

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Efecto de la densidad y fertilización en el rendimiento y la conversión a
biodiesel de oleaginosas subtropicales

Estudiante

Sebastián Espinosa Velasco

Asesores

Renan Pineda, Ph.D.

Luis Maldonado, Ph.D.

Honduras, Julio 2022

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	7
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos	14
Ubicación del Estudio.....	14
Fase de Campo.....	14
Fase de Laboratorio	19
Resultados y Discusión.....	32
Determinación la Relación entre la Fertilización y la Densidad en el Rendimiento de Dos Cultivos Oleaginosos.....	32
Rendimiento de Girasol	32
Rendimiento de Maní	34
Determinación del Contenido de Aceite de Cuatro Cultivos Oleaginosos Utilizando Dos Métodos de Extracción.....	38
Extracción de Aceite por el Método de Solvente	38
Extracción de Aceite por Medio de un Procesamiento de Extrusión	39
Comparación del Rendimiento de Aceite en Biodiesel de Cuatro Cultivos Oleaginosos.....	41
Análisis de Calidad del Biodiesel de los cuatro Cultivos	42

Perfil de Ácidos Grasos de Aceite y Biodiesel de cuatro cultivos oleaginosos	43
Calorimetría	46
Índice de Estabilidad Oxidativa	47
Caracterización del Fruto de Jícaro	48
Conclusiones	52
Recomendaciones	53
Referencias.....	54
Anexos.....	58

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Distanciamiento de Siembra de Cultivos Establecidos en el Estudio Ubicado en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana.....	16
Cuadro 2 Requerimientos Nutricionales del Cultivo de Girasol y Maní. Expresados en Cantidad de kg Necesarios para Producir una Tonelada de Biomasa por Hectárea.	16
Cuadro 3 Tratamientos para evaluar el efecto de la densidad y fertilización en girasol y maní cultivados en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana.....	19
Cuadro 4 Valores P del efecto de la densidad y Fertilización y Bloque en la evaluación de la Densidad y Fertilización en Girasol.....	32
Cuadro 5 Valores P del efecto de la densidad y Fertilización y Bloque en la evaluación de la Densidad y Fertilización en Maní.....	35
Cuadro 6 Medias del Contenido de Grasa Cruda en 100 Gramos por Muestra de Cada Cultivo Oleaginoso, Extraída en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	39
Cuadro 7 Medias del Contenido de Aceite Extraído por Cada 100 Gramos en Extrusión Caliente, Extraído en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	40
Cuadro 8 Rendimientos en la Transformación de Aceite a Biodiesel de Cuatro Cultivos Realizado en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	42
Cuadro 9 Resultados del Análisis de Perfil de Ácidos Grasos del Aceite de los Cuatro Granos Oleaginosos en g/100 Gramos de Aceite, Realizado en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	44
Cuadro 10 Resultados del Análisis de Perfil de Ácidos Grasos del Biodiesel de los Cuatro Granos Oleaginosos en g/100 Gramos de Biodiesel, Realizado en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	45
Cuadro 11 Medias del Contenido de Calorimetría en 100 gramos por Muestra de Cada Cultivo Oleaginoso, Obtenidas en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.	46

Cuadro 12 Tiempo de Oxidación Acelerada en el Equipo Rancimat 873 de 4 Cultivos, Obtenido en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.....	47
Cuadro 13 Peso de 20 Frutos de Jícara con Porcentajes Correspondientes a Semillas y Pulpa, Obtenido en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.	50

Índice de Figuras

Figura 1 Distancias de Siembra en Campo de Girasol y Maní en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana.	15
Figura 3 Pasos para Extraer Aceite de los Granos Oleaginosos Utilizando el Método de Extrusión Caliente.	21
Figura 4 Procedimiento de Análisis de Grasa Cruda por el Método de Extracción por Solvente, a través del Método AOAC 2003.06.	23
Figura 5 Pasos para la Determinación de Perfil de Ácidos Grasos en un Cromatógrafo de Gases, Utilizando el Método AOCS Ce 2b 11.....	25
Figura 6 Proceso de para Obtener Biodiesel a través de la Transesterificación de un Aceite.....	28
Figura 7 Procedimiento para Realizar Análisis de Calorimetría de una Muestra Oleaginosa, Utilizando el Calorímetro Parr 6100.....	29
Figura 8 Proceso de Análisis de Oxidación Acelerada, Utilizando el equipo Rancimat 873.	30
Figura 9 Efecto de Dos Densidades Poblacionales en el Rendimiento de Girasol (tn/ha).....	34
Figura 10 Efecto de Dos Densidades Poblacionales en el Rendimiento de Maní (tn/ha).....	36
Figura 11 Efecto de Tres Niveles de Fertilización en el Rendimiento de Maní (tn/ha).	38

Índice de Anexos

Anexo A. Generalidades sobre la combustión de biodiesel.....	58
Anexo B. Información sobre la aplicación de biocombustibles en motores comunes.	59
Anexo C. Descripción de proceso de transesterificación.	60
Anexo D. Generalidades sobre la reducción de contaminación utilizando biocombustibles.....	61
Anexo E. Datos generales sobre los cultivos utilizados en el estudio.....	62
Anexo F. Información de sostenibilidad utilizando cultivos bioenergéticos.	64

Resumen

El aumento en los precios de combustibles fósiles y el impacto ambiental de estos han acelerado la búsqueda de alternativas energéticas más sostenibles. La investigación en el área de combustibles alternativos está dirigida a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dos de los principales combustibles alternativos son el biodiesel y el bioetanol. El presente trabajo se enfoca en la evaluación en campo del rendimiento de dos cultivos oleaginosos: maní (*Arachis hypogaea* L.), y girasol (*Helianthus annuus* L.), bajo tres niveles de fertilización y dos densidades de siembra. En laboratorio, se comparó el rendimiento en aceite y biodiesel de cuatro cultivos oleaginosos subtropicales: maní, soya (*Glycine max* L.), ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) y jícara (*Crescentia cujete* L.). Los resultados de campo mostraron que los niveles de fertilización no influenciaron el rendimiento en el girasol, pero si la densidad. En el maní, se observaron efectos independientes tanto, de la densidad, como también, de la fertilización. En laboratorio, se evidenció que el maní y el jícara presentaron mayores rendimientos en aceite, sin embargo, el ajonjolí y maní mostraron mayores índices de conversión a biodiesel. Existe una gran diferencia en el perfil de ácidos grasos, sin embargo, no hubo diferencia en el poder calorífico de los cuatro biocombustibles estudiados. Finalmente, el jícara se considera como un cultivo de gran potencial de explotación ya que su fruto demostró un alto uso de todos sus componentes.

Palabras clave: Ácidos grasos, Biocombustibles, Fertilización, Transesterificación.

Abstract

The increase in the prices of fossil fuels and their environmental impact have accelerated the search for more sustainable energy alternatives. Research in alternative fuels is aimed at reducing greenhouse gas emissions. Two of the main alternative fuels are biodiesel and bioethanol. The present work focuses on the field evaluation of the yield of two oilseed crops: peanut (*Arachis hypogaea* L.), and sunflower (*Helianthus annuus* L.), under three levels of fertilization and two planting densities. In the laboratory, the oil and biodiesel yield of four subtropical oil crops were compared: peanut, soybean (*Glycine max* L.), sesame (*Sesamum indicum* L.) and jícaro (*Crescentia cujete* L.). Field results showed that fertilization levels did not influence sunflower yield, but density did. In peanut, independent effects of both density and fertilization were observed. In the laboratory, it was shown that peanuts and jícaro presented higher oil yields, however, sesame and peanuts showed higher rates of conversion to biodiesel. There is a great difference in the fatty acid profile, however, there was no difference in the calorific value of the four biofuels studied. Finally, the jícaro is considered a crop with great exploitation potential since its fruit showed a high use of all its components.

Key words: Biofuels, Fatty acids, Fertilization, Transesterification.

