

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos, Ambiental y Energía

UDLAP®

**Análisis de los factores determinantes para la óptima producción de
biodiésel a partir de borra de café**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el estudiante

Anaid Alejandra Rodríguez Mendoza

155906

Ingeniería Química

Dra. Deborah Xanat Flores Cervantes

San Andrés Cholula, Puebla

Primavera 2021

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el estudiante

Anaid Alejandra Rodríguez Mendoza 155906

Director de tesis

Deborah Xanat Flores Cervantes

Presidente de tesis

Rene Alejandro Lara Díaz

Secretario de Tesis

Ernestina Moreno Rodríguez

Análisis de los factores determinantes para la óptima producción de biodiésel a partir de borra de café

Analysis of determining factors for optimal production of biodiesel from waste coffee grounds

A.A. Rodríguez Mendoza¹

¹*Universidad de las Américas Puebla. anaid.rodriguezma@udlap.mx*

Resumen:

La contaminación atmosférica aumenta cada año, por ello la necesidad de encontrar una fuente de energía que sustituya los combustibles fósiles. La borra de café es un residuo cotidiano, sin segundo uso. Considerándose materia prima para producir biodiésel al presentar alto contenido de ácidos grasos. Actualmente, existen pocos casos exitosos para generar biodiésel comercial del residuo de café. Se revisaron investigaciones que elaboran biocombustible mediante este residuo, determinando factores que impactan en su producción, como método, tiempo y temperatura de extracción de aceites, solvente, catalizador, porcentaje de ésteres metílicos y calidad del producto, contemplando resultados dentro de la norma de calidad ASTM y EN. El método con mayor porcentaje de extracción de aceites fue Soxhlet. El tiempo y temperatura de extracción no influyen en la cantidad de ácidos grasos obtenidos. Los catalizadores más utilizados son NaOH, H₂SO₄ y KOH para la transesterificación. Los ésteres metílicos en mayor proporción fueron ácido linoleico alcanzando 49.58%pp y palmítico 41.6%pp. Concluyendo que los porcentajes de ésteres generados compiten contra otras fuentes de materia prima; aunque las cantidades producidas son bajas. Incluso con resultados positivos, se requiere analizar variables de cantidad de biodiésel producido, como tipo de café, molienda y/o tostado utilizado, comparando la materia prima empleada con porcentaje final del producto.

Palabras clave: biodiésel, borra de café, contaminación atmosférica, ésteres metílicos, transesterificación.

Abstract:

Air pollution increases every year, hence the need to find an energy source to replace fossil fuels. Waste coffee grounds are continuous remains, without a second use. Considering raw material for biodiesel production, as it contains a high number of fatty acids. Nowadays, there are few successful cases to produce commercial biodiesel from waste coffee grounds. A review was made between investigations that produce this biofuel, to determine factors that influence in biodiesel production, such as method, time and temperature oil extraction, characterization of fatty acids, solvent, catalyst, methyl esters percentage and product quality considering the results were within from ASTM and EN standards. The method with the highest percentage of oil extraction was Soxhlet. The extraction time and temperature do not influence in the fatty acids obtained. For transesterification process, the most used catalysts are NaOH, H₂SO₄ and KOH. The highest methyl esters percentages were linoleic acid,

reaching 49.58% pp and palmitic acid 41.6% pp. Concluding that the methyl esters percentages generated can compete against other sources of raw material, although quantities produced are low. Despite positive results, is necessary to analyze other variables as coffee type and roast used, comparing raw material utilized with the final product percentage.

Keywords: biodiesel, waste coffee, atmospheric pollution, methyl esters, transesterification.

1. Introducción

En la actualidad, existen diversos factores que favorecen al cambio climático en el planeta, siendo la quema de combustibles fósiles uno de los principales contribuyentes. En México, actualmente el transporte ocupa el 90% del consumo energético total del país, del cual el 97% es representado por la gasolina y el diésel (SENER, 2018). Asimismo, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), reporta que durante el 2018, los límites de calidad del aire en México, fueron excedidos de acuerdo con los valores establecidos en la NOM-025-SSA1-2014 (INECC, 2018). De igual manera, durante el mismo año se presentó un crecimiento mundial del 2% en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), igual a 37,5 GtCO₂ anuales. Sin embargo, esta cantidad deberá de decrecer entre el 25% y 55% para el año 2030 (UNEP, 2019). Esto con el propósito de cumplir con lo firmado en el acuerdo de Paris durante la COP21, con el fin de mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2 °C, con respecto a la temperatura preindustrial del siglo pasado. Esto hace hincapié en la necesidad de implementar energías y combustibles renovables que contribuyan a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (UNFCCC, 2016). Asimismo, la quema de combustibles también contribuye a la contaminación del aire, la cual ocasiona daños para la salud del hombre y otros seres vivos, como enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cáncer de pulmón, asma, e incremento de alergias (ISNP, 2020).

En la actualidad los combustibles fósiles predominan en el mercado, siendo utilizados como fuente de materia prima para la generación de electricidad, producción de fármacos, pesticidas, climatización, cocina, transporte, entre otros. A pesar de que el sector de transporte es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero y contaminantes, en México, se reportó un aumento de tan solo 2.4% en el uso de biocombustibles entre el 2007 al 2018 en el sector de transporte (SENER, 2019). Esto indica el poco desarrollo que ha tenido el país en cuestiones de combustibles alternos, a pesar de la gran diversidad y producción de fuentes candidatas para la generación de biocombustibles.

De la necesidad de encontrar un combustible líquido que pueda sustituir el petróleo para reducir la emisión de gases y partículas contaminantes, se han llevado a cabo diversas investigaciones, generando dos alternativas de biocombustibles líquidos, el bioetanol y el biodiésel. La diferencia entre estos es la materia prima para producirlos y los métodos de producción. El bioetanol, se obtiene a partir de la fermentación de semillas ricas en azúcares, como la caña de azúcar, remolacha, trigo, cereales, residuos forestales, etc. (Sarkar et al., 2012). Cabe mencionar que en este proceso se obtiene alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua y después al deshidratarlo, se puede utilizar como combustible. Por otro lado, para la generación del biodiésel los ácidos grasos se convierten es una mezcla de ésteres metílicos y glicerina a partir de aceites vegetales y grasas; algunos ejemplos de la materia prima para su producción son la soja, girasol, microalgas, levaduras, sebo de animales y café (Camús & Laborda, s. f.).

En el caso de las alternativas de granos de soja, maíz, girasol, colza, y algunos más, como candidatos para la creación de biocombustibles no se ha tenido éxito debido a la controversia de su cultivo para la alimentación humana y animal (Aiello et al., 2019). Por ende, se han buscado otras alternativas económicas que no afecten la soberanía y seguridad alimentaria, al producir semillas específicamente para ser empleadas en la producción de biocombustibles. Sin embargo, estas tendrían que seguir compitiendo con recursos asignados para la agricultura. El aprovechamiento de residuos se considera un método sustentable al revalorizar y reutilizar un desecho generado con gran contenido energético para la creación de un nuevo producto sin competir con recursos para la alimentación humana (Montero et al., 2016).

