

# Biorrefinería energética a partir de semilla residual de aguacate (*Persea americana* cv. “Hass”)

## Energetic biorefinery from waste avocado seed (*Persea americana* cv. ‘Hass’)

Peraza-Regalado, K.A.<sup>1</sup>, Valdez-Ontiveros, J.E.<sup>1</sup>, Juárez-Cota, M.F.<sup>2</sup>, Ambriz-Pérez, D.L.<sup>1,2,3</sup>, Santos-Ballardo, D.U.<sup>2,4\*</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Carr. Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3 Genaro Estrada, 82199. Mazatlán, Sinaloa. <sup>2</sup>Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Carr. Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3 Genaro Estrada, 82199 Mazatlán, Sinaloa. <sup>3</sup>Estancias posdoctorales por México, 2022. CONAHCYT. <sup>4</sup>Laboratorio de ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán., Av. Sábalo Cerritos S/N, 82112. Mazatlán, Sinaloa.

### RESUMEN

En México, el 90.2 % de la energía proviene de combustibles fósiles. El aguacate Hass “*Persea americana*” es un producto con una gran importancia comercial, sin embargo, su procesamiento se asocia a la generación de residuos que usualmente no se manejan de manera adecuada, es importante que este tipo de subproductos se revalorice para disminuir la huella ambiental de la industria, al mismo tiempo que se obtengan productos de valor agregado. En el presente trabajo se realizó la caracterización de la semilla residual de aguacate, analizando su contenido de humedad, sólidos totales, volátiles y fijos, contenido de cenizas, además se realizó extracción de aceite y se analizó su perfil de ácidos grasos. La semilla presentó 52.82 % de humedad, 95.68 % de sólidos totales y 97.78 % de sólidos volátiles, lo que sugiere buen potencial para la transformación de biocombustibles. La extracción de aceite de semilla con solventes mostró un rendimiento de 3.6 %. Con un perfil de ácidos grasos que sugiere que podría utilizarse para la producción de biodiésel con buena calidad. Mientras que, el mejor potencial metanogénico de la semilla desgrasada mostró una producción total acumulada de 178.94 ± 4.90 mililitros de metano por gramo de sólido volátil (mL CH<sub>4</sub>/gSV). Además, el digestato generado de la digestión anaeróbica de la semilla desgrasada con el inóculo Be-Gaia mostró un buen potencial como biofertilizante, manteniendo resultados similares a utilizar un fertilizante comercial. Los resultados del presente trabajo sugieren que a partir de este material es posible generar rutas de proceso para una biorrefinería energética que aproveche la semilla de aguacate *Persea americana* “Hass”.

**PALABRAS CLAVE:** Biorrefinería, Biocombustibles, Biofertilizante, Semilla de aguacate

### ABSTRACT

In Mexico, almost 90.2 % of the energy comes from fossil fuels. The avocado Hass “*Persea americana*” is a product of great commercial importance; however, its processing is associated with waste generation, which usually is not managed properly. It is important that this type of by-product could be re-valORIZED to reduce the environmental footprint of this industry while value-added products are obtained. In the present work, the characterization of the residual defatted avocado seed was carried out, analyzing its moisture content, total, volatile, and fixed solids, ash content, and oil extraction was also carried out, and the fatty acid profile was analyzed. The seed presented 52.82 % humidity, 95.68 % total solids, and 97.78 % volatile solids, which suggests good potential for biofuel transformation. Seed oil extraction with solvents showed a yield of 3.6 %, with a fatty acid profile that indicates that it could be used for good-quality biodiesel production. On the other hand, the best methanogenic potential of the defatted seed showed a total accumulated production of 178.94 ± 4.90 milliliters of methane per gram of volatile solid (mL CH<sub>4</sub>/gVS). Furthermore, the digestate generated from the anaerobic digestion of the defatted seed with the Be-Gaia inoculum showed good potential as a biofertilizer, maintaining results similar to commercial fertilizer. This work's results suggest that it is possible to generate process routes for an energy biorefinery that takes advantage of the *Persea americana* “Hass” avocado residual seed from this material.

**KEYWORDS:** Biorefinery, Biofuels, Biofertilizer, Avocado seeds

\*Autor de correspondencia: Ulises Santos Ballardo

Email: [ulises.ballardo@ciad.mx](mailto:ulises.ballardo@ciad.mx); ORCID ID: [0000-0001-5058-8621](https://orcid.org/0000-0001-5058-8621)

†Estos autores tuvieron el mismo nivel de participación en el presente trabajo.

Registro ORCID Autores: PR: [0009-0006-8845-5529](https://orcid.org/0009-0006-8845-5529); VO: [0009-0009-8091-530X](https://orcid.org/0009-0009-8091-530X); JC: [0009-0001-5835-5934](https://orcid.org/0009-0001-5835-5934); AP: [0000-0001-5722-891X](https://orcid.org/0000-0001-5722-891X);

## INTRODUCCIÓN

En la constante búsqueda de alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para satisfacer nuestras crecientes necesidades energéticas, el desarrollo de fuentes de energía renovables ha pasado a ser una prioridad global. Durante décadas, la principal fuente de energía de la humanidad ha mostrado una evidente dependencia de los combustibles fósiles, comprendiendo el 80 % de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial; esto se relaciona directamente con casi dos tercios de las emisiones globales de dióxido de carbono (Foster & Elzinga, 2016; Gómez *et al.*, 2016).

En México, el consumo de energía a partir de combustibles fósiles asciende al 90.2 % y se ha reportado que su explotación desmedida ha tenido un impacto relevante en el cambio climático y la degradación del medio ambiente (Reuters, 2015).

En respuesta a la problemática de los combustibles fósiles, los biocombustibles se presentan como una alternativa con buen potencial, ya que ofrecen la posibilidad de reducir la dependencia de los carburantes fósiles y, al mismo tiempo, contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos productos, elaborados a partir de materias primas renovables, se considera que pueden jugar un papel fundamental en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible (Orrego-Alzate & Cardona-Alzate, 2020).

Por otro lado, en México la capacidad instalada para generar energía a partir de la biomasa es de alrededor de 640 Mega Watts (MW) con una capacidad de generación de 1,400 GigaWatts-hora (GWh). Se ha reportado que la producción de bioenergía está presente en 21 estados, siendo Veracruz el líder con 264 MW de capacidad instalada. El recurso principal utilizado es el bagazo, residuos agrícolas y desechos orgánicos de origen vegetal o animal (SENER, 2023).