Introducción

Los combustibles fósiles están involucrados en la mayoría de las actividades económicas y de subsistencia que realizamos todos los días. Sin embargo, el consumo de estos ha contribuido enormemente a la aceleración del calentamiento global como consecuencia de la liberación de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. El aumento de la cantidad de CO₂ desde los comienzos de la Revolución Industrial, es un evento sin precedentes. Se estima que la acumulación de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en un 143% desde la época preindustrial junto con el metano y el óxido de nitrógeno, los cuales han aumentado en un 254% y 121%, respectivamente (Planelles 2015). El problema radica en que se libera a la atmósfera el CO₂ atrapado dentro de los combustibles fósiles por miles de años, mucho más rápido de lo que los ecosistemas pueden fijarlo naturalmente. Por lo tanto, es de suma importancia encontrar alternativas de producción de combustibles renovables, no solamente, por la limitación de este recurso, sino que también por los problemas crecientes de contaminación ambiental (García-Díaz 2013).

A raíz de esta problemática, han surgido varias alternativas para enfrentar el cambio climático. Una de las opciones más estudiadas es la producción y utilización de combustibles procedentes de cultivos agrícolas. Los biocombustibles más comunes actualmente, son el bioetanol y el biodiesel. Estas alternativas han empezado a tener más atención en el rubro científico y productivo. Esto se debe a que se ha comprobado que los procesos de producción y consumo de biocombustibles pueden acercarse más a la neutralidad de carbono. El bioetanol es el producto de la fermentación de azúcares provenientes de cultivos tales como la caña de azúcar, maíz y remolacha azucarera. Por otro lado, el biodiesel se obtiene del aceite de semillas de cultivos oleaginosos, tales como la soya, el maní, girasol, palma africana y otros.

El biodiesel es una mezcla de ésteres de alquilo que contienen largas cadenas de ácidos grasos obtenidos típicamente a partir de recursos biológicos no tóxicos (Castellar et al. 2014). La transformación es llevada a cabo a través de un proceso llamado transesterificación, en el cual ocurre

una reacción entre las grasas (triglicéridos) presentes en un aceite vegetal con un alcohol de cadena corta que generalmente es metanol o etanol dando como productos ésteres (biodiesel) y glicerina (Reategui y Salas 2013).

Existe controversia alrededor de la producción y uso de los biocombustibles. Se argumenta que la cantidad de recursos utilizados para la producción de biodiesel y/o bioetanol, debería ser utilizada para otro propósito, por ejemplo, con fines alimentarios. Debido a que la producción de biocombustibles también utiliza recursos importantes como el agua y la tierra, los productores de alimentos argumentan que la seguridad alimentaria se pone en riesgo. Sin embargo, existen casos específicos en los cuales la producción de cultivos para extracción de aceite no solo es conveniente, sino recomendable. Estos casos puntuales incluyen zonas que poseen los cultivos establecidos naturalmente, que no están ocupando espacio ni agua para la producción de alimentos. “Se puede almacenar carbono adicional si las plantaciones se establecen en suelos marginales degradados, con bajas succiones de carbono. Los científicos se refieren a esto como un cambio directo en el uso de la tierra” (Knothe et al. 2010).

Se cree que la participación de los biocombustibles en el mercado aumentará en este año, esto establece la [AOP] Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (2021), “Actualmente, los biocombustibles ya están presentes en los carburantes convencionales. Concretamente, tendrán una penetración del 9,5 % sobre el total de las ventas de combustibles para este 2021 y un 10 % para 2022.” Los productores de biodiesel han encontrado varias ventajas en la utilización de este tipo de combustible como reemplazo de los combustibles fósiles. Entre esas ventajas se destacan la facilidad del biodiesel en trabajar en cualquier motor de Diesel normal, alargando la vida de este en un 75%. De igual manera, la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, hidrocarburos y hollín (Bravo et al. 2007). Es importante reconocer a los biocombustibles como una alternativa viable frente al cambio climático, a pesar de las controversias que se han generado a falta de pruebas y evidencia concreta que demuestre lo contrario. “Al no contener

prácticamente nada de azufre, mezclando el biodiesel con el diésel, se pueden reducir las emisiones de sulfato a la atmósfera” (Knothe et al. 2010). La clave de la economía de la producción del biodiesel se encuentra en las materias primas utilizadas, el reto para cualquier país o región consiste en la implementación de procesos de producción basados en materias primas con disponibilidad local (Benavides et al. 2007) . Por lo que es incorrecto generalizar al momento de argumentar que es un proceso poco eficiente que utiliza incorrectamente los recursos para producir alimentos. Para que este combustible sea competitivo debe parecerse funcionalmente al petrodiesel y establecerse en el mercado con un precio similar al del Diesel (Ramírez et al. 2012).

Dada la importancia que poseen estos cultivos oleaginosos para la producción de biodiesel y el potencial que proveen para la seguridad alimentaria humana y animal. Tanto en el uso del aceite y los granos para la alimentación humana, así como también, el uso de los subproductos para la alimentación animal y/o humana, se establecieron los siguientes objetivos para la fase de campo: evaluar el efecto de la fertilización y la densidad poblacional en el rendimiento de girasol y maní; comparar el contenido de aceite de cuatro cultivos oleaginosos, soya, maní, ajonjolí y jícara; después de obtener el aceite. Para la fase de laboratorio se establecieron los siguientes objetivos: evaluar el rendimiento de la conversión de aceite a biodiesel y la calidad de ambos productos, en cuatro cultivos oleaginosos; realizar análisis de calidad del biodiesel de los cuatro cultivos; y, por último, realizar una caracterización física de los componentes del fruto de jícara (*Crescentia cujete* L.).

Materiales y Métodos

Ubicación del Estudio

El estudio se realizó en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, ubicada en el kilómetro 30 de la carretera de Tegucigalpa a Danlí, Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente, Departamento de Francisco Morazán, República de Honduras.

El experimento se dividió en dos etapas, la fase de campo y la fase de laboratorio. La fase de campo se llevó a cabo en el lote 11 de Zona II de la Universidad Zamorano, Honduras. La extracción del aceite y su conversión a biodiesel se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos Zamorano (LAAZ). Asimismo, los análisis físicos y químicos realizados a los aceites de los cuatro cultivos y los del biodiesel obtenido de estos se llevó a cabo en el mismo laboratorio.

Fase de Campo

Con el fin de relacionar la investigación de laboratorio con la producción de campo, se estableció un estudio para determinar la relación de la fertilización y la densidad poblacional, con el rendimiento de los cultivos oleaginosos. Este estudio fue realizado en un área aproximada de 510 m², en los cuales se sembraron dos de los cuatro cultivos oleaginosos, girasol (*Helianthus annuus* L.) y maní (*Arachis hypogaea* L.). Cada cultivo fue sembrado en un área aproximada de 255 m² en los cuales se evaluaron las siguientes variables: crecimiento del cultivo, rendimiento del cultivo y días a cosecha.

