiene un alto porcentaje de los ácidos grasos insaturados oleico y linoleico lo cual hace que el biodiesel producido tenga buenas propiedades a baja temperatura. Sin embargo esto puede acelerar la degradación del biodiesel producido a partir de aceite de *Jatropha* ya que las posiciones alílicas de los dobles enlaces presentes en los ácidos oleico y linoleico son característicamente susceptibles a la oxidación (Frankel, 2014). Durante los procesos de oxidación se forman muchas especies y compuestos que aceleran el deterioro del biodiesel, por tanto la presencia de pequeñas cantidades de ácidos grasos insaturados influye fuertemente en la

degradación del biodiesel (Knothe y Dunn 2003). El biodiesel está compuesto básicamente de esteres por lo que es altamente propenso a presentar reacciones de hidrólisis en presencia de aire u oxígeno, y generar alcoholes y ácidos (Sarin, Sharma, Sinharay, Malhotra, 2007) La formación de estos compuestos aumenta la degradación del biodiesel, aumenta el grado de acidez y así su corrosividad. Sarin y col (Sarin, Arora, Singh, Sharma, Malhotra, 2009) observaron que los materiales metálicos en contacto con el combustible también influyen en la degradación del biodiesel. Ellos investigaron la influencia de cinco metales en los procesos de oxidación del biodiesel y encontraron que el cobre tiene mayor influencia en la degradación del biodiesel en comparación con níquel, hierro, manganeso y cobalto. Una gran variedad de materiales metálicos y poliméricos se encuentran en el sistema automotor, muchos de ellos están en contacto directo con el combustible. Estos materiales pueden resultar afectados en gran medida debido a la agresividad del biodiesel. Los materiales metálicos como aleaciones ferrosas y no ferrosas en contacto con el biodiesel sufren corrosión, y los materiales poliméricos pueden presentar degradación, lo cual conlleva a la pérdida de propiedades mecánicas y una adecuada funcionalidad de los materiales que hacen parte del sistema automotor (Zuleta, Baena, Ríos y Calderón, 2012). Kaul et.al., 2007 investigaron la corrosividad de aluminio en biodiesel de *Jatropha curcas*, *Pongamia glabra* (Karanja), *Madhuca indica* (Mahua) and *Salvadora oleoides* (Pilu). Ellos encontraron que el aluminio presentaba mayores velocidades de corrosión en el biodiesel de *Jatropha*, debido a que este biodiesel presenta un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados. Se ha reportado que las aleaciones ferrosas son

más resistentes al deterioro por corrosión que las no ferrosas como por ejemplo las aleaciones de cobre, aluminio y plomo (Bhardwaj, Gupta, Kumar, 2014). Se ha encontrado corrosión microbiológica en los tanques de almacenamiento de biodiesel. Este tipo de corrosión se presenta debido a la absorción de humedad del ambiente durante el almacenamiento ya que el biodiesel es altamente higroscópico (Papavinasam, Anand., Paramesh., Krausher, Li, Liu, Mani, & Krishnamurthy, 2011).

Jin, Zhou, Wu, Jiang y Ge (2015) investigaron la corrosión de un acero al carbono ASTM 1045 en biodiesel de palma y en diésel como medio de referencia. Este estudio se llevó a cabo mediante ensayos de inmersión estática durante 30, 60 y 120 días a diferentes temperaturas (27, 50 y 80 °C). Los autores encontraron que el biodiesel de palma se deteriora en mayor grado a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de exposición del acero. En este trabajo se investigó el comportamiento frente a la corrosión de un acero al carbono ASTM 1005 y un cobre en biodiesel de *Jatropha*, mediante ensayos de inmersión total estática durante 180 días a 45 °C. Estos resultados son de gran importancia para establecer la agresividad del biodiesel de *Jatropha* y el grado de deterioro de dos de los materiales más comunes en el sistema automotor que estarían en contacto directo con el combustible.