Siendo los principales candidatos de residuos el aceite vegetal usado y las grasas de animales, normalmente, se ha empleado el aceite vegetal usado como materia prima, por el bajo costo de obtención. Sin embargo, este ha ido incrementado debido al uso de comercialización que también se le está dando y el costo de recolección (Riegelhaupt et al., 2016). Asimismo, las grasas de los animales por su naturaleza son de alta consistencia viscosa y sólida a temperatura ambiente, es decir, presentan ácidos grasos saturados. Por consiguiente, al emplearse en la producción de biocombustible tienen el riesgo presentar una combustión incompleta, y tiene problemas de fluidez a temperaturas bajas, a pesar de su elevado contenido de cetanos e índices de calefacción cerca de los valores del diésel (Tejeda et al., 2013).

Uno de los residuos que también se considera es la borra de café, ya que es un residuo generado en todo el mundo y sin un uso alternativo, tomando en cuenta la gran ventaja del costo nulo de la materia prima y la ganancia del subproducto. Más aún, México es un gran productor de café, es un residuo vegetal rico en grasas que se genera todos los días, biodegradable, y no tóxico para el medio ambiente y la salud humana.

La Organización Mundial de Café reportó que del año 2019 hasta Abril 2020 se produjeron aproximadamente 166,06 millones de sacos, con un crecimiento del 0.5% anual, esperando un crecimiento constante en la producción los años siguientes, y por consiguiente la borra de café (ICO, 2020). Asimismo, la borra es un subproducto que se puede utilizar como combustible de fuente directa o producción de biodiésel. Algunas industrias, emplean el residuo directamente como combustible en calefacción, cocción, calderas generadoras de vapor de agua, entre otros, debido al gran poder calorífico que presentan de 17.21 MJ/kg (Balseca-Sampedro et al., 2018).

Los resultados de estudios anteriores indican que el residuo de café contiene entre 10% y 15% en peso de grasas (Aiello et al., 2019). Los triglicéridos son un elemento esencial para la generación de biodiésel a partir de la transesterificación en donde se requiere un elevado porcentaje de dichos lípidos; por ello la importancia de que cierto porcentaje de las grasas extraídas sean triglicéridos. De acuerdo a estudios previos de los ácidos grasos encontrados en la borra de café se derivan los triglicéridos y de estos los ésteres metílicos como palmítico, esteárico, oleico, linoleico, linoleico, araquídico y behénico, los cuales son clave para evaluar y comparar la calidad de biodiésel (Villarreal-Peña et al., 2012).

En la Figura 1, se muestra el procedimiento general para la obtención del biodiésel a base de la borra de café, partiendo desde el grano de café, generando como productos la bebida y la borra. Esta última al someterse al proceso de extracción de grasas se separa en el aceite y en el residuo sólido. El contenido de aceites pasa al proceso de esterificación

(referente al contenido de ácidos grasos en la grasa) y transesterificación (conversión de los triglicéridos presentes en la grasa) para obtener el biodiésel. Por otro lado la borra restante se puede utilizar para la creación de composta o de formación de pellets, los cuales se emplean como una opción para la combustión en la industria, sustituyendo a la madera y combustibles tradicionales con alto contenido de carbono, debido a que presentan un alto poder calorífico y bajo contenido de humedad (Bio-Bean, s. f.). En México, se hizo un estudio dónde se comprueba que se puede satisfacer alrededor del 50% de la demanda de generación de energía eléctrica por medio de los pellets de residuos agroindustriales, obteniendo como beneficio la disminución del 25% de emisiones de dióxido de carbono (Gutiérrez et al., 2020).

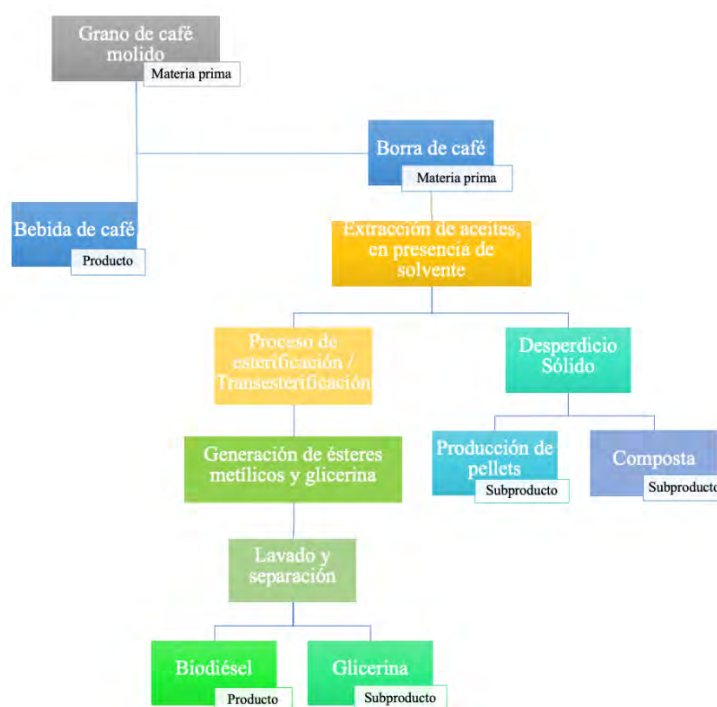


Figura 1. Proceso de producción de biodiésel
Fuente: Elaboración propia

Se han reportado resultados favorables, en estudios a nivel experimental, en la generación de biodiésel de borra de café, el cual cuenta con características dentro de los límites permisibles de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y EN (Normas Europeas), incluyendo principalmente acidez, viscosidad, densidad, tiempo de oxidación, número de cetanos, punto de inflamación, entre otros parámetros, para garantizar que dicho combustible no dañe a los motores de automóviles. Otra función del biocombustible es utilizarse como aditivo en el tanque de combustible del auto hasta un 20% de la capacidad sin dañar o cambiar la estructura de este (Valle, 2011).

Actualmente, la empresa BioBean es la primera empresa exitosa productora de biodiésel a base de los desechos del café en Huntingdon, Reino Unido. La empresa recolecta el desperdicio del café, fabrica el biocombustible para los consumidores y la industria, y usa

el mismo para la recolección de los desechos, empleando una economía circular al utilizar su producto como combustible para la misma recolección de la materia prima, reduciendo el costo del transporte. Los resultados y el éxito que ha tenido BioBean, señala que la borra de café es una gran candidato para la producción de biodiésel, agregando que su producción genera cero emisiones netas de CO₂ (Valle, 2011). Sin embargo, el éxito de dicha empresa no se ha podido reproducir en otros países debido a la rentabilidad del producto.

Con el objetivo de potencializar la posibilidad de producción del biocombustible a base de borra de café, se requiere analizar los factores que influyen en la producción del biodiésel y las características del mismo. Tales como las propiedades de la materia prima (tipo de molienda del grano, el grado de tostado, el tipo de planta de café), método de extracción de lípidos, diferencias en la transesterificación. Para dar respuesta, en la presente investigación se lleva a cabo una revisión metodológica de diversos estudios publicados, comparando los resultados obtenidos y evaluando los factores determinantes en la producción del biodiésel, que influyen en la obtención del aceite, relacionándolo con el proceso de transesterificación para la obtención del biocombustible, respetando los límites establecidos en las normas ASTM.

2. Metodología

Para llevar a cabo la siguiente investigación se realizó una revisión estructurada. A continuación, se exponen los pasos metodológicos aplicados para el análisis de diversos estudios de recopilación de datos.