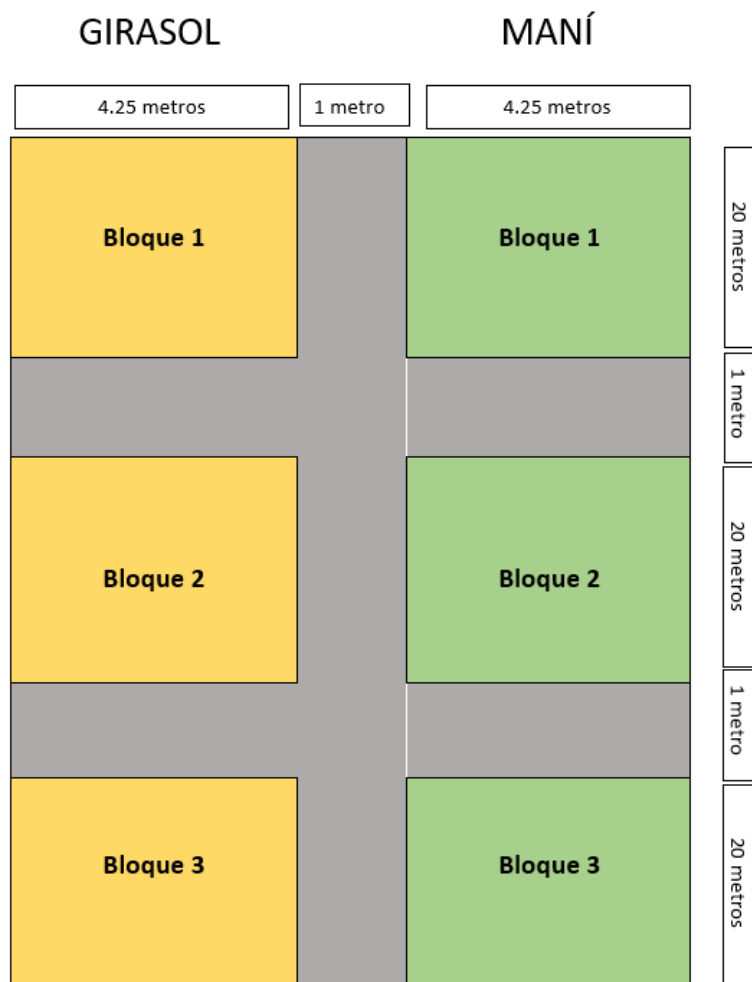
Arreglo de Siembra.

Se plantearon bloques de 4.25 metros de ancho por 20 metros de largo, obteniendo bloques de 85 metros cuadrados, con separación de un metro entre cada bloque (Figura 1). En esos seis surcos con valor experimental se encuentran los tratamientos de las dos densidades y los tres planes de fertilización. Por efectos experimentales, la distancia entre surcos fue de 50 centímetros para los dos cultivos, los cuales tuvieron una manguera de riego por surco.

Figura 1

Distancias de Siembra en Campo de Girasol y Maní en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola

Panamericana.



Las plantas por hectárea fueron calculadas en base a las variedades criollas que se utilizaron en el estudio, ya que se intentó replicar las condiciones de producción de los pequeños y medianos productores. Estas variedades tienen rendimientos y densidades menores en comparación a las variedades mejoradas utilizadas en las grandes explotaciones extensivas. Las densidades establecidas fueron del 100% y 120% en los dos cultivos que se sembraron. Esto con la finalidad de observar si existían cambios significativos en la cosecha final, por competencia de espacio, luz y agua. El girasol y el maní tienen comportamientos de crecimiento diferentes, por lo que se esperó que los cambios de

densidad afectaran en gran medida con los rendimientos de cosecha y biomasa final. Las densidades utilizadas en el estudio están representadas en el Cuadro 1.

Cuadro 1

Distanciamiento de Siembra de Cultivos Establecidos en el Estudio Ubicado en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana.

Parámetros	Cultivo			
	Girasol		Maní	
Densidad	100%	120%	100%	120%
Plantas por hectárea	83,000	100,000	166,000	200,000
Plantas por metro lineal	4.15	5	8.3	10
Distancia entre hilera	0.5	0.5	0.5	0.5
Distancia entre planta	0.24	0.2	0.12	0.1

Nota. Distancias están expresadas en metros.

Fertilización.

Los requerimientos nutricionales fueron extraídos del libro *Absorción de Nutrientes por los Cultivos*, de Floria Bertsh (2009). La fertilización de los dos cultivos se realizó a los 48 días después de la siembra, de forma granulada a un lado de los surcos. Los planes de fertilización fueron planteados en tres niveles, con el fin de evaluar los niveles de fertilización con más exactitud en comparación a los niveles de densidad. Esto se debe a que los niveles de densidad pueden ser relevantes o no. De modo que se plantearon los niveles de fertilización del 0%, 50% y 100%, siendo el nivel del 100% al que se le aplica todo el plan de fertilización, al de 50% la mitad y el nivel de 0% no recibe fertilización. Los requerimientos nutricionales están expresados en el Cuadro 2.

Cuadro 2

Requerimientos Nutricionales del Cultivo de Girasol y Maní. Expresados en Cantidad de kg Necesarios para Producir una Tonelada de Biomasa por Hectárea.

	N	P	K	Ca	Mg
Girasol	44	8	70	18	11
Maní	69	5	35	21	8

Nota. N: Nitrógeno. P: Fósforo. K: Potasio. Ca: Calcio. Mg: Magnesio

Manejo Agronómico.

El historial del terreno utilizado ha tenido rotaciones de frijol y maíz durante varios años, siendo frijol el último cultivo sembrado en ese espacio. Inicialmente, se incorporó el rastrojo de frijol con una rastra pesada. Después se realizó un pase de rastra mediana, seguida por un pase de rastra fina, finalizando así el manejo de mecanización. Antes de realizar la siembra, las semillas se trataron con Blindage®, que tiene como ingrediente activo el Imidacloprid. En cuanto al control de malezas, todos los controles fueron realizados manualmente, con mano de obra de la universidad, replicando el control que se tiene en la agricultura de subsistencia. Esto fue posible gracias a que el área cultivada es reducida y fácil de controlar. Se realizó el primer control de malezas a los 23 días después de la siembra, al momento que se realizó el raleo para definir las densidades. El segundo control de malezas se realizó antes de aplicar las soluciones nutritivas, a los 48 días después de la siembra. Esto para evitar que las malezas interfirieran con la absorción de los fertilizantes, alterando en gran medida con los datos obtenidos. El último control de malezas fue realizado a los 66 días de la siembra. Después de estos controles, el nivel de biomasa del cultivo en relación con el desarrollo de la maleza fue muy dominante, por lo que la cobertura vegetal del cultivo no permitió el desarrollo óptimo de la maleza.

El riego fue suministrado cada 48 horas, durante dos horas. Cada surco tenía una manguera de riego por goteo, con goteros cada 20 cm. Esto con la finalidad de asegurar un crecimiento óptimo del cultivo, y asegurar una correcta absorción de los nutrientes a través de las raíces. Los cultivos de maní y girasol sufrieron ataques de trips (*Thrips tabaci*) y de mosca blanca (*Bemisia tabaci*), respectivamente. Las variedades mostraron moderada resistencia a la infestación de estas plagas, mayormente debido a los materiales genéticos de las variedades criollas de la zona, que resultaron ser beneficiosos frente al ataque de estas plagas clave. Sin embargo, se decidió aplicar agroquímicos como medida de control preventiva, de manera que se pueda conocer el control de los pesticidas en la producción. Para el control, se separó los tiempos de aplicación en dos días, 26 días después de la siembra, y 32 días después de la siembra. En la primera aplicación se usaron 20 mL de Exalt® y 15 mL

de Engeo[®], con ingredientes activos Spinetoram y Thiamethoxam, respectivamente. En la segunda aplicación se añadieron 20 mL de Exalt[®] y 20 mL de Engeo[®]. Las dos aplicaciones fueron mezcladas en una bomba de 25 litros de capacidad.

Cosecha.

La cosecha del girasol se realizó a los 104 días de siembra. Se aprovechó el momento en que los girasoles se encontraban secos de manera natural, por su comportamiento de dehiscencia. Se llegó a la conclusión de que, en el caso de esta variedad criolla, cada girasol tiene una bellota principal, la cual es la única apta para obtener una semilla de calidad, con potencial de extracción de aceite. Existen otras bellotas secundarias en cada planta, aproximadamente 5 bellotas en cada planta. Estas bellotas secundarias no son aptas para la extracción de aceite, debido a su reducido tamaño. Sin embargo, podrían utilizarse como alimentación al ganado o como parte de biofertilizantes al suelo en forma de compost.