## **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

### **Ensayo de inmersión.**

El deterioro por corrosión del acero al carbono (SAE 1005, contiene 0,013% C, 0,088% Mn, 0,045% Si, 0,012% P máx, 0,009% S máx and 99,542% Fe) y cobre electrolítico (99%), fue evaluado mediante el

ensayo de inmersión estática, el cual consiste en la inmersión total de las probetas metálicas dentro de envases de vidrio que contienen los combustibles de prueba. Los envases de vidrio con capacidad de 4 litros, fueron llenados con 2 litros de biodiesel de *Jatropha* y palma puros y tapados herméticamente para evitar la entrada de humedad del ambiente. Este ensayo se llevó a cabo a 45°C, temperatura recomendada por la norma SAE 1747 (SAE J1747, 2013), durante 6 meses. Las probetas metálicas fueron cortadas con un área de exposición de 2 cm<sup>2</sup> y se realizó un agujero de 2 mm<sup>2</sup> de manera que pudieran ser colgadas dentro de los envases de vidrio. Estas probetas fueron preparadas siguiendo los procedimientos referidos en las normas ASTM G1-03 "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens" (ASTM G1-03, 2011) y ASTM G31-72 "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals" (ASTM G31-72, 2004). La evaluación de la velocidad de corrosión de los metales en mm/año se evaluó por triplicado mediante técnicas gravimétricas a diferentes tiempos de exposición (3, 6 meses) y se calculó mediante la pérdida de masa y se expresa en mm/año usando la siguiente ecuación (ASTM G1 Sección 8.1):

$$\text{Velocidad de Corrosión} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (1)$$

Donde K es una constante ( $8,76 \times 10^4$ ), T es el tiempo de exposición en horas, A es el área de la probeta metálica expuesta en cm<sup>2</sup>, W es la pérdida de masa del material expresada en gramos y D es la densidad del material expuesto en g.cm<sup>-3</sup>.

### **Combustibles de prueba.**

Los biodiesel empleados para las pruebas de corrosión, fueron obtenidos a partir de una reacción de transesterificación básica entre los aceites de *Jatropha* y palma con metanol y KOH como catalizador. Luego se realizó la separación del subproducto (glicerina), mediante un lavado con agua caliente y un secado bajo vacío. Las propiedades fisicoquímicas del biodiesel de palma y *jatropha* obtenidos se muestran en la Tabla 1. Los índices de acidez y de peróxido fueron determinados mediante titulación en un titulador automático Titrino Plus 848 (Metrohm). La viscosidad cinemática y la estabilidad oxidativa fueron determinadas siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM D445 (ASTM D445, 2006) y EN 14112 (UNE-EN14112,2017) respectivamente. Se realizó una caracterización química para determinar la composición de esteres de metilo de los biodiesel, mediante cromatografía de gases (GC) siguiendo los procedimientos descritos en la norma EN 14103(UNE-EN 14103, 2011) (ver Tabla 2), en un cromatógrafo de gases Agilent 7890A de columna capilar Agilent J & W HP-INNOWax, un detector de ionización de llama, y ácido tetradecanoico como patrón interno.

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas del biodiesel de palma y *jatropha*.

Propiedades	Palma	<i>Jatropha</i>
Índice de acidez (mg KOH/g)	0,28	0,41
Viscosidad cinemática a 40 °C	4,60	4,44
Índice de peróxido (mmol)	2,03	7,40
Estabilidad oxidativa Rancimat	12,83	3,28
Contenido de metil-esteres	98,10	97,40

**Tabla 2.** Composición química del biodiesel de palma y *jatropha* (% Masa).

Tipo de metil éster	% masa	
	<i>Jatropha</i>	Palma
Mirístico	0,15	1,03
Palmítico	17,08	43,30
Estearico	11,02	4,20
Palmitoleico	0,99	0,15
Oleico	34,29	41,80
Linoleico	36,09	9,10
Linolenico	0,39	0,15
Total saturado	28,24	48,80
Total	72,13	51,10

### Caracterización de los materiales metálicos.

Los productos de corrosión formados en las probetas metálicas durante la inmersión en el biodiesel de *Jatropha*, fueron caracterizadas mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), junto con el análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) acoplada a un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM 6490 LV, con detector de electrones secundarios y retrodispersos. El análisis de espectroscopia Raman se llevó a cabo en un espectrómetro Micro-Raman, marca Horiba Jovin Yvon, con una longitud de onda de 784 nm de la fuente de luz de un láser de argón.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