Por otro lado, en el caso específico de México, que se considera un país con una gran diversidad de recursos naturales y una relevante producción agrícola, donde destacan productos como el aguacate "Hass" (*Persea americana* "Hass"), el cual además de ser un fruto valorado a nivel mundial, presenta un potencial inexplorado como fuente de biocombustibles. Además, México es uno de los principales productores y exportadores de aguacate a nivel mundial, se ha reportado que el cultivo del aguacate "Hass" ha crecido notablemente en los últimos años. Su producción alcanzó los 2.4 millones de toneladas para el año de 2020 en

México, representando el 43 % de la producción mundial (Cruz-López *et al.*, 2022; Rodríguez-Martínez *et al.*, 2022).

De la producción total de aguacate, una parte se exporta, y la otra se queda en el país para su consumo y procesamiento. El sector productivo de aguacate genera una gran cantidad de residuos derivados de la obtención de productos como guacamole, conservas, pastas, etc.; dichos residuos cuentan con un alto contenido de materia orgánica que tiene potencial de transformarse en productos de valor agregado (ya sea para la producción de energía térmica u obtención de biocombustibles). El principal residuo de esta industria es la semilla de aguacate, que podría convertirse en fuente de compuestos bioactivos y/o biocombustibles, aunque su potencial para generación de biorrefinerías no se ha estudiado a fondo (García-Vallejo *et al.*, 2023; Sandoval-Contreras *et al.*, 2023).

Perea-Moreno *et al.* (2016) analizaron varios parámetros de este subproducto, tales como humedad (35.2 %), poder calorífico superior o PCS (19.145 MJ/kg), poder calorífico inferior o PCI (17.889 MJ/kg), y la composición elemental (48.01 % de carbono, 5.76 % de hidrógeno, 0.45 % de nitrógeno), contenido de cenizas (2.86 %) y contenido de aceite (1.72 %). Se estableció una correlación entre el análisis elemental y los valores más altos de calentamiento (PCS) de la semilla de aguacate, lo que indica que este material tiene potencial como fuente de biocombustible.

Por otro lado, García-Vallejo *et al.* (2023) analizaron el potencial uso de residuos de aguacate para obtención de compuestos antioxidantes y biogás, reportando la recuperación de compuestos fenólicos (como catequinas y epicatequinas) usando extracciones con ácido acético y se reportó también una producción de 234 nanómetros cúbicos de metano por kilogramo de sólido volátil (nm<sup>3</sup>/kg SV), concluyendo que dicho material presenta un interesante potencial como fuente de antioxidantes y biogás.

Si bien se ha reportado la potencial versatilidad de esta semilla como material para diversos usos, tales como productos cosméticos y alimenticios, solo se han esbozado algunos intentos de aprovechar la semilla residual de aguacate como fuente energética, además de que en la actualidad hay muy pocos reportes del aprovechamiento integral de la biomasa mediante esquemas de biorrefinerías (García-Vallejo *et al.*, 2023; Sandoval-Contreras *et al.*, 2023). Por lo que, en el presente trabajo, se exploró el potencial de la semilla residual de aguacate "Hass" como

fuelle de una biorrefinería energética para la obtención en cadena de biodiésel y biogás (a partir de la biomasa desgrasada). Además, se analizó el potencial de los digestatos resultantes del proceso de digestión para la producción de biofertilizante. Este enfoque podría representar una parte de una solución prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, al mismo tiempo, contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como a la disminución de residuos sólidos agroindustriales, avanzando hacia un futuro energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### MATERIAL BIOLÓGICO

La biomasa residual de semilla de aguacate *Persea americana* "Hass" fue recolectada de taquerías locales de la ciudad de Mazatlán, Sinaloa.

Por otro lado, los inóculos utilizados en las pruebas de potencial metanogénico fueron lodos activados proporcionados por las empresas locales Be-Gaia® y Tostaditas Blancas®, estos fueron denominados como LB y LT, respectivamente.

### CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE E INÓCULOS (SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES, HUMEDAD Y CENIZAS)

Los contenidos de humedad (H), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos o cenizas (SF) se evaluaron según lo reportado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (EPA, 2001). Para la determinación de humedad, se realizó una prueba por triplicado empleando semillas de aguacate de un peso aproximado de 29.5 g. Se pesaron los platos ( $W_{\text{platos}}$ ) y las muestras ( $W_{\text{muestra}}$ ) y se ingresaron a un horno de secado por convección (Novatech® HS35-ED) a 70°C durante 48 horas. Transcurrido ese tiempo, se tomó el peso total seco del recipiente con la muestra y se comparó con el peso total inicial que se tenía para obtener el porcentaje de humedad de la semilla completa. Para el cálculo de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105°C por 15 minutos en un horno de secado (Novatech® HS35-ED) para la eliminación de humedad. Se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso ( $W_{\text{crisol}}$ ). Posteriormente, se colocaron 5 g de la muestra y se registró su peso ( $W_{\text{muestra}}$ ), finalmente se secaron las muestras a 103-105°C por 24 h. Se dejaron enfriar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente (25°C) y se registró el peso ( $W_{\text{total}}$ ). Las pruebas

se realizaron por triplicado y el resultado se presentó como porcentaje promedio  $\pm$  desviación estándar. Para el caso de la caracterización de los lodos activados de Be-Gaia (LB) y los lodos activados de Tostaditas Blancas (LT) se realizó el mismo proceso, pero con muestras de 6 g. Para el cálculo de porcentaje de sólidos totales se empleó la ecuación 1 (EPA, 2001).

$$(1) \quad ST (\%) = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{muestra}} - W_{\text{crisol}}} * 100$$

Donde: ST (%) = porcentaje de sólidos totales;  $W_{\text{total}}$  = Peso de crisol + muestra;  $W_{\text{crisol}}$  = Peso de crisol;  $W_{\text{muestra}}$  = Peso de muestra.

Para la determinación de SV y SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla a 550°C durante 6 horas, posteriormente el residuo fue pesado ( $W_{\text{volátil}}$ ). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios  $\pm$  desviación estándar, empleando las ecuaciones 2 y 3 para su cálculo (EPA, 2001).

$$(2) \quad SV (\%) = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{volátil}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} * 100$$

Donde: SV (%) = porcentaje de sólidos volátiles;  $W_{\text{total}}$  = Peso de crisol + muestra;  $W_{\text{crisol}}$  = Peso de crisol;  $W_{\text{volátil}}$  = Peso de muestra después del proceso de calcinación.

$$(3) \quad SF (\%) = \frac{W_{\text{volátil}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} * 100$$

Donde: SF (%) = porcentaje de sólidos fijos;  $W_{\text{total}}$  = Peso de crisol + muestra;  $W_{\text{crisol}}$  = Peso de crisol;  $W_{\text{volátil}}$  = Peso de muestra después del proceso de calcinación.

### PREPARACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE

Las semillas fueron preparadas mediante un secado en un horno de convección (Novatech® HS35-ED) a 70°C durante 48 horas con la finalidad de retirar la humedad. Posteriormente, se trituró y molió la semilla hasta obtenerse una harina fina con el objetivo de contar con mayor superficie de contacto con el disolvente y alcanzar la mejor extracción de aceite posible. Con la harina de aguacate se prepararon 3 muestras de aproximadamente 63 g cada una, envueltas en papel filtro de celulosa para su ingreso al equipo de extracción soxhlet.

### EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE AGUACATE

Se realizó la extracción de aceite mediante la técnica soxhlet utilizando la metodología propuesta por la Association of Official Analytical

Chemists (AOAC). En la figura 1 se muestra el montaje de los equipos Soxhlet utilizados para el proceso de extracción. Se empleó como solvente una mezcla de metanol:cloroformo (2:1). La prueba se realizó por triplicado y el resultado se representó como porcentaje promedio de aceite extraído ( $\pm$  desviación estándar). Posteriormente, el producto se colocó en un rotavapor a 60°C para la separación de la mezcla de solventes (AOAC, 1999). El porcentaje de aceite extraído se calculó por la diferencia de peso mediante la ecuación 4.

$$(4) \text{ Aceite (\%)} = \frac{(\text{Matraz} + \text{Aceite}) - \text{Matraz}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Finalmente, la biomasa residual de semilla desgrasada de aguacate se secó a 60°C durante 24 horas para eliminar el exceso de solventes y se almacenó ( $4 \pm 1^\circ\text{C}$ ) para su posterior uso.

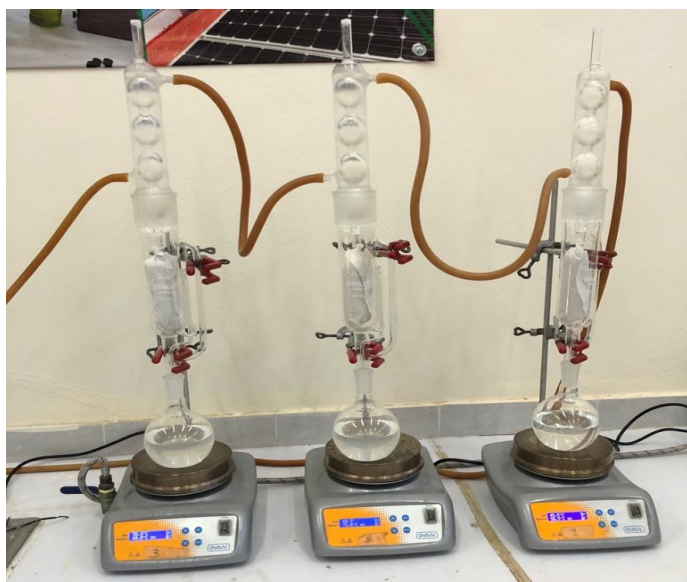


Figura 1. Equipos de extracción Soxhlet. *Elaboración propia*

#### DETERMINACIÓN DE POTENCIAL METANOGÉNICO DE LA SEMILLA DESGRASADA DE AGUACATE

Se llevaron a cabo pruebas de determinación del potencial metanogénico mediante procesos por lotes haciendo uso de dos inóculos distintos. Además, se utilizaron dos sustratos: (1) harina de semilla de aguacate completa (esto como control y comparativo de la posible producción de biogás a partir de la semilla completa), y (2) harina obtenida a partir de residuos de semilla de aguacate desgrasada, resultante del proceso de extracción de aceite descrito en el punto 2.4. Para el set experimental se utilizaron biorreactores de vidrio con capacidad de 60 mL, los cuales

fueron sellados herméticamente haciendo uso de un septum para posteriormente realizar pruebas periódicamente. Para las muestras se manejó una relación de 2:1 en proporción de inóculo:sustrato, y cada biorreactor se trabajó con un volumen de 45 mL (Armenta-Medel *et al.*, 2023). Los reactores se mantuvieron a una temperatura constante de  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  para la digestión anaeróbica, con un tiempo de retención hidráulica de 42 días. Todos los biorreactores fueron homogenizados diariamente mediante agitación manual para asegurar la mezcla adecuada del inóculo con el sustrato (Santos-Ballardo *et al.*, 2015; Velarde-Meza *et al.*, 2023).

El volumen de metano se midió usando un eudiómetro con desplazamiento de NaOH (1N), además se efectuaron mediciones con biorreactores que contenían solamente inóculo (utilizados como blancos) para obtener la producción endógena de estos (para restarlo a la producción de los demás biorreactores que contienen mezcla de sustrato e inóculo para el ajuste de producción de metano) (Santos-Ballardo *et al.*, 2015).

#### DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS

El contenido de ácidos grasos se realizó mediante una extracción, separación, metilación, purificación y una cuantificación por los métodos descritos por Folch *et al.* (1957) y la AOAC (1999). La detección y cuantificación de los ácidos grasos se realizó mediante un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 7890B equipado con un detector de ionización de flama con una columna capilar de 30 cm x 0.32 mm x 0.24  $\mu\text{m}$  (Omegawax 320) marca Supelco. La temperatura del inyector y detector fue programada a 250°C por 40 minutos, para la separación y cuantificación de los ácidos grasos se empleó una mezcla de 37 ácidos grasos.

#### PRUEBA DE POTENCIAL DE MEJORADOR DE SUELOS DE LOS DIGESTATOS

Se emplearon 2 charolas de germinación con 338 cavidades cada una, en estas se asignaron 5 segmentos con 65 cavidades respectivamente, dentro de las cuales se introdujeron 2 semillas de maíz junto a un sustrato especial para el cultivo (Turba Terrafertil®). El riego se llevó a cabo con un atomizador de 250 mL tres veces al día; durante la mañana, en la tarde cuando no había radiación solar directa y durante la noche.

Transcurridos seis días de cultivo, todas las cavidades habían germinado y alcanzado una considerable altura para el inicio del experimento. Para

la prueba con el digestato se empleó una jeringa de 3 mL para agregar alrededor de 1.5 mL de digestato obtenido de la producción de biogás contando con 2 muestras: (1) desgrasada Tostaditas Blancas (digestato obtenido de la digestión anaeróbica de semilla de aguacate desgrasada con LT) y (2) desgrasado Be-Gaia (digestato obtenido de la digestión anaeróbica de aguacate desgrasada con LB). Además de estos, se incluyó en el ensayo un fertilizante comercial (Agrolita®) como control positivo. El último segmento se dejó crecer sin ningún mejorador de suelo, mismo que se usó como control negativo.