Al momento de observar que los sépalos de la bellota comenzaron a tornarse cafés y empezaron a secarse, fue beneficioso cosechar antes de que la planta botara las semillas al piso y se perdiera gran parte de la cosecha. De igual manera, los pájaros representan una gran amenaza para los agricultores en pequeña escala de girasol, con la capacidad de alimentarse de las semillas y disminuir los rendimientos. En este caso, la cosecha sucedió de manera manual, en la cual se cosecharon 10 bellotas principales en cada tratamiento. Estas 10 bellotas reflejaron una población representativa de todo el tratamiento. Se desgranaron las bellotas manualmente y se pesó la cosecha final para medir el rendimiento. Por otro lado, la cosecha del maní se realizó a los 129 días. Se notó una leve falta de madurez en el grano cosechado de manera general.

Variable Evaluada.

En esta fase la variable que se evaluó fue el rendimiento, en toneladas por hectárea, siendo este el único dato de interés para la validación de este estudio. La cosecha se realizó tomando 2 metros lineales de cada tratamiento, los cuales representan el 10% de metros totales de cada unidad

experimental. Siendo esta una muestra representativa, se tomaron las mediciones necesarias de peso y humedad como factor correctivo, para obtener el rendimiento real del cultivo.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El diseño experimental que se utilizó durante la fase de campo fue un diseño de bloques completos al azar (BCA), en un arreglo de parcelas divididas, en la cual, la variante principal fue el cultivo y dentro de cada parcela se randomizaron dos densidades de siembra por cultivo, y tres planes de fertilización dentro de cada cultivo. Se realizaron tres repeticiones por cada bloque, por lo que se obtuvo un total de 36 parcelas experimentales. Cada parcela tuvo un surco único y cada cultivo tuvo un área de 255 metros cuadrados. Dentro de cada bloque se sembraron ocho surcos, seis con valor experimental, y los dos extremos que tuvieron una función de semilleros, para corregir poblaciones en surcos experimentales, en caso de una pobre germinación.

Cuadro 3

Tratamientos para evaluar el efecto de la densidad y fertilización en girasol y maní cultivados en el lote 11, Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana.

Tratamiento	Densidad %	Fertilización %
D100F0	100	0
D100F50	100	50
D100F100	100	100
D120F0	120	0
D120F50	120	50
D120D100	120	100

Nota. D: Densidad. F: Fertilización.

Los datos fueron analizados estadísticamente utilizando el Sistema de análisis estadístico SAS versión 9.4. Analizando la relación entre variables a través de LSMEANS, y utilizando la prueba de comparación de medias Duncan.

Fase de Laboratorio

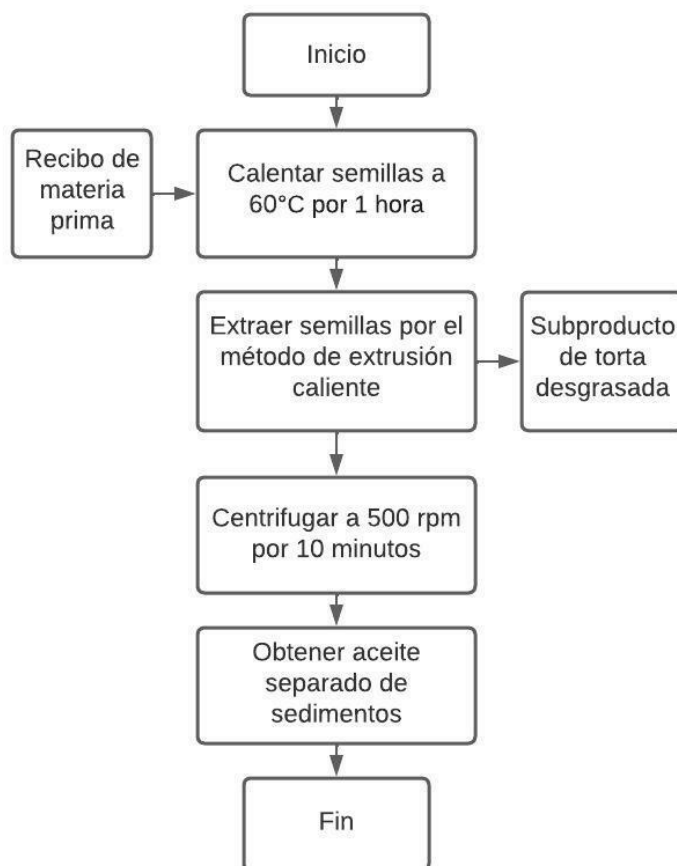
Extracción de Aceite por el Método de Extrusión Caliente.

La extracción del aceite es el primer paso realizado en el laboratorio para la obtención final del biodiesel. Se realizó la extracción de soya, jícara, maní y ajonjolí. Existen varios métodos de extracción de aceite, dependiendo el fin que se le quiere dar a este. En este caso se utilizó una extrusora que funciona como prensa caliente, la cual separa el aceite y se obtiene una torta desgrasada como subproducto.

Para la extracción del aceite, se calentaron las semillas de cada cultivo por separado. Esto se realizó en una bandeja de aluminio, a 60°C durante 1 hora. El calentamiento se llevó a cabo en un horno NAPCO modelo 360. Inmediatamente después del calentado, las semillas de oleaginosas fueron llevadas a la extrusora CGoldenWall 1500W para poder extraer su aceite. Las semillas fueron introducidas a la extrusora paulatinamente. Con la finalidad de incrementar la extracción del aceite, se empleó la opción de extracción en caliente incorporada en el equipo. El aceite crudo extraído fue colocado en tubos cónicos de 50 mL y centrifugado a 5000 revoluciones por minuto, a una temperatura de 24°C durante 10 minutos. Para ello se utilizó la centrifugadora WVR Symphony 4417R. Se separó el sobrenadante de los sólidos y se almacenó a temperatura ambiente hasta su uso posterior. En la Figura 3 se muestra de manera resumida los pasos a seguir para realizar la extracción de aceite por el método de extrusión.

Figura 2

Pasos para Extraer Aceite de los Granos Oleaginosos Utilizando el Método de Extrusión Caliente.



Extracción por el Método de Solvente.

La grasa se obtiene a través del método AOAC 2003.06, planteado por Thiex et al. (2003). Este método consiste en la adición de un solvente, en este caso el hexano, para extraer grasa de un grano en su totalidad. Para esta extracción se utilizó el equipo Soxtec™ 8000 Extraction Unit, que combina el método de Soxhlet y Randall, para obtener resultados aproximadamente en una hora. Primero, se debe añadir a los de dedales de celulosa, que funcionan como filtro, dos gramos de célite y un gramo de muestra con una granulometría de 0.1-0.4mm. Finalmente, se colocaron los algodones desgrasados. Después, se agregaron cuatro perlas de ebullición a las tazas metálicas y se llevaron al horno a 105°C por 30 minutos. Seguido de esto, se ingresaron las muestras con las tazas en la máquina,

con una configuración predeterminada por el método. La ebullición y el lavado duraron aproximadamente una hora, mientras que la recuperación del hexano dura aproximadamente 10 minutos. Para finalizar, se colocaron las tazas con la grasa extraída en el horno a 105°C por 30 minutos y luego a un desecador. Para obtener los resultados, es necesario realizar una diferencia de peso inicial y peso final, utilizando la siguiente fórmula:

$$\%GC = \frac{T_f - T_i}{S} * 100 \quad [1]$$

Donde:

%GC: Porcentaje de grasa cruda

T_f = Residuo de grasa (g) + Peso taza (g)