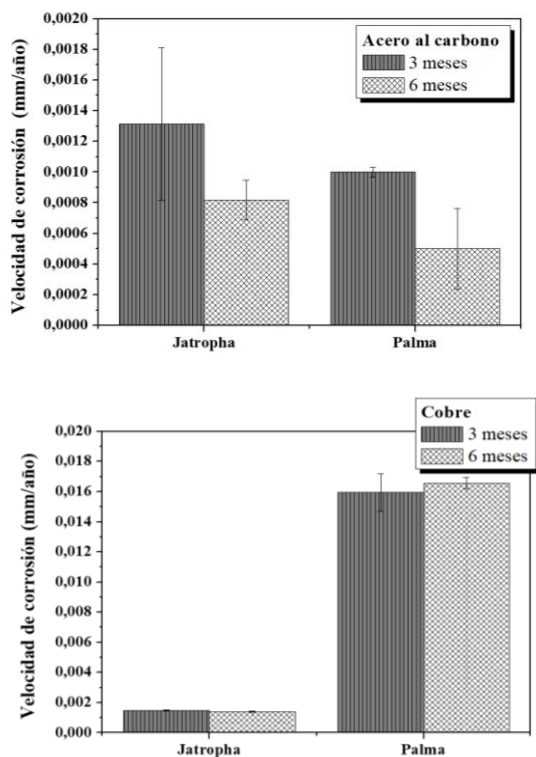
En la Figura 1 se presentan los gráficos de velocidad de corrosión de las muestras metálicas evaluadas en biodiesel de *Jatropha* y palma durante 3 y 6 meses de inmersión total a 45°C. La velocidad de corrosión del acero al carbono en *Jatropha* a 45°C tiende a disminuir con el tiempo de exposición. El acero al carbono presentó mayor deterioro

por corrosión en el biodiesel de jatropha en comparación con el biodiesel de palma. Este metal evidenció una velocidad de corrosión de  $8 \times 10^{-4}$  mm/año a los 6 meses de inmersión total en biodiesel de jatropha mientras que en el biodiesel de palma evidenció una velocidad de corrosión de  $5 \times 10^{-4}$  mm/año a los 6 meses de inmersión. La mayor corrosividad del biodiesel de jatropha se debe a que presenta un alto grado de ácidos insaturados (Oleico (C18/1) 34,29% y Linoleico (C18/2) 36,09%) en comparación con el biodiesel de palma (Oleico (C18/1) 41,8% y Linoleico (C18/2) 9,10%). Por tanto, el biodiesel de jatropha presenta una menor estabilidad oxidativa (3,28 h) en comparación con el biodiesel de palma (12,83h), es decir, el biodiesel de jatropha es más propenso a generar reacciones de oxidación, lo cual aumenta su corrosividad al formar una serie de subproductos secundarios como ácidos, ésteres, aldehídos, cetonas, lactonas, agua, etc. Todo esto depende del número y posición de los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados. La buena estabilidad del biodiesel de aceite de palma se debe a la resistencia a la auto-oxidación de sus ácidos grasos saturados (Sarin, et. al., 2007). Se observó una reducción en los valores de velocidad de corrosión con el tiempo, lo cual sugiere la formación de productos de corrosión sobre la superficie del metal. Estos productos de corrosión forman una película protectora sobre el acero lo cual conlleva a una disminución de las velocidades de corrosión del metal a los 6 meses de inmersión. El cobre fue menos susceptible al ataque por corrosión en comparación con el acero al carbono cuando es inmerso en biodiesel de jatropha. Mientras que en el biodiesel de palma el cobre presentó mayor ataque por corrosión que el acero al carbono. Este resultado fue similar a lo reportado por Fazal, Jakeria & Haseeb, (2014). La velocidad de corrosión del cobre en jatropha es de 0,0014 mm/año a los 3 meses de