Una vez añadidos los digestatos y fertilizante, se realizaron mediciones de altura cada tres días empleando 10 cultivos al azar para obtener una estimación del promedio de altura de la sección. Posteriormente, avanzada una semana, se realizaron pruebas comparativas como complemento del análisis.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados para la caracterización de la semilla de aguacate, las pruebas de potencial metanogénico y las pruebas de potencial de biofertilizante se expresaron como promedio con desviación estándar ( $n=3$ ,  $n=3$  y  $n=10$ , respectivamente). Para analizar diferencias significativas se realizaron pruebas ANOVA y comparación de medias por la prueba de Fisher (LSD,  $\alpha=0.05$ ). Utilizando el software estadístico Minitab® 18.

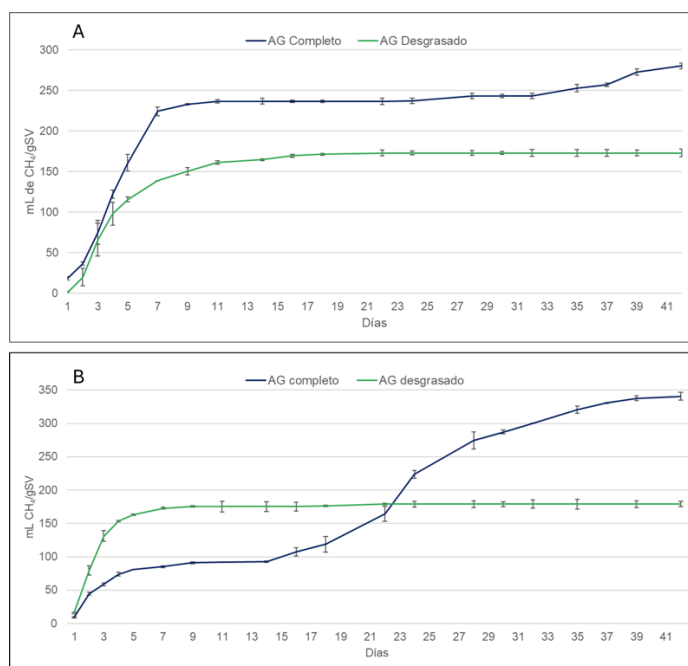
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE

La cantidad de ST, SV y SF obtenidos por la metodología propuesta se muestran en la tabla 1 (AOAC, 1999). El contenido de humedad de la semilla de aguacate completa fue de  $52.82 \pm 0.030$  %, cifra cercana a la obtenida en un estudio previo de caracterización de este tipo de materiales, donde el porcentaje de humedad para la semilla de aguacate fue de  $44.4 \pm 1.9$  % (di Bitonto *et al.*, s.f.).

En cuanto a los ST, se observó una variación importante (con diferencia estadística significativa), el valor bajo observado en la semilla desgrasada puede estar relacionado con que esas muestras se sometieron a un proceso de secado previo. En cuanto a SV, se reportó un valor alto, de aproximadamente 98 % para ambos sustratos, esto es importante porque este parámetro está relacionado con la cantidad de materia orgánica que puede ser aprovechable para su transformación y

utilización; por lo que valores altos representan mejor potencial metanogénico. Los resultados obtenidos en el presente trabajo son comparables directamente con lo obtenido por Perea-Moreno *et al.* (2016), donde realizaron la caracterización de semilla de aguacate (*Persea americana* L.) obteniendo resultados de H (35.20 %), SF (2.86 %), ST (64.8 %) y SV (97.14 %), concluyendo que este subproducto tiene buen potencial para obtención de bioenergía.



**Figura 2.** Producción acumulada de metano durante la digestión anaeróbica de semillas de aguacate completas y desgrasadas utilizando dos inóculos anaeróbicos (A: Lodos activados de tostaditas blancas® y B: Lodos activados de Begaia®). Los datos representan el promedio con desviación estándar ( $n=3$ ). mL CH<sub>4</sub>/gSV: Mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor.

En la tabla 1, se comparan los parámetros de caracterización realizados en el presente trabajo para la semilla de aguacate completa y desgrasada, con otras fuentes de biomasa actualmente utilizadas para biocombustibles como la semilla de oliva y la cáscara de almendra reportados por Mata-Sánchez *et al.* (2013) y Gómez *et al.* (2016), respectivamente. Se observa que el porcentaje de humedad de la semilla de aguacate casi triplica a la humedad presentada en la semilla de oliva, y es seis veces mayor a la cáscara de almendra; por otro lado, el porcentaje de sólidos volátiles se encuentra más de 10 por ciento por arriba de las otras dos fuentes. Mientras que el contenido de cenizas respecto a la semilla de oliva difiere un 1.45 % y un 1.72 % de la cáscara

de almendra; la diferencia en el contenido de cenizas con lo reportado para semillas de oliva y cascara de almendras pudo ser debido a que en los trabajos mencionados se realizó el análisis de cenizas del total de biomasa y en el presente trabajo se calculó a partir de los sólidos totales presentes. Por otro lado, los resultados obtenidos para contenido de SV indican que los materiales analizados en el presente trabajo tienen buen contenido de materia orgánica para aprovecharse en la generación de productos de interés y resultan competitivos con otros materiales que ya se han probado con los mismos fines.

### EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE AGUACATE

La obtención de aceite promedio de las tres muestras por el método soxhlet fue de  $3.6 \pm 0.09$  %, valor que pudiera considerarse bajo, sin embargo, debido a la gran cantidad de material disponible pudiera ser aceptable utilizarse con estos fines. Los resultados obtenidos están dentro del rango de reportes previos con este tipo de materiales donde se reportan contenidos de aceite (para diferentes variedades de aguacate) que abarcan un rango de 1.32 a 3.90 % (Abaide *et al.*, 2017; Morais *et al.*, 2017; Flores *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2022), también, son superiores al trabajo de Perea-Moreno *et al.* (2016), donde reportaron contenidos de aceite de semilla de aguacate en el rango de 1.46 y 1.96 %, donde a pesar de los valores aparentemente bajos, se reporta que estos materiales tienen un potencial adecuado para su uso como bioenergéticos.