2.1. Fuentes de investigación

Se empezó a recabar información en buscadores académicos, incluyendo Google Scholar, EBSCO *Discovery Science*, SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) y Academia.edu; se eligieron estos buscadores debido al uso y alto prestigio internacional, conteniendo base de datos de artículos científicos, revistas indexadas e informes gubernamentales. La estrategia implementada fue buscar artículos experimentales y reportes que tuvieran relación con la producción de biocombustible a partir de la borra de café, métodos empleados para la obtención de aceites y situación actual de los biocombustibles en México, contemplando que la fabricación de este es amigable con el medioambiente y costo de materia prima nulo.

Se usaron principalmente los siguientes términos al realizar las búsquedas: “borra de café”, “extracción de aceites”, “biocombustibles en México”, “biodiésel”, “producción de café”, “desperdicios del café” y “grasas obtenidas del café”. Cabe mencionar que la búsqueda de información incorporó investigaciones publicadas en los idiomas inglés y español.

2.2. Procedimiento para la selección de publicaciones

Se realizó una lista de títulos generados por los buscadores y se relacionaron con la temática del presente tema de investigación. Fue condición para la selección que presentaran los datos deseados, respaldando los objetivos del artículo en cuestión. Corroborando que la información obtenida fuera verídica, se evaluó que el estudio publicado se encontrara en revistas de arbitraje, indexadas o documento gubernamental, ya que cuentan con un comité

editorial que evalúan la publicación y determinan un factor de impacto. Se tomó en cuenta el año de publicación de los artículos considerando un rango de los últimos 10 años. Los artículos de investigación seleccionados debían contener resultados con la elaboración, características y rendimientos de producción del biocombustible. La búsqueda se concluyó con la localización de referencias de los artículos elegidos. Se eliminaron reportes en resumen cortos o con mínimo sustento, artículos de opinión, o investigaciones que no fueron publicadas en revistas de reconocimiento.

2.3. Extracción de información

Para llevar a cabo el estudio, se realizó una lectura detallada, se hizo una tabla comparativa de las publicaciones seleccionadas donde se tomaron anotaciones de los datos de mayor relevancia de cada una, para poder identificar aquellos que coincidían o diferían en los parámetros de evaluación, como método de extracción de aceites, solvente, temperatura, cantidad de residuo empleado, cantidad de grasas extraídas, método de identificación de lípidos y tiempo de extracción. Se consideraron los resultados experimentales que obtuvieron.

3. Resultados y discusiones.

En el presente documento se hizo una revisión principalmente entre doce estudios que describen, analizan y ejecutan el proceso de producción del biodiésel a base de borra de café. Las investigaciones que se evaluaron, presentan diferentes cantidades de materia prima, métodos de extracción, análisis para la caracterización de grasas, temperatura y tiempo de extracción. Por ello, el propósito es revisar y comparar los resultados que obtuvieron para estudiar los factores que afectan la cantidad final producida del biodiésel.

En la Figura 2, se exhibe el proceso detallado de extracción de biocombustible a partir de la borra de café, comenzando por el secado para eliminar la humedad del residuo. Luego, se emplea el método de extracción de grasas elegido. Al lograr separar el aceite deseado, el resto de la borra sólida se puede emplear para la producción de pellets, considerados como biocombustibles sólidos fabricados por medio de compactar la biomasa por presión en forma cilíndrica (Gutiérrez et al., 2020) o venta directa para composta. Del otro lado se continúa con el proceso de esterificación y transesterificación, en presencia de un catalizador (Aiello et al., 2019), manteniéndose a cierta temperatura y evaluando el tiempo de extracción. Finalmente, se separa la glicerina generada por la saponificación del proceso y el biodiésel producido (Uddin et al., 2019).

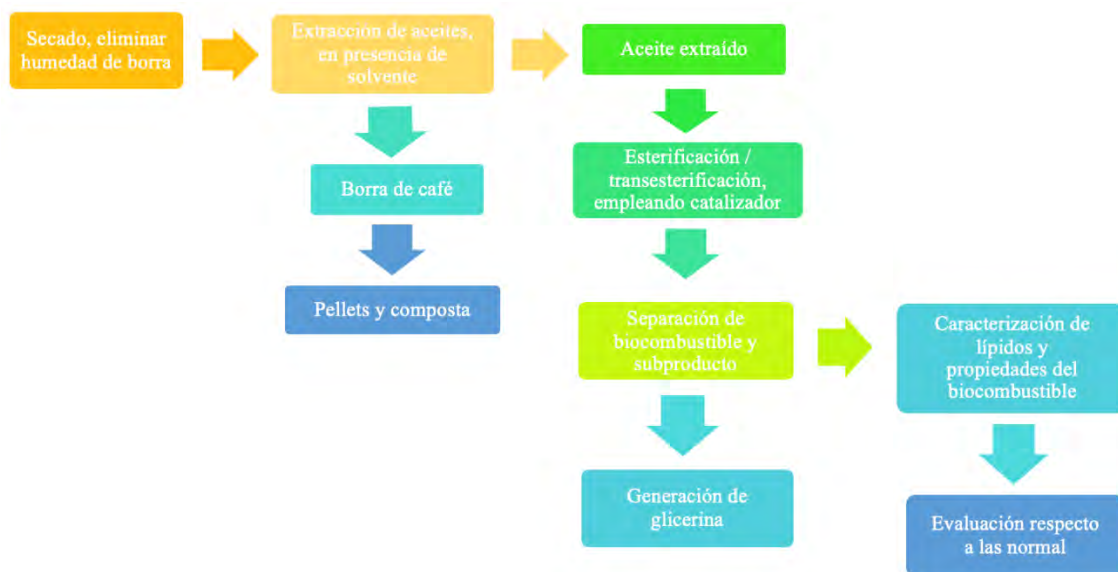


Figura 2. Proceso detallado de producción de biodiésel a partir de borra de café
Fuente: Elaboración propia

Primero, para considerar la borra de café como un candidato para la producción de biocombustible, se menciona que los resultados obtenidos del porcentaje en peso de producción del biodiésel en diferentes estudios se encuentran reportados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de producción de biodiésel de borra de café en diferentes estudios

Estudio	% pp de biodiésel producido
Go, & Yeom. (2017).	10 a 20
Bendall, et. al. (2015).	9 a 28
Blinová et al., 2017	11 a 20
Kim, & Yeom, (2020).	10.8

Por lo tanto, evaluando los resultados se observa que se pueden comparar contra los resultados de producción de biodiésel a partir de las microalgas y aceites vegetales que oscilan entre 14.5 y 16.1% (en porcentaje peso) al obtener resultados similares (Go & Yeom, 2017). Destacando que la borra de café es un residuo, mientras que las microalgas y aceites vegetales son materia prima. Adicionalmente, en estudios se ha reportado que debido al gran poder calorífico del residuo del café (alrededor de 21.16 MJkg^{-1}), este tiene buena estabilidad de oxidación, lo que resulta en un alto rendimiento de la producción del biodiésel (Deligiannis et al., 2011).