inmersión y luego disminuye levemente a valores de 0,0013 a los 6 meses de exposición. Por tanto, el cobre se mantiene estable durante el tiempo del ensayo. La velocidad de corrosión del cobre en biodiesel de palma es 91% mayor que en biodiesel de jatropha. Kaul et al.,2007 investigaron la corrosividad del biodiesel obtenido a partir de diferentes materias primas tales como, jatropha, curcas, Karanja, Mahua y Salvadora y los comparó con el diésel tradicional. Ellos encontraron que el biodiesel de Jatropha curcas y Salvadora fueron los más agresivos para los materiales ferrosos y no ferrosos. Kaul reportó velocidades de corrosión para el aluminio de 0,0784 mm/año en jatropha, 0,0065 mm/año en Karanja, 0,1329 mm/año en Mahua y 0,1988 mm/año en Salvadora, durante 300 días a temperatura ambiente.

Fazal et al., 2014), reportaron que el periodo de inducción del biodiesel de palma disminuye drásticamente cuando está en contacto con el cobre en mayor grado que cuando está en contacto con acero al carbono, debido a la formación de ácido linoleato en presencia de cobre. Resultados similares fueron reportados por Sarin et al., (2009) en donde el cobre actúa como un fuerte catalizador en la disminución del periodo de inducción del biodiesel de jatropha en comparación con el acero al carbono. Estos resultados sugieren que los compuestos insaturados son reducidos en presencia de iones metálicos para formar otras moléculas las cuales parecen incrementar la polaridad del biodiesel y por tanto se da un aumento en la conductividad. Todo esto contribuye significativamente en el aumento de la corrosividad del biodiesel. En ambos biodiesel (jatropha y palma), el cobre disminuye significativamente la estabilidad oxidativa en comparación con el acero. Sin embargo, la velocidad de corrosión del cobre fue mucho menor que la del acero al carbono en el biodiesel de

jatropha, resultado totalmente contradictorio a los esperados, ya que el biodiesel de jatropha es más propenso a degradarse que el biodiesel de palma. Una explicación razonable puede ser que los iones de cobre catalizan la degradación del biodiesel de palma en mayor grado que al biodiesel de jatropha. Este hecho promueve la formación de ácidos orgánicos que aumentan la corrosión del cobre inmerso en biodiesel de palma de manera más agresiva en comparación con el biodiesel de jatropha. En general, el biodiesel de jatropha fue más agresivo para el acero al carbono y el biodiesel de palma fue más agresivo para el cobre. Fazal et.al., 2014 encontraron que la degradación del biodiesel causada por el contacto con metales puede ser diferente para cada tipo de metal, pero el factor más agravante es el contacto con metales en presencia de oxígeno disuelto, lo cual puede afectar su naturaleza corrosiva en diferentes grados.