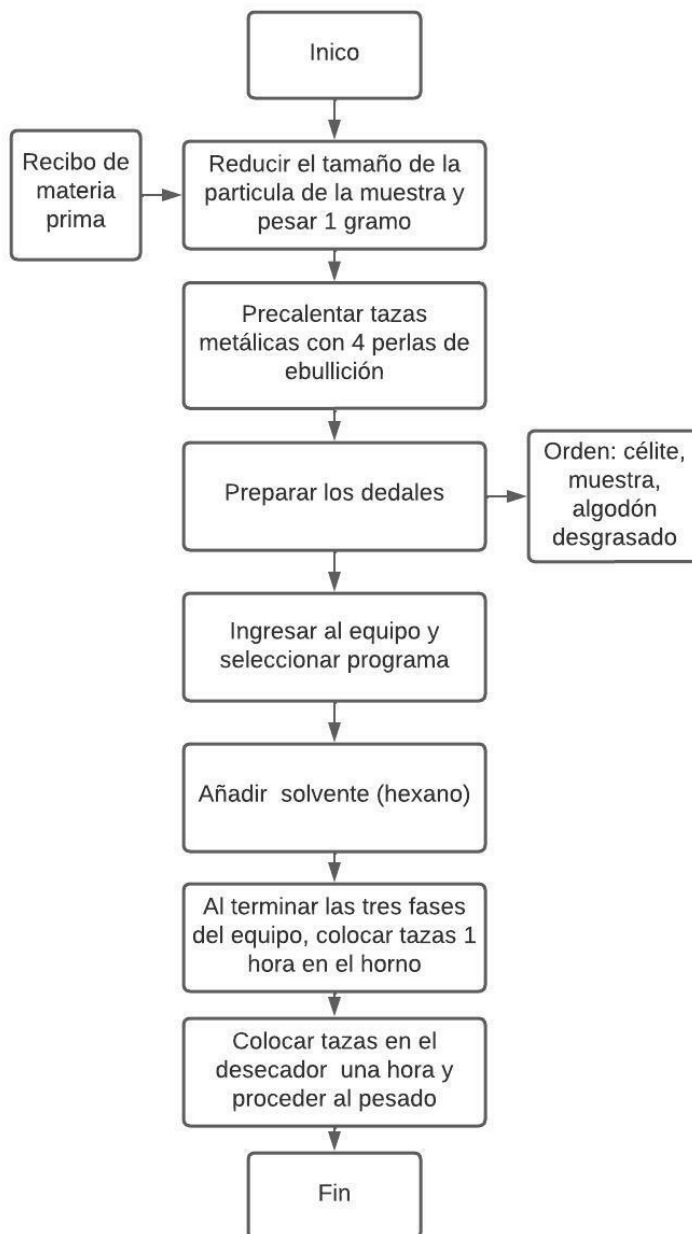
T_i = Peso taza (g)

S = Peso de la muestra (g)

El procedimiento de la realización del análisis de grasa cruda se resume en la Figura 4.

Figura 3

Procedimiento de Análisis de Grasa Cruda por el Método de Extracción por Solvente, a través del Método AOAC 2003.06.



Perfil de Ácidos Grasos.

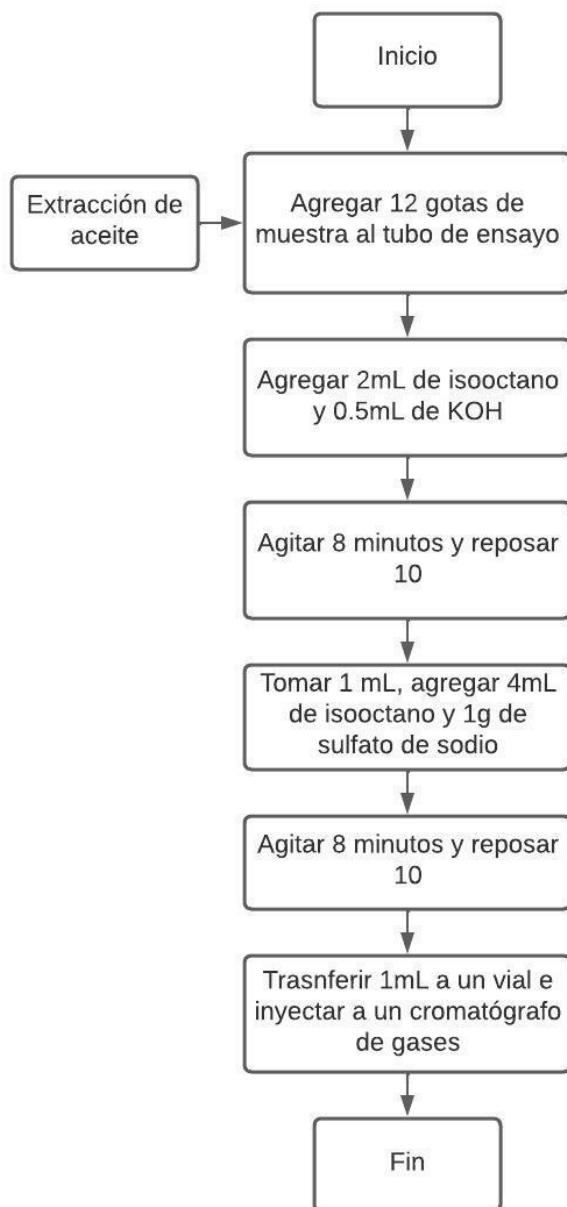
La determinación del perfil de ácidos grasos es fundamental para la transformación de aceite a biodiesel. El perfil es descubierto a través de la cromatografía de gases, utilizando el método AOCS

Ce 2b 11 ([AOCS] American Oil Chemists Society 2017c) y AOCS Ce 1j-07 ([AOCS] American Oil Chemists Society 2017b) . El cromatógrafo utilizado en este experimento fue el 7890A de Agilent Technologies. Este instrumento ordena los ácidos grasos según su peso molecular, es decir, según el número de carbonos presentes en su estructura. A partir de la información obtenida en este perfil, podemos determinar la cantidad de cada ácido graso presente en los aceites. Este dato depende en gran medida del peso molecular de cada ácido graso, siendo los ácidos grasos saturados los más livianos.

Previo a la inyección de las muestras en el cromatógrafo de gases, se realizó el proceso de transesterificación. Para ello, se agregaron 12 gotas del aceite en un tubo de ensayo de vidrio. Se añadieron dos mL de isooctano y 0.5 mL de una solución de KOH metanólico 2M. Luego se agitó el tubo de ensayo durante ocho minutos con la ayuda de un vortex. Pasado este tiempo, se dejó reposar la muestra durante 10 minutos para lograr una separación completa de fases. En un nuevo tubo de ensayo se colocó un mL de la fase de isooctano (parte superior), se mezcló con cuatro mL de isooctano y un g de sulfato de sodio. Luego se agitó el tubo de ensayo durante ocho minutos y se dejó reposar durante 10 minutos. Por último, se transfirió un mL de la fase de isooctano (parte superior) a un vial de dos mL para su posterior análisis en el cromatógrafo de gases usando inyección en modo Split. El procedimiento de transesterificación paso a paso está representado en la Figura 5.

Figura 4

Pasos para la Determinación de Perfil de Ácidos Grasos en un Cromatógrafo de Gases, Utilizando el Método AOCS Ce 2b 11.



Transformación a Biodiesel.

Una vez realizada la extracción del aceite, se procede a transformar este aceite crudo a biodiesel. La transformación a biodiesel se realizó a través de un proceso llamado transesterificación,

el cual consistió en agregar un alcohol y un catalizador al aceite para transformar un triglicérido en ésteres y una molécula de glicerol. Para la elaboración del biodiesel se necesitan tres moléculas de metanol para adherirse a una molécula de triglicéridos, es decir, una por cada ácido graso. Debido a esto, se utiliza una doble relación molar para asegurar una correcta reacción, motivo de la utilización del número 6 en la ecuación 2 y 3.

$$Ma = \frac{Qa (g)}{P Ma \left(\frac{g}{mol}\right)} \quad [2]$$

$$Qm = 6 x Ma x P Mm \quad [3]$$

Donde:

Ma: Molaridad aceite

Qa: Cantidad aceite

PMa: Peso molecular aceite

Qm: Cantidad metanol

PMm: Peso molecular metanol

Durante el proceso de transesterificación se utilizó Metanol (alcohol) e Hidróxido de Potasio (catalizador). Para todos los aceites se utilizó 1% (p/V) de catalizador y una relación molar de seis para el metanol. El metanol y catalizador se mezclaron utilizando una plancha magnética a 200 revoluciones por minuto (rpm) y temperatura ambiente hasta obtener un compuesto conocido como metóxido.