En un estudio se realizaron pruebas para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales considerando tres escenarios; aceite desechado, aceite usado y aceite fresco. La experimentación se ejecutó a una temperatura de 60°C durante 2 horas (Ordoñez et al., 2013). En la Tabla 2, se muestra el resultado final en porcentaje peso, de los principales ésteres metílicos que influyen en la producción, respecto a cada escenario ubicados en las primeras tres columnas. Se pudo observar que los ácidos metílicos del ácido palmítico y oléico obtenidos a partir del aceite fresco son los que se encuentran en mayor cantidad. Sin embargo, analizando que uno de los fines es emplear como materia prima desechos generados en la

vida cotidiana, el aceite usado se puede comparar contra los resultados obtenidos en experimentaciones de obtención de biodiésel a partir de la borra de café. Igualmente, en las columnas restantes, se exhiben las tres investigaciones que obtuvieron mejores resultados de producción de ésteres metílicos a partir de borra de café, corroborando que los porcentajes son similares a los de los aceites vegetales y concluyendo que el residuo de café es un buen candidato para generar biocombustible. Al evaluar los resultados, se percató que, de acuerdo a las propiedades de los aceites vegetales, tienden a contener mayor porcentaje de ácido oléico que el residuo de café. En cambio, este tiene más ácido linoleico que los aceites. A lo largo de la revisión, se percató que no se menciona que éster metílico es esencial o resulta en una mejor calidad del biodiésel producido. Con el fin de mejorar la calidad del biodiésel producido, se considera de gran importancia desarrollar investigación relacionada con la mejora en la calidad del producto en función de las proporciones de ésteres metílicos.

Tabla 2. Comparación entre ésteres metílicos de ácidos grasos de borra de café y aceite vegetal

Tipo	Estudios					
	Aceite usado, %pp	Aceite desechado, %pp	Aceite fresco, %pp	Borra de Café, %pp	Borra de Café, %pp	Borra de Café, %pp
	Ordoñez et al. (2013).			Jenkins, R. W., et. al. (2014).	Urribarrí. et. al (2014)	Aiello Mazzarri, et. al. (2019).
Ácido palmítico	26.61	32.24	36.02	41.5	41.6	36.49
Ácido oléico	49.57	48.56	51.62	9	12.06	6.43
Ácido esteárico	10.01	10.03	/	7.5	5.18	7.49
Ácido linoleico	/	0.259	0.64	43	41.11	49.58

Asimismo, la producción de biocombustible a base de aceites vegetales, ha generado gran controversia en el mercado, debido a que se empezó a comercializar directamente con empresas recolectoras y que los particulares tomaran la iniciativa de vender o donar este aceite. Sin embargo, para aumentar la recolección de aceite vegetal usado, borra de café o alguna otro desperdicio con el que se pueda generar biodiésel, se necesitan incentivas gubernamentales, implementar legislación para promover el uso de biocombustibles en el país y mejorar procesos de obtención del biodiésel para disminuir costos energéticos (Valdés-Rodríguez & Palacios-Wassenaar, 2016).

Para analizar los resultados obtenidos en las experimentaciones consideras para el análisis de resultados, se hizo un cuadro comparativo, como se muestra en la Tabla 3, donde se evaluaron los métodos de extracción, tipo de solvente utilizado, cantidad de la muestra a analizar, cantidad de grasas extraídas, temperatura y tiempo de extracción. Se eligieron estos criterios, debido a que son los parámetros que influyen directamente en la producción de biodiésel, analizando la variación que hay entre los resultados de las experimentaciones.

Tabla 3. Comparación entre autores de resultados experimentales en extracción de aceite de borra de café.

No.	Referencia	Método de extracción	Solvente	Cantidad de muestra usada, g	Cantidad de grasas % pp	Temperatura, °C	Tiempo de extracción, h
1	Urribarrí, <i>et. al.</i> (2014).	Equipo de extracción bajo condiciones de reflujo	Hexano	2500	6.75	70	1
2	Uddin, <i>et. al.</i> (2019).	Soxhlet	Hexano	No se reporta	12.5	67.5	2
3	Blinová, <i>et. al.</i> (2017).	Soxhlet	Hexano	100	15	50	6
4	Go & Yeom. (2017).	Soxhlet	Hexano	100	15	45	9
5	Aiello Mazzarri, <i>et. al.</i> (2019).	Ebullición a reflujo, en baño maría	Hexano	No se reporta	10.04	80	0.5
6	Bendall, <i>et. al.</i> (2015).	Extracción fría y caliente	Heptano	50	15	Caliente a 99 °C Fría a 22° C	6
7	Deligiannis, <i>et. al.</i> (2011).	Soxhlet	Hexano	No se reporta	12.5	65	2
8	Jenkins, <i>et. al.</i> (2014).	Soxhlet	Hexano	100	15	40	2
9	Im, & Yeom, (2020).	Método de extracción de éter	Hexano	100	16.4	45	9
10	Kim, & Yeom, (2020).	Método de extracción de éter	Hexano	100	13.1	45	9
11	Sander, <i>et. al.</i> (2020).	Soxhlet	Hexano	100	12.5	60	2

De acuerdo con la tabla anterior, se observó en los estudios, que el solvente más usado fue el hexano, debido a su fácil disponibilidad, costo promedio, no reacciona con el aceite y buen disolvente para ácidos grasos (García et al., 2017). Esto se presenta debido al punto de ebullición del solvente de alrededor de 65-69°C, manteniendo la temperatura del proceso de extracción por arriba de este. Además, en el estudio de Urribarrí y colaboradores, se reporta una comparación entre metanol, heptano, y hexano, reportando que este último tuvo mayor porcentaje de extracción de grasas durante las primeras 3.5 horas; igualmente, menciona que debido a la no polaridad del hexano es más fácil someterlo al proceso de recuperación, generando una recuperación de $81,58 \pm 1,02\%$ para el hexano y $78,89 \pm 0,98\%$ para el metanol (2014). Sin embargo, por las características del hexano queda abierta la posibilidad de encontrar otro solvente que contamine menos al medioambiente (García et al., 2017).

También se concluyó que el método de extracción de grasas más utilizado por las investigaciones es el de Soxhlet, debido a su fácil acceso y buenos resultados de extracción. Comparando con el estudio del método del equipo de extracción de aceites bajo condiciones reflujo, pese a que se ocupó mayor cantidad de materia prima los resultados no fueron favorables, al sólo alcanzar 6.75 % pp de aceite de café (Urribarrí et al., 2014). De igual manera, en la investigación donde se empleó el método de ebullición a reflujo en baño maría, a pesar de actuar a mayor temperatura (80°C) que los otros estudios, usando hexano como solvente, no se logró alcanzar la cantidad de lípidos que fueron extraídos por Soxhlet en otros estudios. Incluso, del método de extracción frío y caliente, el procedimiento ocupado es más complejo y tardado. Donde en la extracción en caliente se emplea un agitador de placa caliente y un condensador de reflujo, trabajando a 99°C, filtrando el café con papel filtro y dejando secar toda la noche para separar el aceite (Bendall et al., 2015).

Por otro lado, en el método de extracción de éter reportado en Im y colaboradores, se obtuvo mayor cantidad de extracción de aceites que en las demás investigaciones (2020), aunque en el otro estudio que utiliza el mismo método de extracción, se alcanzó sólo el 13.1 pp% (Kim & Yeom, 2020), con la diferencia de que en el primer estudio se empleó un catalizador a base de cascara de huevo logrando el 16.4% de extracción de aceites. Sin embargo, estos métodos son más complejos, al existir complejidad para separar los restos de la borra de café de los sólidos del catalizador y se tiene que repetir el procedimiento varias veces para lograr un rendimiento del 92% en la producción del biodiésel, ya que en la primera extracción se generó un rendimiento entre el 0.4 y 8.7% (Im & Yeom, 2020).

El método de Soxhlet, consiste en hervir el solvente en el matraz, la muestra de extracción se deposita en el cartucho del Soxhlet. Al calentar el matraz, el vapor asciende por el extractor, donde este se condensa y va cayendo el aceite gota a gota sobre el cartucho (Luque de Castro & Priego, 2010).