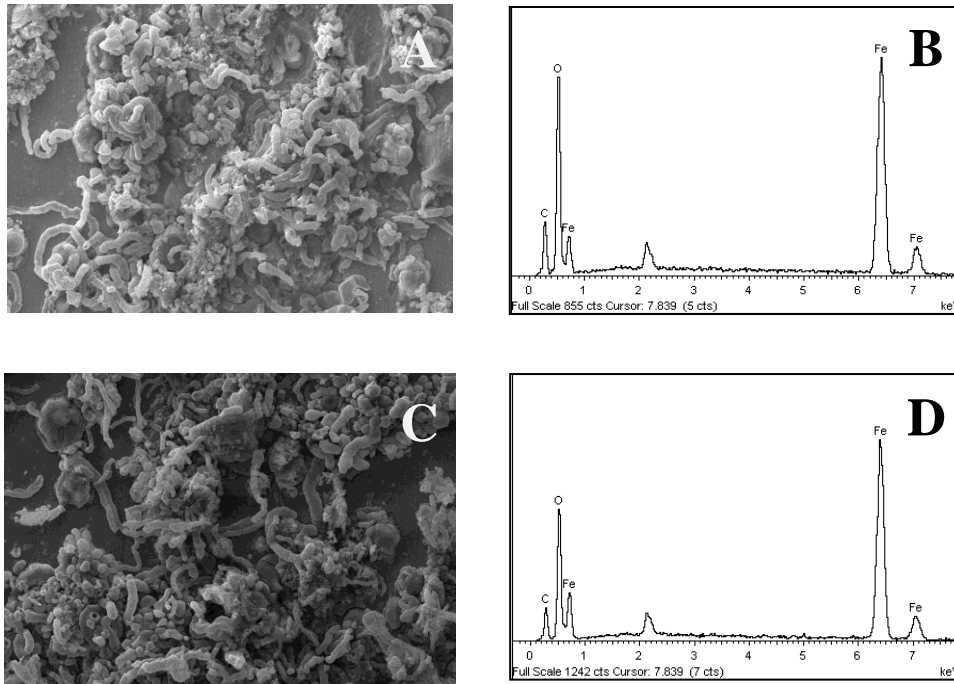


**Figura 1.** Gráficos comparativos de la Velocidad de corrosión del acero ASTM 1020 y del cobre

evaluados en biodiesel de Jatropha y palma en varios periodos de exposición a 45°C.

La Figura 2 muestra la morfología de los productos de corrosión formados sobre la superficie del acero después de 3 y 6 meses de inmersión en biodiesel de Jatropha a 45°C. Este material presentó inicialmente una morfología de corrosión localizada para luego convertirse en una corrosión generalizada con desprendimiento de productos de corrosión. Los productos de corrosión formados sobre la superficie del acero al carbono se presentan como aglomerados de partículas diferentes íntimamente mezcladas, con una variedad de formas y tamaños, predominando una morfología tipo listones y globular. Esta variedad de formas es debida a la presencia de la mezcla de varias especies en los productos de corrosión, resultado que fue confirmado por el análisis Raman (ver Figura 3). Estas especies corresponden a diferentes óxidos y oxihidróxidos los cuáles se muestran como una agregación desordenada de partículas de estos compuestos. Basándose en las características morfológicas de los oxihidróxidos formados con este tipo de textura, se puede inferir que la presencia de alta porosidad facilitará la difusión de aniones y especies corrosivas a través del óxido hasta el metal, provocando mayores velocidades de corrosión (Xiao, Dong, Li, Wang, 2008). Es evidente que las capas de óxido formadas en los aceros al carbono proporcionan poca o ninguna protección al sustrato (Xiao et al., 2008). El análisis de los productos de corrosión en la superficie del acero por EDS, reveló que los elementos presentes son el O en un porcentaje atómico de 42,62%, el C (29,77%) y el Fe (27,61). La presencia de estos elementos en los productos de corrosión indica la formación de óxidos de hierro típicos del acero al carbono.

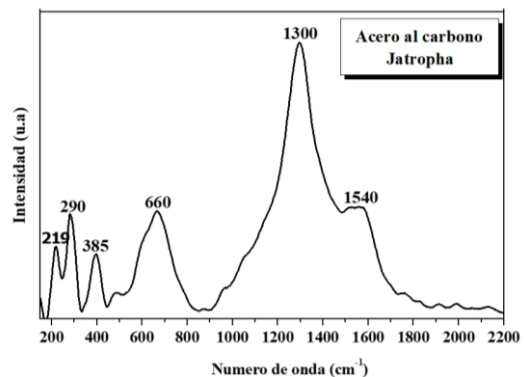




**Figura 2.** Morfología superficial del acero al carbono inmerso en biodiesel de Jatropha a 45°C. A y C) Productos de corrosión formados en la superficie del acero a los 3 y 6 meses de inmersión respectivamente, B y D) EDS de los productos de corrosión del AC a los 3 y 6 meses de inmersión respectivamente.