### DETERMINACIÓN DE PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS

Los resultados del perfil de ácidos grasos se muestran en la Tabla 2. Se observa que el aceite de semilla de aguacate obtenido en el presente trabajo presenta mayores niveles de ácido linoleico ( $33.08 \pm 0.63$  %) y oleico ( $16.77 \pm 1.42$  %) seguido de Cis-11,14,17-eicosenoico ( $17.38 \pm 2.08$  %) y palmítico ( $11.08 \pm 1.31$  %); por otro lado, la distribución de los ácidos grasos presentes observada consistió en una mayoría de ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) alcanzando aproximadamente 58 %, mientras que los saturados (SFAs) y monoinsaturados (MUFAs), reportaron porcentajes aproximados de 23 y 20 %, respectivamente comparando el contenido de ácidos grasos del aceite de semilla de aguacate con aceite de pulpa de aguacate obtenido por prensado hidráulico, se puede apreciar un perfil similar, siendo los componentes mayoritarios el ácido palmítico, oleico, linoleico y linolénico (Huanca *et al.*, 2023).

En otra investigación, Ge *et al.* (2018) reportaron el perfil de ácidos grasos (AG) de semillas de 16 variedades de aguacate, obteniendo como ácidos grasos mayoritarios al ácido linoleico, palmítico, oleico y palmitoleico (40%, 24%, 16% y 6%, respectivamente). Además, los autores reportaron que 69 % de los AG totales fueron insaturados mientras que 31 % fueron saturados. Por otro lado, Ge *et al.* (2020) reportaron que los AG que predominaron en el aceite de semilla de aguacate fueron el linoleico, oleico y palmítico, ambos resultados fueron muy similares a los obtenidos en el presente trabajo.

### POTENCIAL DEL ACEITE DE SEMILLA DE AGUACATE COMO MATERIA PRIMA PARA BIODIESEL

El biodiesel es un biocombustible alternativo al diesel convencional, con características biodegradables, no es tóxico, presenta lubricidad adecuada para funcionar en motores diesel, un punto de inflamación alto, además, se considera libre de sulfuro y de compuestos aromáticos; este se puede obtener a partir de aceites vegetales y/o grasas animales (Ambriz-Pérez, *et al.*, 2021).

Se ha reportado que las propiedades químicas y físicas del biodiesel pueden determinarse por la composición orgánica de los ácidos grasos que lo forman, las principales propiedades que influyen la calidad del biodiesel son la longitud de cadena de los AG, y el grado de insaturación de dichas cadenas. Muchas de las variaciones de calidad del biodiesel que se obtiene a partir de diferentes materias primas se pueden explicar por estos dos factores. Por ejemplo, un grado de saturación medio de los AG, tiene una correlación muy alta con diferentes propiedades del biocombustible obtenido, destacando el desempeño en frío, la viscosidad, la densidad aparente, la gravedad específica, el número de cetano y el valor de yodo. Por otro lado, al presentarse longitudes largas en las cadenas de AG conducen a disminución en el número de cetano y a una baja estabilidad oxidativa (lo que afecta la vida de anaquel del biodiesel), aunque se mejora el desempeño en frío (Fazal *et al.*, 2011; Santos-Ballardo *et al.*, 2015). A pesar de que existen muchos parámetros de calidad para el biodiesel, la mayoría de los expertos enfoca su atención en dos propiedades consideradas como críticas: la estabilidad oxidativa y el desempeño en frío. Para un desempeño en frío adecuado se recomiendan bajas concentraciones de SFAs de cadena larga. Pero al mismo tiempo para mantener una buena estabilidad oxidativa los aceites para biodiesel deben contener bajas concentraciones de PUFAs y elevadas concentraciones de SFAs y MUFAs; debido a esto, se

recomienda de manera general que los aceites que vayan a utilizarse como materia prima para biodiesel, mantengan un perfil de ácidos grasos balanceados, lo que permitirá generar biodiesel con un desempeño adecuado (Kent-Hoekman *et al.*, 2012).

De acuerdo con el perfil de ácidos grasos obtenido en el presente trabajo (22.85 % SFAs, 19.81 % MUFAs y 57.34 % PUFAs), el aceite obtenido a partir de semilla de aguacate presenta un potencial adecuado para emplearse como fuente de biodiesel. Es decir que debido a los porcentajes de ácidos grasos presentes en el aceite de semilla de aguacate, realizar un proceso de transesterificación utilizando este componente podría resultar en un biocombustible con propiedades favorables.

### POTENCIAL METANOGÉNICO DE LA SEMILLA DE AGUACATE

Los rendimientos de la producción de acumulada de metano por gramos de sólido volátil acumulada a partir de semilla de aguacate desgrasada (y completa como comparativa) se midieron utilizando dos inóculos diferentes (LB y LT) y se realizaron pruebas de potencial metanogénico por triplicado. La figura 2 muestra la evolución de la producción neta de metano tras 42 días de digestión anaeróbica, donde la producción total acumulada correspondiente al inóculo LT fue de  $280.15 \pm 3.60$  mL CH<sub>4</sub>/gSV para la harina de semilla de aguacate completa (AGC), y de  $172.80 \pm 4.90$  mL CH<sub>4</sub>/gSV para la harina de semilla desgrasada (AGD). Por otro lado, la producción obtenida de lodos activados Be-Gaia (Tabla 3), alcanzaron una producción acumulada de  $340.61 \pm 5.80$  mL CH<sub>4</sub>/gSV para AGC, y un total de  $178.94 \pm 4.90$  mL CH<sub>4</sub>/gSV para AGD.

Estos resultados se pueden comparar con el trabajo realizado por Rashama *et al.* (2021), donde se reportó la producción potencial de metano de semillas de aguacate con un rango teórico de 449 y 592 mL CH<sub>4</sub>/gSV, basándose en la composición proximal y elemental. Los resultados obtenidos en el presente trabajo para semilla completa fueron menores; esto puede ser debido a que normalmente los cálculos teóricos de potencial metanogénico no toman en cuenta algunos factores como la compatibilidad de inóculo-sustrato, y la presencia de compuestos recalcitrantes y/o inhibidores que puedan inhibir a los microorganismos metanogénicos siendo necesario realizar las pruebas experimentales para comprobarlos (García-Vallejo *et al.*, 2023).

Existen pocos reportes del aprovechamiento de semilla de aguacate para generación de biogás, los resultados más destacados son la obtención

de 122.60-234.58 nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV (García-Vallejo *et al.*, 2023), la producción de 0.1525 nanolitros de metano por gramo de biomasa añadida al reactor (nL CH<sub>4</sub>/g de biomasa) (Vintila *et al.*, 2019) y el reporte de 201 mL biogás/g sustrato (Gómez *et al.*, 2016). Adicional a estos reportes de laboratorio, se registró que una planta de producción de aceite de aguacate localizada en Kenia, usa los residuos de aguacate (semillas y cascara) como materia prima para dos digestores anaeróbicos, donde producen más de 5000 m<sup>3</sup> de biogás (con aproximadamente 66 % de metano), una vez que se purifica el biogás (alcanzando 94 % de metano), se alcanza una producción de energía de 300 KW, lo que es suficiente para las demandas energéticas de la planta, y el exceso se utiliza para la energía de los tractores de los granjeros locales (Olivado., s.f.). Es importante destacar que en ninguna de estas aproximaciones realizaron el aprovechamiento de la semilla desgrasada o residual.