Por los resultados de la evaluación de resultados de métodos de extracción, se decidió considerar los parámetros reportados entre los artículos que emplearon el método de Soxhlet. Se realizó un análisis de la relación que existe entre la cantidad de aceites extraídos y la temperatura de extracción de cada artículo. La Figura 3, representa la cantidad de grasas extraídas en porcentaje peso (pp%) contra la temperatura en °C.

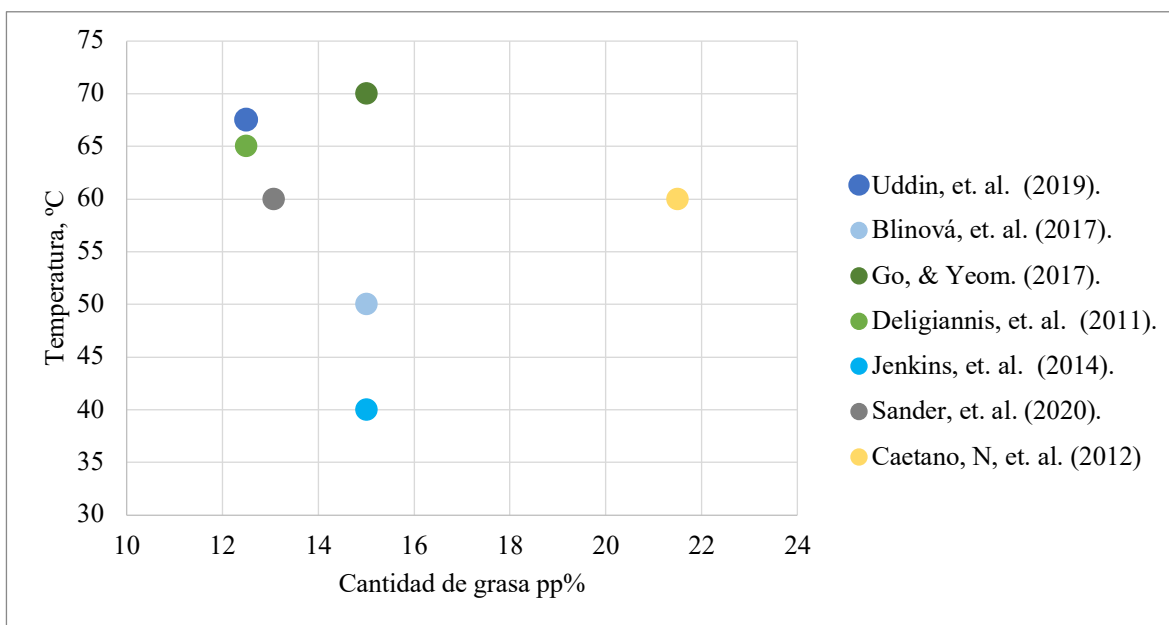


Figura 3. Grasas extraídas Vs Temperatura de extracción.

Se analiza que no hay una correlación entre la temperatura de extracción y la cantidad de aceite de café extraído en las investigaciones de Go & Yeom, (2017), Blinová y colaboradores, (2017), Jenkins y colaboradores, (2014) debido a que reportan el mismo porcentaje lípidos obtenidos a diferentes temperaturas. Los estudios de Uddin y colaboradores (2019), Deligiannis y colaboradores (2011) y Sander y colaboradores (2020), lograron menor porcentaje de lípidos, a pesar de trabajar a mayor temperatura que Blinová y colaboradores (2017), Jenkins y colaboradores (2014). Solo un estudio logró un porcentaje de 21.5 pp% a 60 °C (Caetano et al., 2012), comprobando que la temperatura no es un factor que afecta a la extracción de aceites, o bien que la cantidad extraída depende de otros o múltiples factores. Del mismo modo, faltan investigaciones adicionales donde de forma sistémica se estudie cómo afectan las distintas temperaturas a la extracción de lípidos. Cabe recalcar que en todos los estudios se cuidó que la temperatura no se elevara mucho, debido a que el aceite podría quemarse.

Del mismo modo, se comparó la cantidad de grasas extraídas de cada estudio que empleó el método de Soxhlet contra el tiempo que se llevó durante la extracción de lípidos, como se exhibe en la Figura 4.

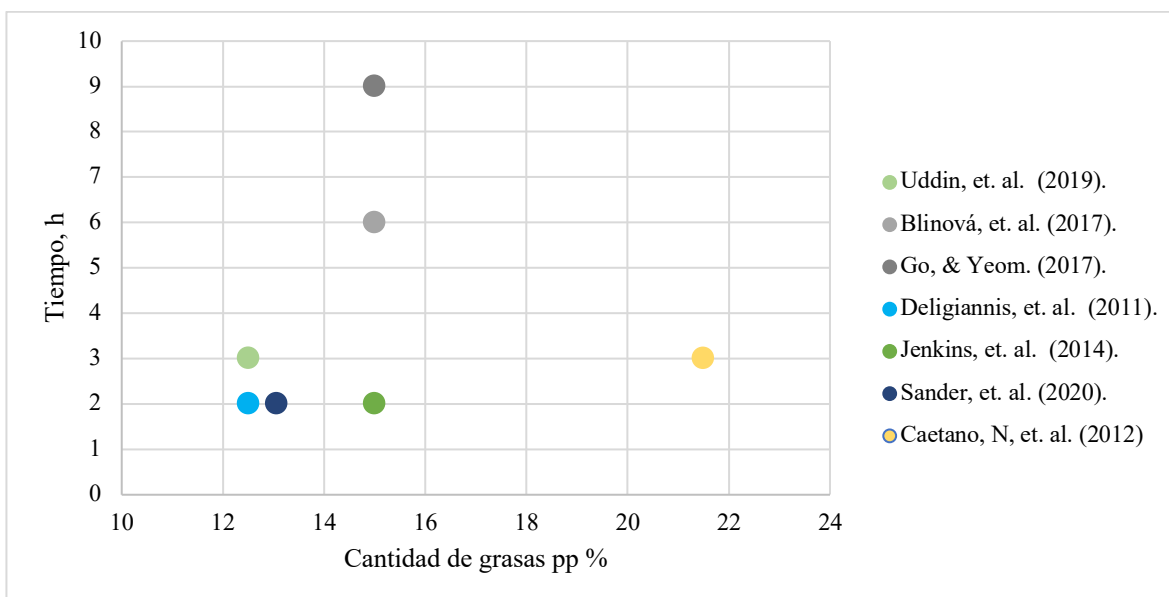


Figura 4. Grasas extraídas Vs Tiempo de extracción.

Al igual que la gráfica de las grasas extraídas contra la temperatura, se comenta que no existe alguna correspondencia directamente en la cantidad de grasas contra el tiempo de extracción en los estudios de Go y colaboradores (2017), Blinová y colaboradores (2017), y Jenkins y colaboradores, (2014). Pero, al comparar contra el resto de las investigaciones el tiempo de extracción favoreció en el porcentaje generado de lípidos. A su vez, en los estudios de Uddin y colaboradores (2019), Go y colaboradores (2017) y Sander y colaboradores (2020), se trabajó durante el mismo tiempo de extracción, pero se produjeron diferentes cantidades de grasas. Esto se presenta debido a la relación que a su vez tienen con la temperatura a la cual se está elaborando el aceite. Nuevamente, la investigación de Caetano y colaboradores (2012) obtiene un buen resultado de extracción de aceites en un tiempo de 3 h. Por lo tanto, se puede decir que el tiempo y temperatura de extracción del método, no se relacionan proporcionalmente a la cantidad de grasas extraídas y/o que nuevamente existen otros o múltiples factores involucrados, tales como el tipo de café y tostado utilizado. Adicionalmente, también es importante considerar que entre mayor sea el tiempo de extracción o la temperatura, aumenta el consumo energético y esto a su vez el costo de producción, por lo que se puede encontrar un punto intermedio para lograr extraer la mayor cantidad de aceites sin elevar la rentabilidad de la producción.