La Figura 3 muestra el espectro Raman para las muestras corroídas de acero al carbono inmersas en biodiesel de Jatropha a 45°C durante 6 meses. Se ha reportado que la región de 1200-600  $\text{cm}^{-1}$  de los espectros Raman de óxidos e hidróxidos de hierro, corresponde a la flexión del grupo Fe-O-H y el estiramiento del grupo Fe-O. La región de 600-200  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a superposiciones de bandas y frecuencias moleculares (Koh y Tinia, 2011). El espectro Raman del acero al carbono exhibe bandas típicas de algunos de los principales óxidos de hierro frecuentemente encontrados en los productos de corrosión del acero. Se observaron picos a 219, 1300 y 660  $\text{cm}^{-1}$  correspondientes a la presencia de lepidocrocita ( $\delta\text{-FeOOH}$ ) (Xiao, et al., 2008). El pico a 290  $\text{cm}^{-1}$  fue asignado a la formación de hematita ( $\alpha\text{-}$

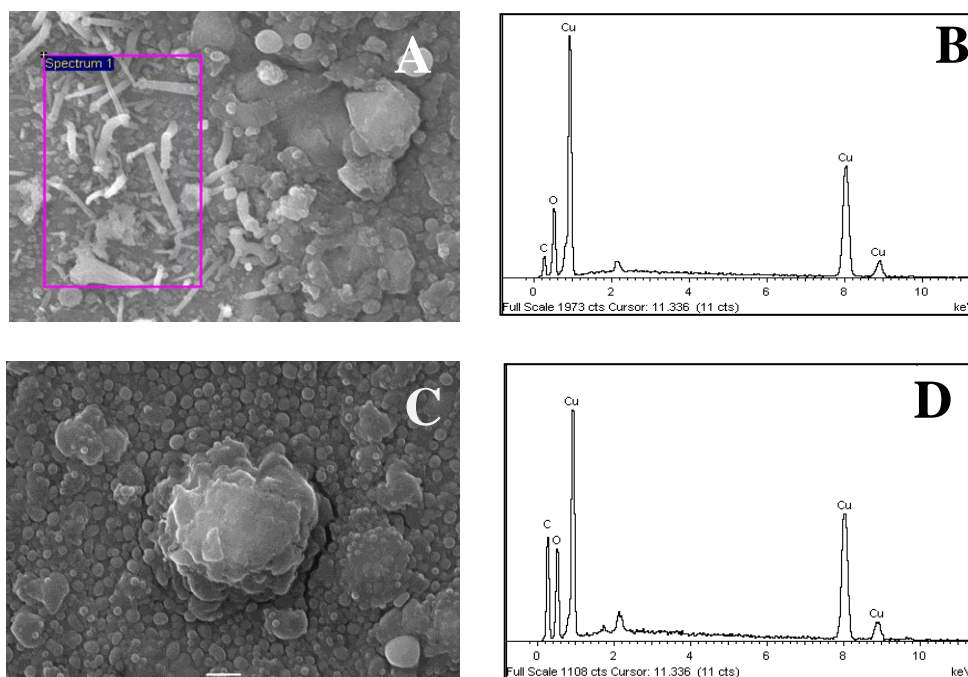
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Colomban, Cherifi, Despert, 2008), el pico a 385  $\text{cm}^{-1}$  se asocia a la presencia de goetita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) (Xiao, et al., 2008), y el pico 1540  $\text{cm}^{-1}$  fueron atribuidas a la formación de magemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) (Bernard y Joiret, 2009).



**Figura 3.** Espectro Raman del acero al carbono expuesto durante 6 meses a 45°C en biodiesel de Jatropha.

La Figura 4A y C, muestra la morfología de los productos de corrosión formados en el cobre inmerso en biodiesel de *Jatropha* a 45°C durante 3 y 6 meses. Las micrografías SEM revelaron una pátina sobre la superficie del cobre compuesta por productos de corrosión en forma de gránulos y listones alargados con una distribución no uniforme. El análisis elemental semicuantitativo del cobre por EDS mostró que los elementos principales que componen los productos de corrosión son el Cu en un porcentaje atómico de 30,19%, O (32,7%) y C (37,14%). Estos resultados son atribuidos a la formación de óxidos de cobre como la

tenorita CuO y la cuprita Cu<sub>2</sub>O (ver Figura 4B y D) y a algunos carbonatos de cobre como la azurita y la malaquita. Sobre la superficie del cobre se forma instantáneamente una película de la especie cuprita al exponerse al aire, ya que la temperatura y la humedad relativa del aire atmosférico causan fácilmente la condensación de vapor de agua sobre la superficie de cobre (Echavarría, Echeverría, Arroyave, Gil, 2009). Se ha reportado que los carbonatos son los principales constituyentes de los productos de corrosión del cobre en biodiesel (Fazal, Haseeb, y Masjuki, 2013).