En cuanto al comportamiento de las cinéticas de producción de biogás se observó que, con LT, se mostró un comportamiento típico para sustratos ricos en materia orgánica ya que la producción se observó en los primeros 7-8 días, después de ese periodo la generación de metano fue prácticamente nula, lo que pudiera indicar que los consorcios aprovecharon la materia orgánica de manera rápida, en los primeros días de la digestión. En general, el comportamiento con el inóculo de LT fue bastante similar para ambos sustratos. Para el caso de LB se observó que la biomasa desgrasada igualmente se transformó de manera importante los primeros días del proceso, mientras que la semilla completa sufrió un periodo de adaptación y la producción se incrementó a partir del día 19 de digestión (Figura 2). También, se pudo observar que la producción de metano para ambos inóculos fue mayor con la biomasa completa de la semilla, esto puede explicarse debido a que este material aún contenía los lípidos que son los compuestos con mayor potencial metanogénico teórico (Santos-Ballardo *et al.*, 2015; Ambriz-Pérez *et al.*, 2021), y cuando se realizó el proceso de desgrasado se retiraron materiales que pudieran potenciar la producción de biogás.

A pesar de esto, la producción de biogás (metano) obtenida a partir de la biomasa desgrasada es interesante, porque se trata de un segundo producto energético ligado a un potencial biodiesel como producto inicial; sería conveniente realizar análisis del potencial energético de las dos posibles rutas propuestas (biogás a partir de semilla completa o producción de aceites para biodiesel sumándole biogás de la semilla

**Tabla 1.** Caracterización de la semilla de aguacate (completa y desgrasada)

Materia orgánica	H (%)	ST (%)	SV (% de ST)	SF (% de ST)
Semilla de aguacate completa*	52.82 ± 0.030 <sup>a</sup>	47.68 ± 0.004 <sup>b</sup>	97.78 ± 0.002 <sup>a</sup>	2.22 ± 0.002 <sup>a</sup>
Semilla de aguacate desgrasada*	1.78 ± 0.004 <sup>b</sup>	98.22 ± 0.004 <sup>a</sup>	97.49 ± 0.001 <sup>a</sup>	2.51 ± 0.001 <sup>a</sup>
Semilla de aguacate completa <sup>a</sup>	35.20	64.8	97.14	2.86
Semilla de oliva <sup>b</sup>	18.45	NR	82.44	0.77
Semilla de Almendra <sup>c</sup>	7.63	NR	82.14	0.50

Los valores reportados son el promedio con desviación estándar (n=3). % = Porcentaje; H = Humedad; SF = Sólidos fijos; ST = Sólidos totales; SV = Sólidos volátiles; NR = No reportado; \*Resultados reportados en el presente trabajo; <sup>a</sup>Perea-Moreno et al. (2016); <sup>b</sup>Mata-Sánchez et al. (2013) y <sup>c</sup>Gómez et al. (2016). Letras diferentes por columna representan diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ , LSD Fisher).

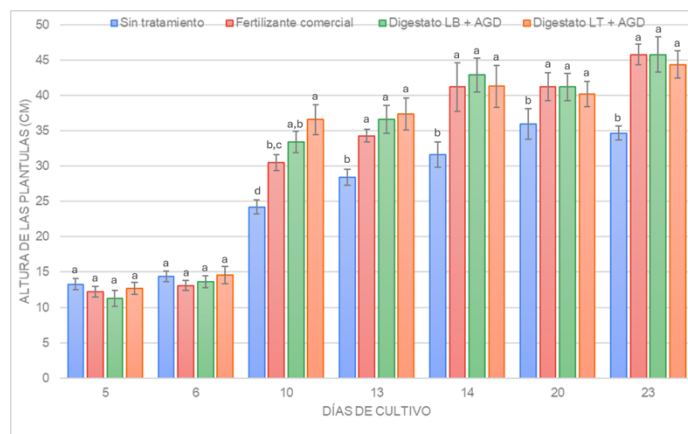
**Tabla 2.** Perfil de ácidos grasos (%) de los lípidos de la semilla de aguacate

Ácido graso	Nomenclatura	Fracción (%)
Pentadecanoico	C15:0	4.01 ± 0.16
Palmitico	C16:0	11.08 ± 1.31
Palmitoleico	C16:1, cis-9	1.41 ± 0.31
Heptadecanoico	C17:0	4.14 ± 0.28
Cis-10-Heptadecanoico	C17:1	0.48 ± 0.02
Estearico	C18:0	0.72 ± 0.04
Oleico	C18:1 (cis-9)	16.77 ± 1.42
Linoleico	C18:2 (cis-9,12)	33.08 ± 0.63
Linolenico	C18:3 (cis-9,12,15)	5.38 ± 0.62
Araquidico	C20:0	0.52 ± 0.01
Eicoseico	C20:1	0.53 ± 0.01
Cis-11,14,17-eicosenoico	C20:3	17.38 ± 2.08
Cis-11,14,17-eicosatrenoico	C20:3	0.42 ± 0.02
Behénico	C22:0	0.66 ± 0.07
Erúcico	C22:1	0.62 ± 0.04
Cis-11,14-docosadienico	C22:2	0.47 ± 0.08
Tricosanoico	C23:0	0.60 ± 0.02
Lignocerico	C24:0	1.11 ± 0.24
Cis-4,7,10,13,16,19,-docosahexaenoico	C22:6	0.61 ± 0.03
	SFAs	22.85
	MUFAs	19.81
	PUFAs	57.34

Los datos representan promedios de tres mediciones con desviación estándar. SFAs: Ácidos grasos saturados; MUFAs: Ácidos grasos mono-insaturados; PUFAs: Ácidos grasos poli-insaturados.



desgrasada) para valorar su potencial real para generación de energía. Finalmente, no se observaron diferencias estadísticas en el potencial metanogénico de la semilla desgrasada para los dos inóculos utilizados (Tabla 3), lo que pudiera sugerir una mayor versatilidad para usar el material independientemente de los inóculos disponibles.



**Figura 3.** Crecimiento registrado por las plántulas de maíz bajo diferentes tratamientos. Cada medición corresponde a promedio con desviación estándar ( $n=10$ ). Se realizó ANOVA y comparación de medias para los diferentes tratamientos en cada día de cultivo ( $\alpha=0.05$ , LSD Fisher).

### DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL COMO BIOFERTILIZANTE DE LOS DIGESTATOS OBTENIDOS DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Los resultados de la prueba de crecimiento de plántulas de maíz demostraron que la adición de los digestatos obtenidos a partir de las digestiones anaeróbicas de la AGD (con diferentes inóculos) tuvieron efectos positivos en el crecimiento de las plantas, comparados con el control (sin fertilizante). Como control positivo se utilizó un fertilizante comercial.

En la figura 3, se muestra el crecimiento registrado por las muestras durante el período de estudio. A lo largo de 23 días no se observaron diferencias significativas entre los dos tratamientos adicionados con el digestato y el tratamiento con el fertilizante comercial; mientras que el tratamiento que no fue adicionado con ningún mejorador de suelos fue significativamente menor.

Estos resultados obtenidos son interesantes ya que se demuestra que la aplicación como biofertilizante de los digestatos, obtenidos a partir de la digestión anaeróbica de las semillas desgrasadas de aguacate, presenta un potencial como promotor de crecimiento vegetal equiparable a los

productos comerciales (basados en nitrógeno, urea y/o amoníaco), sin embargo, se trata de un componente orgánico derivado del aprovechamiento de biomasa residual de aguacate, por lo que evita las desventajas ambientales de este tipo de productos (Santos-Ballardo *et al.*, 2015; Armenta-Medel *et al.*, 2023; Velarde-Meza *et al.*, 2023), esto puede representar un impulso para el aprovechamiento de este tipo de residuos bajo el enfoque de biorrefinería, validando el uso de los digestatos obtenidos de la digestión anaeróbica.

### CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la semilla de aguacate cuenta con un porcentaje de materia orgánica aprovechable bastante alto, y que, aunque el rendimiento del proceso de extracción de aceite pudiera parecer bajo, se encuentra dentro del rango reportado en trabajos previos. Además, el perfil de los ácidos grasos obtenidos muestra potencial para posible materia prima para biodiesel, aunque se recomendaría realizar algunas pruebas de caracterización como índice de cetano, índice de acidez, índice de peróxido, etcétera.

Además, los resultados de la generación de biogás fueron significativamente altos, observándose que la semilla completa muestra potencial metanogénico más elevado que la semilla desgrasada; sin embargo, este último material presenta la ventaja de que generaría energía renovable a partir de un segundo proceso aprovechando el subproducto de la extracción de aceite, además de que mostró el mismo potencial utilizando ambos inóculos, dándole mayor versatilidad en su potencial uso como fuente de biogás al no presentar diferencias entre los inóculos utilizados.

Por otro lado, el digestato generado a partir de la digestión anaeróbica de la semilla desgrasada (con ambos inóculos) mostró características como promotor de crecimiento vegetal similar a un fertilizante comercial con la ventaja de ser de naturaleza orgánica.

El presente trabajo puede ser un parteaguas para el aprovechamiento integral de este importante subproducto industrial, lo que permitiría la generación de 3 productos (en cadena) de valor agregado, siendo estos: aceite con potencial uso para biodiesel, biomasa desgrasada con potencial de generación de biogás y biofertilizante. Estos resultados pueden aportar a la generación de energía accesible y a la disminución de la contaminación derivada de esta importante industria, acercando a la política de cero residuos que se busca en la actualidad.

**Tabla 3.** Condiciones de operación y resumen de los resultados obtenidos en las pruebas de digestión anaeróbica por lotes de los diferentes experimentos.

	AGC + LT	AGD + LT	AGC + LB	AGD + LB
Temperatura de operación (°C)	37 ± 1	37 ± 1	37 ± 1	37 ± 1
Tiempo de retención hidráulica (TRH) (días)	41	41	41	41
Producción acumulada de metano (mL CH <sub>4</sub> gVS <sup>-1</sup> )	280.15 ± 3.60 <sup>b</sup>	172.80 ± 4.90 <sup>c</sup>	340.61 ± 5.80 <sup>a</sup>	178.94 ± 4.90 <sup>c</sup>

Los datos representan los promedios de tres mediciones con desviaciones estándar.

AGC: Semilla aguacate completa; AGD: Semilla desgrasada aguacate; LT: Lodos activados de tostaditas blancas; LB: Lodos activados de Be-gaia; mL CH<sub>4</sub>/gSV = Mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor. Letras diferentes entre columnas representan diferencias significativas estadísticamente ( $\alpha = 0.05$ , LSD Fisher).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN) por el apoyo con sus equipos e instalaciones. A la Dra. Nidia Araiza Lizarde por el apoyo técnico con las pruebas de potencial de los digestatos como biofertilizante.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Se declara que no existen conflictos de interés con respecto a la investigación, la autoría y/o la publicación de este manuscrito.

## REFERENCIAS

Abaide, E.R., Zobot, G.L., Tres, M.V., Martins, R.F., Fagundez, J.L., Nunes, L.F., Druzian, S., Soares, J.F., Dal Pra, V., Silva, J.R.F., Kuhn, R.C., Mazutti, M.A. (2017). Yield, composition, and antioxidant activity of avocado pulp oil extracted by pressurized fluids. *Food Bioprod. Process.* 102, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.008>. AIE. Agencia Internacional de Energía. (2015). Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) -México. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS?locations=MX>. Acceso 4 de Julio de 2024.

Ambriz-Pérez, D.L., Palomares-Ruiz, I.Y., Gómez-Córdoba, F.J., Mejias-Brizuela, N.Y., Araiza-Lizarde, N., Santos-Ballardo, D.U. (2021) Integral valorización from industrial Persian lime processing wastes (*Citrus latifolia* Tanaka): simultaneous recovery of oils

and antioxidants. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.* 20(1): 367-380.

AOAC. (1999). Official Methods of Analysis International. 17th Edition, Association of Analytical Communities, Gaithersburg.

Armenta-Medel, B., Lezama-Rosas, J.G., Juárez-Cota, M.F., Santos-Ballardo, D.U., Ambriz-Pérez, D.L. (2023). Potencial de obtención de biodiesel y biogás a partir de semilla de guamúchil (*Pithecellobium dulce*). *Identidad Energética.* 7(1): 43-47.