Una vez obtenido el aceite de la borra de café, ésta se somete a los procesos de esterificación (para ácidos grasos libres) y/o transesterificación (para triglicéridos), basados en reacciones reversibles entre una grasa y un alcohol en presencia de catalizadores, generando ésteres metílicos, glicerina, y agua (Gaurav et al., 2016)(Aiello et al., 2019). En la Figura 5, se muestran las reacciones generales del proceso, en la reacción (i) se exhibe la transesterificación y en la reacción (ii) la esterificación.

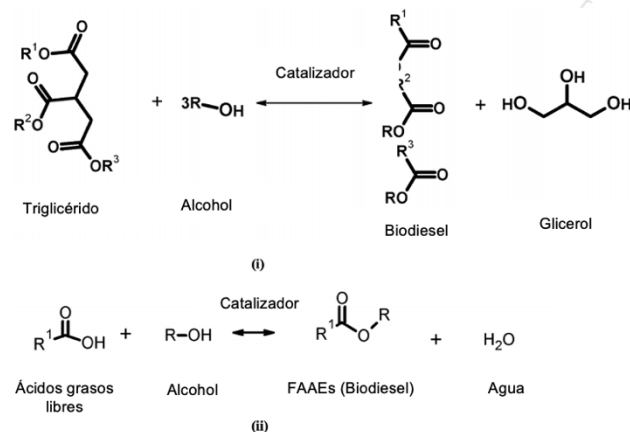


Figura 5. Reacciones de los procesos de esterificación y transesterificación.

Cabe mencionar que, la temperatura y cantidad de catalizador empleado deben ser cuidadosas, ya que el aceite se puede quemar y por consiguiente obtener un bajo rendimiento del biodiésel (Gaurav et al., 2016). Comúnmente se usa metanol en presencia de un catalizador. En la Tabla 4, se muestran los mejores catalizadores para el proceso como ácido sulfúrico (H_2SO_4), hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), los cuales no influyen en la cantidad de biocombustible generado, ayudando en la velocidad de extracción (Bendall et al., 2015) o promoviendo tanto la esterificación como la transesterificación.

Tabla 4. Catalizador empleado para la producción del biodiésel.

No.	Referencia	Catalizador
1	Uddin, <i>et. al.</i> (2019).	KOH
2	Blinová, <i>et. al.</i> (2017).	KOH
3	Go, & Yeom. (2017).	NaOH, H_2SO_4
4	Deligiannis, <i>et. al.</i> (2011).	NaOH
5	Jenkins, <i>et. al.</i> (2014).	H_2SO_4
6	Sander, <i>et. al.</i> (2020).	H_2SO_4
7	Caetano, <i>et. al.</i> (2012)	H_2SO_4

Los catalizadores utilizados en las investigaciones se clasifican como homogéneos, es decir, se disuelven durante la reacción, y heterogéneos, al no diluirse. El KOH y NaOH se consideran como catalizadores básicos homogéneos, tienen gran porcentaje de conversión, son de bajo costo y pueden ejecutar las reacciones de esterificación y transesterificación al mismo tiempo (Cabello et al., 2017). De preferencia se usan los catalizadores básicos, tienen mayor velocidad de reacción con los triglicéridos, ya que los ácidos, como el H_2SO_4 , generan corrosión y daños en algunos equipos de trabajo (Medina Villadiego et al., 2015). Al usar el KOH como catalizador, se obtuvo mayor cantidad de ésteres metílicos logrando 97.3% en comparación con el NaOH al alcanzar 96.4% (Sander et al., 2020). Por otro lado, una de las desventajas de la transesterificación es que se debe operar con la menor cantidad de ácidos grasos libres posibles, debido a la facilidad de neutralización de la sustancia con el catalizador

creando la formación de jabones y residuos, que no dan valor agregado a la cantidad de biocombustible generado (Gaurav et al., 2016).

Para caracterizar el biodiésel producido, es importante determinar el tipo y cantidad de ésteres metílicos encontrado en el mismo, ya que estos son parámetros esenciales en la producción del biocombustible. Todos los estudios evaluados emplearon la cromatografía de gases para determinar el contenido y tipo de ésteres metílicos reportados en las investigaciones. Aunque varios estudios reportaron el mismo o similar contenido de biodiésel producido, al realizar la cromatografía de gases, se observaron las variaciones en las investigaciones respecto al tipo de ésteres metílicos encontrados, entre los cuales los más destacados fueron ácido palmítico, ácido linoleico, ácido oleico y ácido esteárico. En la Figura 6, se muestra los resultados de la cromatografía de gases realizada en todos los estudios evaluados, que reportaron los porcentajes, sin considerar algún método o parámetro en específico. En otros estudios se ha reportado el uso de FTIR (Sander et al., 2020) pero en todos los casos evaluados se consideró la cromatografía de gases como mejor opción.

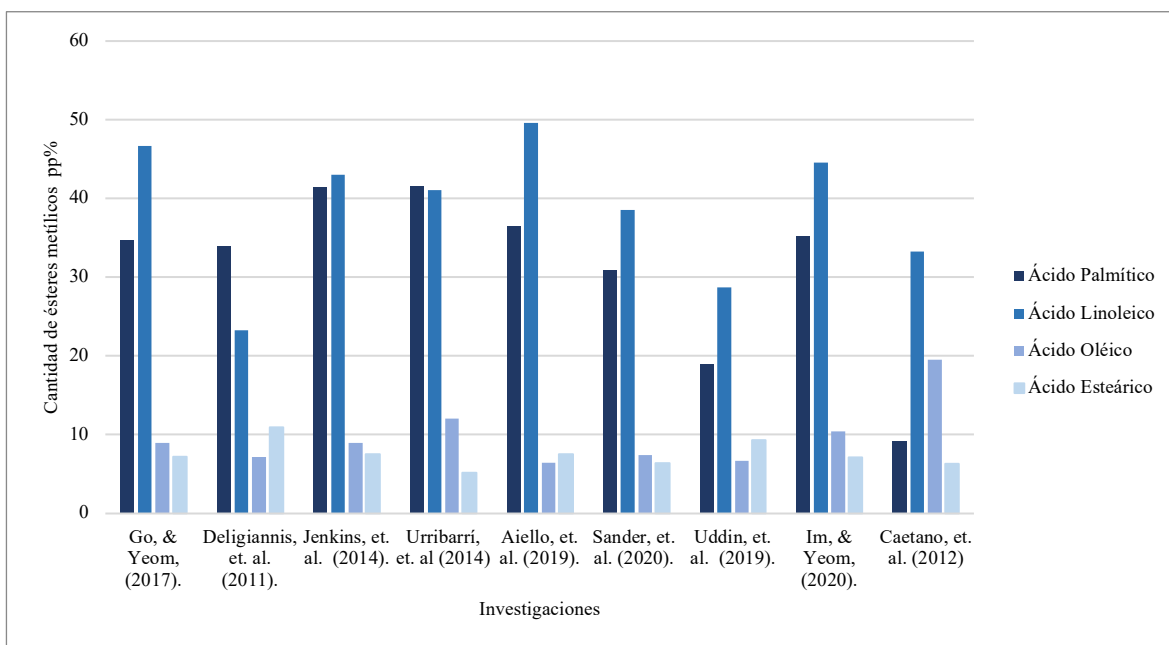


Figura 6. Resultados de ésteres metílicos.