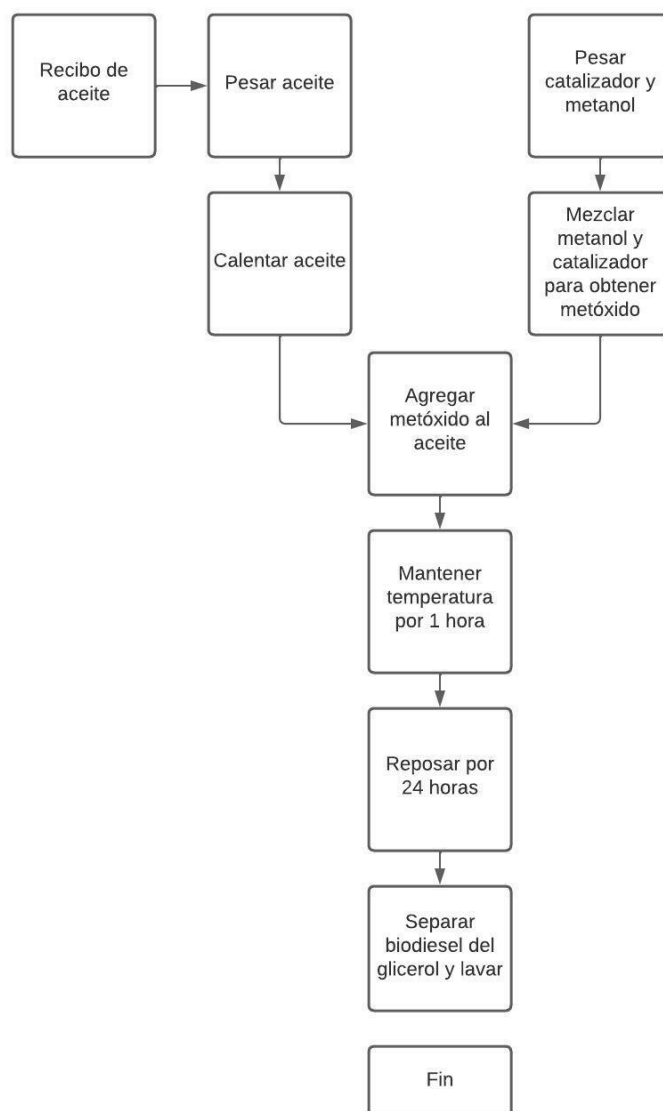
A continuación, 500 gramos de aceite se calentaron con la ayuda de una plancha de agitación hasta llegar a 55°C. Durante el proceso la agitación se mantuvo en un rango de 260 y 300 rpm. Para el control de la temperatura se utilizó un termómetro digital Thermostar. Una vez se alcanzó la

temperatura en el aceite, se añadió la mezcla del metóxido y se mantuvo con agitación constante hasta que el aceite llegó a una temperatura 55°C nuevamente. Para lograr una conversión adecuada del aceite a biodiesel, se mantuvo la mezcla en el reactor durante una hora. Para reducir la volatilización del metanol, se cubrió el recipiente reactor con papel aluminio. Transcurrida la hora de reacción, la mezcla se colocó en un embudo separador para lograr una clara separación de la fase de biodiesel con la fase de glicerol, la cual por tener una mayor densidad se ubicó en el fondo del embudo. El proceso de separación se realizó durante 24 horas. Luego de esto, se desechó la fase de glicerol y se procedió a lavar muy cuidadosamente el biodiesel con agua. Debido a la diferencia de densidades, el agua se ubicó al fondo del embudo separador. El proceso de lavado se realizó hasta que el agua de lavado tuvo un pH de 7. Por último, el biodiesel se introdujo en un horno a 105°C por un lapso de 6-8 horas. Esto con la finalidad de remover toda el agua restante por evaporación.

Al producto final de la transesterificación se le conoce como un conjunto de moléculas EMAG (ésteres metílicos de ácidos grasos), los cuales tienen la capacidad de combustión característica del biodiesel. El procedimiento realizado para obtener biodiesel en el laboratorio es descrito brevemente en la figura 6.

Figura 5

Proceso de para Obtener Biodiesel a través de la Transesterificación de un Aceite.



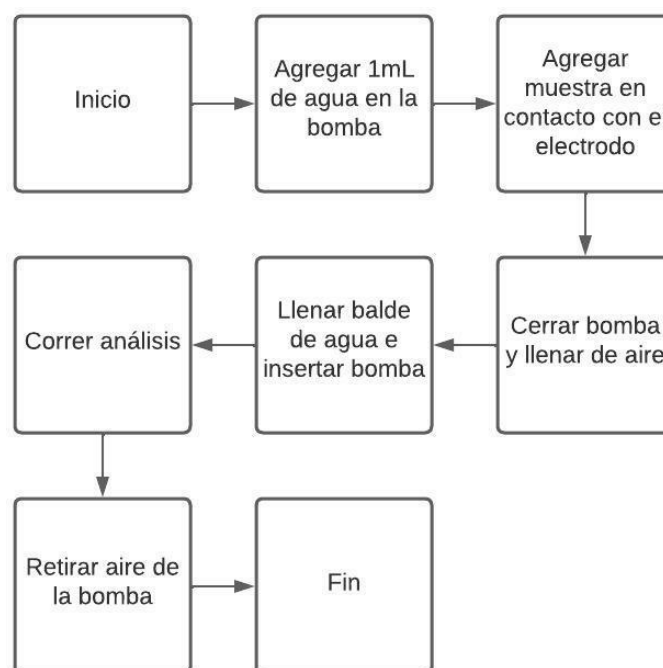
Calorimetría.

El poder calórico de cada biodiesel se determinó por medio del método DIN 51900-3 ([DIN] Deutsches Institut für Normung 2005). El análisis de calorimetría se utiliza para determinar la capacidad de combustión que tiene cada biodiesel. En este caso está expresado en calorías por cada 100 gramos, lo cual da una referencia final sobre las aplicaciones que pueden tener los diferentes biocombustibles. Es importante conocer este valor para entender la eficiencia que puede tener el

biodiesel en la combustión, como medida de calidad del combustible. Los pasos por seguir para realizar el análisis de calorimetría son explicados de manera resumida a continuación en la figura 7:

Figura 6

Procedimiento para Realizar Análisis de Calorimetría de una Muestra Oleaginosa, Utilizando el Calorímetro Parr 6100.



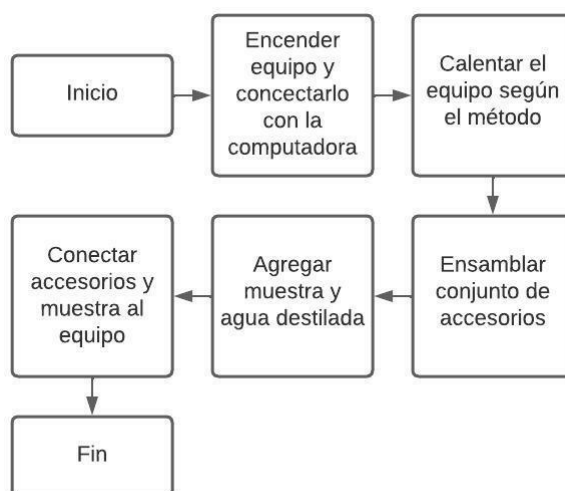
El análisis se realizó haciendo uso del Calorímetro Parr modelo 6100 utilizando una bomba de reacción 1108. Previo al análisis de las muestras, se analizó una pastilla (1 g) de ácido benzoico con el fin de verificar que el equipo estaba funcionando bien. Durante cada análisis se colocó 1 mL de agua en la bomba de reacción y 0.5 g de biodiesel en la cápsula de muestras. Para una correcta combustión se utilizó un hilo de algodón amarrado al cable que conecta los electrodos. La reacción se realizó utilizando 450 psi de oxígeno en la bomba, la cual estuvo sumergida en una cubeta que contenía 2000 gramos de agua exactamente. Una vez finalizado el análisis, se registró cada dato.