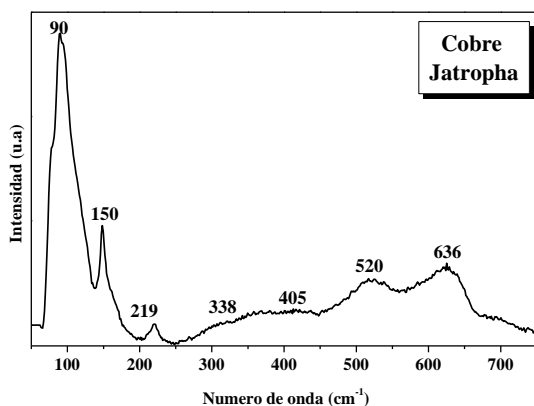
**Figura 4.** Morfología superficial del cobre inmerso en biodiesel de *Jatropha* a 45°C. A) Productos de corrosión formados en la superficie del cobre a los 3 y 6 meses de inmersión respectivamente, B y D) EDS de los productos de corrosión del cobre a los 3 y 6 meses de inmersión respectivamente.

La Figura 5 muestra el espectro Raman para las muestras corroídas de cobre inmersas en biodiesel de *Jatropha* a 45°C durante 6 meses. Se observan bandas a 219 cm<sup>-1</sup> y 520 cm<sup>-1</sup> asignadas a la cuprita (Cu<sub>2</sub>O) (Gan et

al., 2004). Las bandas a 150 cm<sup>-1</sup>, y 405 cm<sup>-1</sup> corresponden a la formación de la azurita (Mattei y otros, 2008). La banda a 90 cm<sup>-1</sup> se asocia a la mezcla de malaquita y cuprita (Smith y Clark, 2004), 338 cm<sup>-1</sup> a la mezcla



de azurita y tenorita (Mattei et al., 2008) y la banda a  $636\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a la mezcla de malaquita y cuprita (Smith y Clark, 2004). La formación de estos compuestos pudo influir en el impedimento de un aumento en las velocidades de corrosión del cobre en *Jatropha* durante el tiempo de inmersión total, presentando valores de velocidad de corrosión iguales a los 3 y 6 meses ( $0,0014\text{ mm/año}$ ).



**Figura 5.** Espectro Raman del y cobre expuesto durante 6 meses a  $45^{\circ}\text{C}$  en biodiesel de *Jatropha*.

## CONCLUSIONES.

El acero al carbono fue el material más afectado por el biodiesel de *Jatropha*. Este material presentó una velocidad de corrosión mayor en el primer mes de inmersión en el biodiesel de *Jatropha* la cual disminuye considerablemente a los 6 meses de inmersión. Estos resultados sugieren la formación de una película protectora del metal con el tiempo de exposición. El cobre fue menos propenso al deterioro por corrosión que el acero, presentando valores de velocidades de corrosión prácticamente estables durante los periodos de inmersión en el biodiesel de *Jatropha*. Los análisis por SEM, EDS y Raman mostraron que los principales productos de corrosión formados sobre la superficie del acero fueron la

lepidocrocita, hematita, goetita y magemita y sobre el cobre la cuprita, tenorita y carbonato de cobre.

## REFERENCIAS.

ASTM, D 445 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), American Section of the International Association for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2006.

ASTM G31 - 72 (2004) Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”.

BERNARD, M. C., Y S. JOIRET. (2009). “Understanding corrosion of ancient metals for the conservation of cultural heritage”. *Electrochimica Acta* 54(22): 5199–5205.

BHARDWAJ, MAYANK, PARUL GUPTA, Y NEERAJ KUMAR. (2014). “Compatibility of metals and elastomers in biodiesel: a review . *International Journal of Research (IJR)* 1(7) 376-391.

COLOMBAN, PH, S. CHERIFI, Y G. DESPERT. (2008). “Raman identification of corrosion products on automotive galvanized steel sheets”. *Journal of Raman Spectroscopy* 39(7): 881–86.