Los cuatro ácidos metílicos reportados son los que se encuentran en mayor proporción, y de estos el ácido palmítico y linoleico son los que predominan, recordando que en el caso de los aceites vegetales tienen más cantidad de ácido oleico en contraste con la borra de café.

Se encontró una investigación que pone a prueba la producción de biocombustible a gran escala en una planta piloto. Debido a que esta producción era a una escala diferente, no se comparó de forma directa con los otros estudios evaluados. Similar a los otros estudios, también utilizaron hexano, y una temperatura de 60 °C durante dos horas. Sin embargo, a diferencia de los otros estudios utilizaron 8 kg de borra de café. Después de un proceso para la eliminación de impurezas se recuperó entre 7 y 13 pp% de aceite extraído. La transesterificación se hizo en presencia de ácido sulfúrico (H₂SO₄), y también se determinaron los ésteres metílicos por medio de la cromatografía de gases. Los resultados finales de la cantidad de ésteres presentes en el biodiésel fueron similares a los reportados en

Jenkins, *et. al.*, alcanzando valores de recuperación entre 11 a 15% (2014) (Efthymiopoulos et al., 2019). A pesar de que se reportan más investigaciones a nivel experimental, debido a la dificultad de para producir biodiésel en grandes cantidades, se corrobora que la producción de biodiésel se puede ejecutar a grande escala, respaldando los positivos resultados que a tenido en la empresa BioBean al poner en marcha el primer proyecto como empresa generadora de biocombustible a base de residuos de café.

Simultáneamente, la mayoría de las investigaciones compararon sus resultados con las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (conocida por sus siglas en inglés, ASTM) y las Normas Europeas (EN). Las normas que principalmente se consideraron para evaluar los estándares de los resultados fueron la ASTM D6371 y la EN 14214. En la Tabla 5, primero se muestra el comparativo entre ambas normas, dónde se exhibe el parámetro al cual se evalúa y rango del estándar. También, se analizaron los estudios del método de Soxhlet que presentaron comparación contra los estándares de calidad, refiriéndose al cumplimiento con los rangos establecidos en las normas.

Tabla 5. Comparación entre normatividad ASTM y EN.

Evaluación	Rango		Estudio				
	ASTM D6371 ¹	EN 14214 ²	Uddin, <i>et. al.</i> (2019).	Jenkins, <i>et. al.</i> (2014).	Deligiannis, <i>et. al.</i> (2011).	Sander, <i>et. al.</i> (2020).	Caetano, <i>et. al.</i> (2012)
Viscosidad cinemática, mm²/s	1.9 - 6	3.5 - 5	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple
Densidad, kg/m³	No se reporta	860-900	Cumple	No se reporta	Cumple	Cumple	Cumple
Tiempo de oxidación, h	3	6	Cumple	No se reporta	No cumple	No se reporta	No se reporta
Acidez, mg/g (nivel máximo)	0.05	0.5	Cumple	No se reporta	Cumple	No se reporta	No cumple
Tiempo del punto de inflamación, min	130	101	Cumple	No se reporta	Cumple	No se reporta	No se reporta
Número de cetano, min	47	51	Cumple	No se reporta	No se reporta	No se reporta	No se reporta

¹(ASTM Internacional, 2010)

²(Comité Europeo de Normalización, 2012)

Es relevante mencionar que existen otro tipo de normas para analizar la calidad del biodiésel obtenido, la EN 14708 que se refiere a la cantidad de biocombustible producido, la ASTM D6584, ISO 14105 y ISO 14106, para el contenido de monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos y formación de glicerina libre o total en el biodiésel obtenido; la ASTM D6079 para la lubricidad; y la ASTM D1500 para el color del biodiésel (L. Tejeda, 2011). Es importante asegurarse que el biodiésel producido está cumpliendo con los estándares de calidad, para asegurarse que el producto final cumple con las características necesarias para su uso seguro y eficiente, así como su comercialización, excediendo o igualando los valores del diésel fósil.

Por los resultados recopilados, se observa que las investigaciones reportan la cantidad, tipo y porcentajes de ésteres metílicos, pero no hacen una comparación entre la de borra utilizada contra el porcentaje en peso final de biodiésel producido. Asimismo, no se encontró referencia al éster metílico más importante en la obtención del biocombustible. Por medio del análisis de los estudios se comprueba que el residuo de café contiene elevado porcentaje de grasas para producir biocombustibles.

4. Conclusión.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica, se concluye que la borra de café es un buen candidato para la producción de biodiésel y se considera una opción competitiva contra otras materias primas para la sustitución de los combustibles fósiles. Sin embargo, aún hay muchos aspectos a evaluar y mejorar antes de poner en marcha la producción del biocombustible. Es relevante mencionar que existe la primera empresa que produce, distribuye y usa biodiésel a partir de la borra de café en Reino Unido, pero al compararla con los resultados de estudios, los rendimientos del biodiésel no son los suficientes. Por lo que es necesario seguir realizando investigaciones para mejorar el proceso y poder ejecutarse en otros países como Perú, México, Colombia, entre otros, que son grandes productores de café a nivel mundial.

De los estudios examinados el que obtuvo mejores resultados en la cantidad de biodiésel producido fue Aiello y colaboradores al alcanzar un promedio de 24.99%pp y cumpliendo con los estándares de la ASTM y EN, por lo que es una opción para realizarse a nivel más grande (2019). No obstante, para llevar a cabo la experimentación en una planta piloto, se tendría que verificar el costo y rendimiento de producción.

A pesar de los buenos resultados, se requiere de la continuidad en estudios y factores a analizar para determinar a qué se debe la variación de los porcentajes de extracción obtenidos y el parámetro de mayor influencia en el proceso, ya que al evaluar la temperatura y tiempo de extracción no se encontró una correlación con la cantidad de aceites alcanzados, suponiendo que se debe a otros factores o multifactores, como el tipo de café, molienda y tostado empleado, dejando la puerta abierta para futuras investigaciones.

5. Agradecimientos

Primero, agradezco a la Dra. Xanat Flores por su apoyo y guía durante esta etapa de la licenciatura, no solo al ser mi mentora en la presente investigación, sino también al ser mi maestra en diferentes asignaturas, por su paciencia y tutoría. Asimismo, doy gracias a mis padres Martha Mendoza y Heriberto Rodríguez por brindarme su apoyo a lo largo de mi vida, al ser los pilares de mi formación. Gracias mamá, por ser mi orgullo y ejemplo a seguir. A mi hermano Luis Rodríguez, quien me da el ejemplo y motivación de mejorar como persona y profesionalmente.