Índice de Estabilidad Oxidativa.

El análisis de rancidez o índice de estabilidad oxidativa fue realizado para encontrar los valores del tiempo en el que una sustancia compuesta por grasas es oxidada. El equipo aplica oxígeno y temperaturas altas para acelerar la oxidación dentro de la máquina. Durante esta oxidación, los compuestos de cadenas cortas se volatilizan, y gracias a esto se puede cuantificar la oxidación en el análisis. Estos compuestos volátiles caen en agua destilada, la cual cambia su conductividad eléctrica a medida que la concentración de los compuestos aumenta. Este proceso acelerado acorta una oxidación que duraría meses o incluso años, en cuestión de horas. Los pasos para realizar el análisis de estabilidad oxidativa se encuentran graficados en la figura 8.

Figura 7

Proceso de Análisis de Oxidación Acelerada, Utilizando el equipo Rancimat 873.



Para el análisis de índice de estabilidad oxidativa se utilizó el equipo 873 Biodiesel Rancimat de Metrohm. El método utilizado para el análisis fue el AOCS Cd 12b-92 ([AOCS] American Oil Chemists Society 2017a), el cual aplica una temperatura de 110°C y un flujo de oxígeno de 20 L/hora. Se pesaron cinco gramos de la muestra en los tubos de reacción y 60 mL de agua destilada en los recipientes de medición de vidrio.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico.

La semilla de cada cultivo fue evaluada en cuanto a las siguientes variables: rendimiento de aceite obtenido a través de la eficiencia de extracción de la extrusora, comparada con el contenido de grasa cruda, rendimiento en biodiesel obtenido a través de la diferencia de peso entre el aceite y el biodiesel como producto final.

El biodiesel obtenido a partir de las semillas de las oleaginosas fue evaluado en tres parámetros de calidad: Calorimetría, índice de estabilidad oxidativa (rancidez) y perfil de ácidos grasos. Finalmente, se pesaron todos los componentes de 20 frutos de jícara, con el fin de determinar el porcentaje de cada uno.

Los datos fueron analizados con el programa SAS versión 9.4, con un modelo DCA y una comparación de medias de Duncan. Se usó estadística descriptiva para esta fase del estudio al momento de realizar la transformación a biodiesel y el análisis de índice de estabilidad oxidativa. Por el motivo de que se deseaba comparar una transformación única de aceite a biodiesel. De igual manera, se deseaba encontrar si los biocombustibles aprobaban la norma norteamericana y europea de índice de estabilidad oxidativa.

Resultados y Discusión

Determinación la Relación entre la Fertilización y la Densidad en el Rendimiento de Dos Cultivos

Oleaginosos

Los resultados obtenidos a partir del experimento de campo, para determinar la relación de densidad y fertilización en los cultivos, ayudan a comprender la relación entre estas variables y el rendimiento final. Estos datos son de suma importancia si se desea iniciar con una explotación agrícola, con la finalidad de obtener biocombustibles como producto final.

Rendimiento de Girasol

Se logra observar que en girasol la variable densidad no interactuó de manera significativa con la variable fertilización. Por otro lado, el bloque no tuvo influencias significativas en el estudio, lo que aumenta la validez de los datos. Finalmente, se confirma que la variable que más influyó el rendimiento final del girasol fue la densidad. Un ejemplo claro de esto es el tratamiento D100F100 comparado con el tratamiento D120F100. Estadísticamente estos dos tratamientos son iguales, sin embargo, al realizar una revisión externa de los rendimientos por separado, el tratamiento D120F100 tuvo mejores resultados. Esto se debe completamente al número aumentado de plantas por metro lineal, lo que crea una relación directa con la densidad afectando el cultivo. Al no existir relación entre la densidad y la fertilización, se puede analizar la variable densidad independientemente, siendo la fertilización no significativa (Cuadro 4).

Cuadro 4

Valores P del efecto de la densidad y Fertilización y Bloque en la evaluación de la Densidad y

Fertilización en Girasol.

Variables	Pr > F
Bloque	0.146
Densidad	0.028*
Fertilización	0.23
Densidad× Fertilización	0.434

Nota. *Significativo $P \leq 0.05$

Se presentaron rendimientos más altos en los tratamientos que poseen una densidad de 100 mil plantas por hectárea, siendo esta probablemente la densidad óptima recomendable para la región (Figura 9). Se presentó un mayor rendimiento de toneladas por hectárea en el tratamiento D120F100, el cual posee la densidad más alta y el programa de fertilización completo. Es importante recalcar que se logró obtener el mismo rendimiento en el tratamiento D100F100 y D120F0. Por lo que comprueba lo que establece Quevedo et al. (2018), al momento de aumentar la densidad de siembra, la productividad desciende pero se compensa con un mayor número de plantas. Al momento de observar los tratamientos D100F0 y D100F50 que obtuvieron los mismos rendimientos, se entiende que la fertilización parcial en el cultivo de girasol tiene poco o ningún efecto sobre el rendimiento final. De tal manera que se recalca la importancia de suministrar el plan de fertilización completo, esto se comprueba igualmente analizando el tratamiento D120F50, que estuvo por debajo del tratamiento D120F100. Concordando así, con Montiel (2003), que estableció que la tasa de crecimiento de plantas depende del nutrimento presente en mínima cantidad, basándose en la teoría del mínimo de Liebig. Argumentado así, que el cultivo de girasol sufre mayores efectos frente a un cambio de densidades, que ante un plan de fertilización.

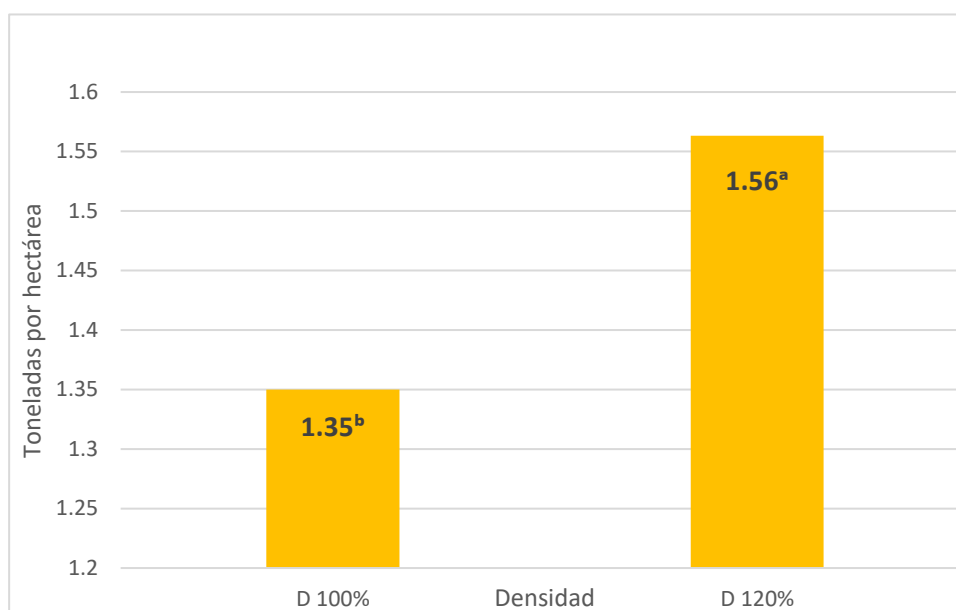
Escalante L et al. (2008) establece que durante el ciclo del girasol, la producción de biomasa por planta se ve afectada negativamente si se utiliza una densidad de siembra alta. Relacionando esto con lo encontrado en este experimento, se puede argumentar que existe un punto de inflexión al momento de aumentar las densidades del girasol. Esto quiere decir que, a medida que se aumenta la densidad de siembra, se va a llegar a un punto en el que la producción va a comenzar a descender, por efectos de la competencia intraespecífica.