ECHAVARRÍA, ALEJANDRO, FELIX ECHEVERRÍA, CARLOS ARROYAVE, Y HARVETH GIL. (2009). “Study of the copper corrosion mechanism in the presence of propionic acid vapors”. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 20(10): 1841–48.

FAZAL, M. A., A. S M A HASEEB, Y H. H. MASJUKI. (2013). “Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel”. *Corrosion Science* 67: 50–59.

FAZAL, M. A., M. R. JAKERIA, Y A. S M A HASEEB. (2014). “Effect of copper and mild steel on the stability of palm biodiesel properties: A comparative study”. *Industrial Crops and Products* 58: 8–14.

EDWIN N. FRANKEL. 2014. “Lipid oxidation”. Oily Press , p 488.

G1-03, A Standard - American Society for Testing and Materials, y undefined 2011. “Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens”.

- GAN, Z H ET AL. (2004). "Preparation and characterization of copper oxide thin films deposited by filtered cathodic vacuum arc". *Journal of Physics D: Applied Physics* 37(1): 81–85.
- "J1747:2013. Recommended Methods for Conducting Corrosion Tests in Hydrocarbon Fuels or Their Surrogates and Their Mixtures with Oxygenated Additives - SAE International".
- JIN, DINGFENG ET AL. (2011). "Corrosion behavior of ASTM 1045 mild steel in palm biodiesel". *Renewable Energy* 81: 457–63.
- KAUL, SAVITA ET AL. (2007). "Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts". *Fuel Processing Technology* 88(3): 303–7.
- KNOTHE, GERHARD, Y ROBERT O. DUNN. (2003). "Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and presence of metals". *Journal of the American Oil Chemists' Society* 80(10): 1021–26.
- KOH, MAY YING y TINIA IDATY TINIA. (2011). "A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(5): 2240–51.
- MATTEI, E. ET AL. (2008). "Raman spectroscopic analysis of azurite blackening". *Journal of Raman Spectroscopy* 39(2): 302–6.
- OM TAPANES, NEYDA C., DONATO A. GOMES ARANDA, JOSÉ W. DE MESQUITA CARNEIRO, Y OCTAVIO A. CEVA ANTUNES. (2008). "Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction". *Fuel* 87(10–11): 2286–95.
- PAPAVINASAM, S., ANAND, A., PARAMESH, M. H. N., KRAUSHER, J., LI, J., LIU, P., MANI, S. R., & KRISHNAMURTHY, S. R. (2011). Corrosion of metals in biofuels. *ECS Transactions*, 33(14), 1-19.
- SARIN, A.; ARORA, R.; SINGH, N. P.; SHARMA, M.; MALHOTRA, R. K (2009). "Influence of metal contaminants on oxidation stability of *Jatropha* biodiesel". *Energy* 34(9): 1271–75.
- SARIN, RAKESH, MEETA SHARMA, S. SINHARAY, Y R. K. MALHOTRA. (2007). "Jatropha-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia". *Fuel* 86(10–11): 1365–71.
- SMITH, GREGORY D., Y ROBIN J.H. CLARK. (2004). "Raman microscopy in archaeological science". *Journal of Archaeological Science* 31(8): 1137–60.
- "CEN, EN 14103:2011, Fat and oil derivatives—Fatty Acid Methyl Esters (FAME) in, Determination of ester and linolenic acid methyl ester contents, 2011.
- CEN, EN 14112:2003, Fat and oil derivatives—Fatty Acid Methyl Esters (FAME) in, Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test), 2003.
- XIAO, KUI, CHAO FANG DONG, XIAO GANG LI, Y FU MING WANG. (2008). "Corrosion Products and Formation Mechanism During Initial Stage of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel". *Journal of Iron and Steel Research International* 15(5): 42–48.
- ZULETA, ERNESTO C., LIBIA BAENA, LUIS A. RIOS, Y JORGE A. CALDERÓN. (2012). "The oxidative stability of biodiesel and its impact on the deterioration of metallic and polymeric materials: a review". *Journal of the Brazilian Chemical Society* 23(12): 2159–75.