A mis amigas durante la carrera Daniela, Karen, Ana Paola, Arantzazu, María Fernanda, Sofía y Adriana, al compartir grandes momentos juntas y creer en mí. A mis amigas Ingrid y Salma, por su motivación y soporte en cada proyecto. A mis amigas del intercambio por enseñarme un lado diferente de la vida. A mi tía Patricia, por el cariño que me tuvo, saber que le hubiera gustado verme crecer y desarrollarme. A mi abuela Martha al enseñarme que las cosas no se logran fácilmente.

Anaid Alejandra Rodríguez Mendoza.

6. Referencias

- Aiello, C., Salazar, Y., Urribarrí, A., Arenas, E., Sánchez, J., & Ysambertt, F. (2019). Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café: Esterificación con H₂SO₄ y transesterificación con KOH. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1), 53-66. <https://doi.org/10.18359/rcin.2899>
- ASTM Internacional. (2010). *ASTM D6371 05 Standard Test Method for Cold Filter Plugging Point of Diesel and Heating Fuels*.
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. *Polo del Conocimiento*, 3(7), 420. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>
- Bendall, S., Birdsall-Wilson, M., Jenkins, R., Chew, Y. M. J., & Chuck, C. J. (2015). Showcasing Chemical Engineering Principles through the Production of Biodiesel from Spent Coffee Grounds. *Journal of Chemical Education*, 92(4), 683-687. <https://doi.org/10.1021/ed500824z>
- Bio-Bean. (s. f.). *Coffee Pellets*. Recuperado 23 de febrero de 2021, de <https://www.bio-bean.com/elements/pellets/>
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2017). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad*, 74(577), Article 577. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320756>
- Caetano, N., Silva, V., & Mata, T. M. (Eds.). (2012). *Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production* (Chemical engineering transactions, Vol. 26). AIDIC. <https://www.aidic.it/cet/12/26/045.pdf>
- Camús, J. M. G., & Laborda, J. Á. G. (s. f.). *Biocarburantes líquidos: Biodiésel y bioetanol*. 125.
- Deligiannis, A., Papazafeiropoulou, A., Anastopoulos, G., & Zannikos, F. (2011). *Waste Coffee Grounds as an Energy Feedstock*. 7.
- Efthymiopoulos, I., Hellier, P., Ladommatos, N., Kay, A., & Mills-Lamprey, B. (2019). Effect of Solvent Extraction Parameters on the Recovery of Oil From Spent Coffee Grounds for Biofuel Production. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 253-264. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0061-4>
- EN 14214 *Liquid petroleum products—Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications—Requirements and test methods*. (2012).
- García, D. T., Díaz Domínguez, Y., Rondón Macías, M., Santana, E. F., & Rodríguez, R. P. (2017). *Extracción de aceites de origen vegetal*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11047.55201>
- Gaurav, A., Ng, F. T. T., & Rempel, G. L. (2016). A new green process for biodiesel production from waste oils via catalytic distillation using a solid acid catalyst – Modeling, economic and environmental analysis. *Green Energy & Environment*, 1(1), 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2016.05.003>
- Go, Y. W., & Yeom, S. H. (2017). Statistical analysis and optimization of biodiesel production from waste coffee grounds by a two-step process. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 22(4), 440-449. <https://doi.org/10.1007/s12257-017-0163-7>
- Gutiérrez, C., Lira, J. A., Quiroz, E., & Martínez, S. I. (2020). Conversión de residuos agroindustriales para la generación de biocombustibles, productos de valor agregado

- y bioenergía. *DIGITAL CIENCIA@UAQRO*, 13(1), 27-35.
- ICO, O. I. del C. (2020). *Informe del mercado del café Abril 2020*. (N.º 7). <http://www.ico.org/documents/cy2019-20/cmr-0420-c.pdf>
- Im, G., & Yeom, S. H. (2020). Repeated Biodiesel Production from Waste Coffee Grounds via a One-step Direct Process with a Cartridge Containing Solid Catalysts Manufactured from Waste Eggshells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 25(4), 623-632. <https://doi.org/10.1007/s12257-019-0369-y>
- INECC. (2018). *Informe Nacional de la Calidad del Aire, México 2018* (p. 395). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>
- ISNP. (2020). *Contaminación del aire y salud*. Instituto Nacional de Salud Pública, Dirección en Salud Ambiental, Gobierno de México. <https://www.insp.mx/infografias/contaminacion-aire-salud.html>
- Kim, J. Y., & Yeom, S. H. (2020). Optimization of Biodiesel Production from Waste Coffee Grounds by Simultaneous Lipid Extraction and Transesterification. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 25(2), 320-326. <https://doi.org/10.1007/s12257-019-0353-6>
- Luque de Castro, M. D., & Priego, F. (2010). Soxhlet extraction: Past and present panacea. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2383-2389. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.027>
- Medina Villadiego, D., Ospino Roa, Y., & Tejeda Benítez, L. (2015). Esterificación y Transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Luna Azul*, 40, 25-34. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.3>
- Montero, G., Jaramillo, B. E., Vázquez, A. M., Coronado, M. A., García, C., & Toscano, L. (2016). Experiencias de aprovechamiento de residuos para la generación de biodiésel en Colombia y México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(Residuos sólidos), 77-90. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.06>
- Ordoñez, B. M., Moreno, L. C. C., Pérez, W. R., Murcia, M. A., & Alvarado, E. R. (2013). Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 61-70.
- Riegelhaupt, E., Odenthal, J., & Janeiro, L. (2016). *Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento* (N.º BIENL16163; p. 129). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/275444/Final_Report.pdf
- Sander, A., Petračić, A., Parlov Vuković, J., & Husinec, L. (2020). From Coffee to Biodiesel—Deep Eutectic Solvents for Feedstock and Biodiesel Purification. *Separations*, 7(2), 22. <https://doi.org/10.3390/separations7020022>
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>
- SENER. (2018). *Balance Nacional de Energía 2017*. Secretaría de Energía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf
- SENER. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. Secretaría de Energía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf
- Tejeda, C., Tejeda, L., Villabona, Á., & Monrroy, L. (2013). Obtención de biodiésel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Luna Azul*, 36, 10-25.

- <https://doi.org/10.17151/luaz.2013.36.2>
- Tejeda, L. (2011). *Bases conceptuales para la estimación de las propiedades de los biocombustibles y sus mezclas*. 166.
- Uddin, M. N., Techato, K., Rasul, M. G., Hassan, N. M. S., & Mofijur, M. (2019). Waste coffee oil: A promising source for biodiesel production. *Energy Procedia*, 160, 677-682. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.221>
- UNEP. (2019). *Emissions Gap Report 2019* (United Nations Environment Programme). <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- UNFCCC. (2016). *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 11 December 2015*. (p. 42). United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf>
- Urribarrí, A., Zabala, A., Sánchez, J., Arenas, E., Chandler, C., Rincón, M., & González, E. (2014). *Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel*. 14, 2, 129-139.
- Valdés-Rodríguez, O. A., & Palacios-Wassenaar, O. M. (2016). *Evolución Y Situación Actual De Plantaciones Para Biocombustibles: Perspectivas Y Retos Para México. Agroproductividad*. 9(2), 33-41.
- Valle, V. M. (2011). Biofuels: A Cure or a Curse? Implications of Increased Production and Consumption in Mexico and the United States: Biofuels. *Latin American Policy*, 2(2), 182-221. <https://doi.org/10.1111/j.2041-7373.2011.00039.x>
- Villarreal-Peña, D., Baena-Clavijo, L. M., & Posada-Suárez, H. E. (2012). *Verde de líneas avanzadas de Coffea arabica*. 22.