Cruz-López, D. F., Caamal-Cauich, I., Pat-Fernández, V.G., Reza-Salgado, J. (2022). Competitividad de las exportaciones de aguacate Hass de México en el mercado mundial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 13(2): 355-62. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2885>.

di Bitonto, L., Reynel-Avila, H., Mendoza-Castillo, D., Pastore, C., & Bonilla-Petriciolet, A. (2019). Valorization of mexican waste biomasses for bioenergy applications. *Bulgarian Chemical Communications, Special Issue B* 51: 99 – 102. DOI:10.34049/bcc.51.B.003. Disponible en: [http://bcc.bas.bg/BCC\\_Volumes/Volume\\_51\\_Special\\_B\\_2019/BCC-51-B-IProPBio.pdf#page=97](http://bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_51_Special_B_2019/BCC-51-B-IProPBio.pdf#page=97)

EPA. Environmental Protection Agency. (2001). Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015->

- [10/documents/method\\_1684\\_draft\\_2001.pdf](https://doi.org/10.1155/2019/3563750). Acceso 04 de Julio de 2024.
- Fazal, M.A., Haseeb, A.S.M.A., Masjuki, M.M. (2011). Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 15: 1314-1324.
- Flores, M., Ortiz-Viedma, J., Curaqueo, A., Rodriguez, A., Dovale-Rosabal, G., Magana, F., Vega, C., Toro, M., Lopez, L., Ferreyra, R., Defilippi, B.G. (2019). Preliminary studies of chemical and physical properties of two varieties of avocado seeds grown in Chile. *J. Food Qual.* 2019 <https://doi.org/10.1155/2019/3563750>
- Folch, J., Lee, M., Sloane-Stanley, G. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J. Biol. Chem.*, 497-509.
- Foster, S., Elzinga, D. (2016). El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. Naciones Unidas, Crónicas ONU. Recuperado de <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>. Accesado 04 de Julio de 2024.
- García-Vallejo, M.C., Solarte-Toro, J.C., Ortiz-Sanchez, M., Chamorro-Anaya, L., Chamorro-Anaya, L., Peroza-Piñeres, P., Pérez-Cordero, A., Cardona-Alzate, C.A. (2023) Exploring the production of antioxidants and biogas from avocado (*Persea Americana* var. *Americana*) residues as an alternative for developing rural bioeconomies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 33: 101089. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101089>.
- Ge, Y., Dong, X., Lui, Y., Yang, Y., Zhan, R. (2021) Molecular and biochemical analyses of avocado (*Persea americana*) reveal differences in the oil accumulation pattern between the mesocarp and seed during the fruit development period. *Scientia Horticulturae*. 276: 109717.
- Ge, Y., Si, X., Wu, B., Dong, X., Xu, Z., Ma, W. (2018) Oil content and fatty acid composition of the seed of 16 Avocado (*Persea americana*) accessions collected from southern china and their application in a soap bar. *Journal of Agricultural Science*. 10(11): 69-78.
- Gómez, N., Rosas, J. G., Cara, J., Martínez, O., Albuquerque, J. A., & Sánchez, M. E. (2016). Slow pyrolysis of relevant biomasses in the Mediterranean basin. Part 1. Effect of temperature on process performance on a pilot scale. *J Clean Prod*, 120, 181–190.
- Huanca, J. C. M., Hernández, M. C. Q., & Huamán, A. S. L. (2023). Ácidos grasos y criterios de calidad del aceite de palta obtenido mediante tres sistemas de extracción libres de solvente. *Agroindustrial Science*, 13(1), 39-49. <http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.10>
- Kent-Hoekman, S., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties and specifications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16: 143-169.
- Mata-Sánchez, J., Pérez-Jiménez, J. A., Díaz-Villanueva, M. J., Serrano, A., Núñez-Sánchez, N., & López-Giménez, F. J. (2013). Statistical evaluation of quality parameters of olive stone to predict its heating value. *Fuel*, 113, 750–756.
- Morais, D.R., Rotta, E.M., Sargi, S.C., Bonafe, E.G., Suzuki, R.M., Souza, N.E., Matsushita, M., Visentainer, J.V. (2017). Proximate composition, mineral contents and fatty acid composition of the different parts and dried peels of tropical fruits cultivated in Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.* 28, 308–318. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20160178>.
- Olivado. (2019). How Our Factory in Kenya Thrives on Sustainable Practices. Available online: <https://www.olivado.com/factory-kenya-sustainable-practices> (acceso en 7 de Julio 2024).
- Orrego-Alzate, C. E., & Cardona-Alzate, C. A. (2020). Informe técnico sobre propuestas de desarrollo de biorefinerías a partir del uso de residuos de cosecha, postcosecha e industrialización de la fruta fresca, para su aprovechamiento en la producción de energía u otros subproductos. Colombia: Fontagro.
- Perea-Moreno, A. J., Aguilera-Ureña, M. J., Manzano-Agugliaro, F. (2016). Fuel properties of avocado stone. *Fuel*. 186: 358-364.

- Rashama, C., Ijoma, G.N., Matambo, T.S. (2021). Appraising different models for predicting biomethane potential: the case of avocado oil processing by-products. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 23 (1): 409–415. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01116-0>.
- Reuters. (2015). Producción de crudo de EU crecerá en 2015: AIE. El economista. Disponible en: <https://www.economista.com.mx/mercados/Produccion-de-crudo-de-EU-crecera-en-2015-AIE-20150310-0037.html>. Ultimo acceso 15 Agosto de 2024.
- Rodríguez-Martínez, B., Romaní, A., Eibes, G., Garrote, G., Gullón, B., Del Río, P.G. (2022). Potential and prospects for utilization of avocado by-products in integrated biorefineries. *Bioresource Technology.* 364: 128034.
- Sandoval-Contreras, T., González Chávez, F., Poonia, A., Iñiguez-Moreno, M., Aguirre-Güitrón, L. (2023) Avocado Waste Biorefinery: Towards Sustainable Development. *Recycling*, 8: 81. <https://doi.org/10.3390/recycling8050081>.
- Santos-Ballardo, D. U., Font-Segura, X., Sánchez-Ferrer, A., Barrena, R., Rossi, S., & Valdez-Ortiz, A. (2015). Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and co-digestion with glycerol. *Waste Management and Research*, 33, 250–257.
- Secretaría de energía (SENER). Balance nacional de energía 2022. Disponible en: <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>. Consultado 04 de Julio de 2024.
- Tan, C.X., Tan, S.S., Ghazali, H.M., Tan, S.T. (2022). Physical properties and proximate composition of Thompson red avocado fruit. *Br. Food J.* 124, 1421–1429. <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2020-0803>.
- Vintila, T., Ionel, I., Rufis Fregue, T.T., Wächter, A.R., Julean, C., Gabche, A.S. (2019) Residual biomass from food processing industry in Cameroon as feedstock for second-generation biofuels. *BioResources* 14:3731–3745. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3731-3745>.
- Velarde-Meza, J.C., Tiznado-Osuna, L.J., Aguilera-Hernández, Y.M., Santos-Ballardo, D.U. (2023) Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas. *Identidad Energética.* 6(1): 31-37