En relación con el plan de producción de combustibles, el rendimiento de cada cultivo debe ser comparado con el contenido de aceite. Este cálculo se podría realizar sin considerar cambios en el contenido de aceite dentro del grano, influenciado por cambios en la fertilización y la densidad de siembra. Esto es lo que argumenta Zuil (2011) "Los tratamientos de densidad de plantas a la siembra

y niveles de fertilización nitrogenada no afectaron el porcentaje de aceite entre densidades y niveles de fertilización nitrogenada evaluados”

Figura 8

Efecto de Dos Densidades Poblacionales en el Rendimiento de Girasol (tn/ha).



Nota. A-B.: Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

D: Densidad.

Rendimiento de Maní

En el siguiente cuadro se observa que las dos variables y el efecto de bloqueo influenciaron de manera significativa el rendimiento. En base a esta información, se confirma que la variable que afecta más el cultivo de maní en su desarrollo es la fertilización. Todo esto es fundamentado con lo encontrado y los rendimientos obtenidos en tratamientos que tienen la misma densidad, pero diferente plan de fertilización. No hubo interacción entre la densidad y la fertilización, de manera que se pueden analizar las dos variables de manera independiente.

Cuadro 5

Valores P del efecto de la densidad y Fertilización y Bloque en la evaluación de la Densidad y

Fertilización en Maní.

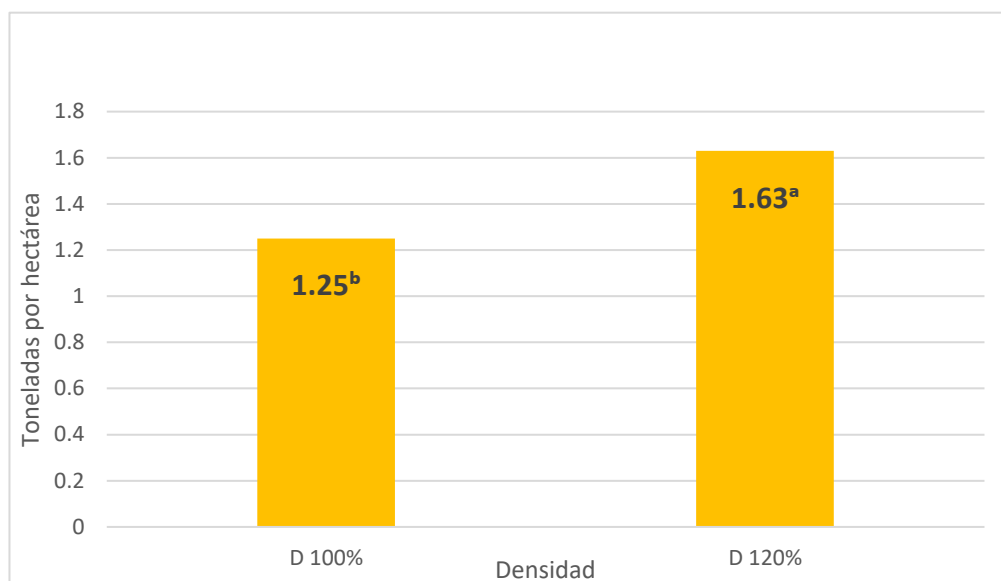
Variables	Pr > F
Bloque	0.0072*
Densidad	0.0167*
Fertilización	0.0014*
Densidad× Fertilización	0.573

Nota. *Significativo $P \leq 0.05$

Al igual que en el cultivo de girasol, se obtuvieron valores más altos en los tratamientos que contenían una densidad poblacional del 120% (Figura 10). Sin embargo, existió más diferencia entre el 100% de densidad y el 120% en comparación con el girasol. De manera que se puede establecer que el girasol es más susceptible a altas densidades que el maní. Es por esto que el rendimiento obtenido en el cultivo de maní para los tratamientos del 120% de densidad estuvieron muy por encima del resto de tratamientos. El maní tiene un hábito de crecimiento que cubre gran parte del perfil del suelo, al igual que el hábito de formación del fruto dentro del suelo. Es por estas razones que este cultivo se puede ver mínimamente frente a densidades altas. Los resultados obtenidos en este estudio se acercan considerablemente a lo expuesto por Garcés-Fiallos et al. (2015), que descubrió que a una densidad de 200 mil plantas por hectárea existe un rendimiento de 1.809 toneladas por hectárea. Siendo la misma densidad utilizada en este estudio, teniendo rendimientos de 1.63 toneladas por hectárea.

Figura 9

Efecto de Dos Densidades Poblacionales en el Rendimiento de Maní (tn/ha).



Nota. A-B.: Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

D: Densidad.

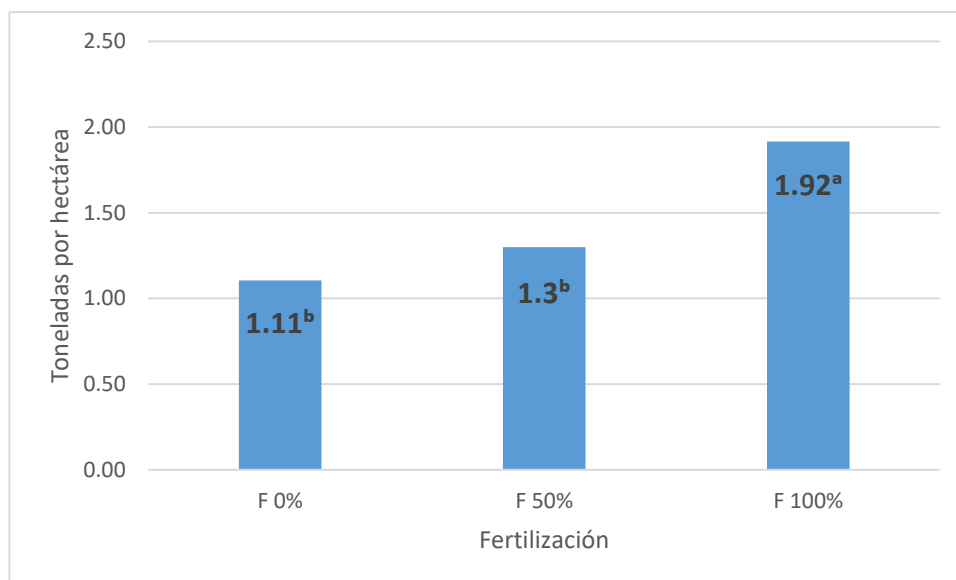
Al igual que en el cultivo de girasol, la fertilización incompleta tuvo muy poco efecto en el rendimiento del cultivo (Figura 11). De esta manera, obteniendo los mejores rendimientos en los tratamientos que recibieron una fertilización completa (Tratamientos D100F100 y D120F100). Se observó diferencia significativa del tratamiento D120F0 en comparación con el tratamiento con fertilización del 100% al mismo nivel de densidad, de forma ascendente según los niveles de fertilización. Esto indica que la nutrición del cultivo de maní define de gran manera el rendimiento obtenido en la cosecha. Es importante tomar en cuenta que el tratamiento D120F0, a pesar de ser estadísticamente igual al tratamiento D120F50, presentó un rendimiento bajo en comparación con el tratamiento D120F100. Esto considerando que el tratamiento D120F0 posee el mismo número de plantas por metro lineal que el tratamiento D120F100. Esto permite crear una relación directa entre el cultivo y la fertilización, ya que estos tratamientos tenían diferentes esquemas de fertilización.

Los tratamientos D100F0 y D100F50 no mostraron diferencias significativas y obtuvieron los valores más bajos en cuanto a toneladas por hectárea cosechadas. Esto se debe a que el suelo no tenía los suficientes nutrientes para suplir las necesidades de desarrollo óptimo, por lo que era necesario una suplementación química de fertilizantes. El efecto del 50% de fertilización, en el caso del tratamiento D100F50, tuvo muy poco efecto en el rendimiento del cultivo, al no completar sus requerimientos nutricionales en su totalidad. Esto concuerda con lo establecido por Torres y Montiel (2001) , que descubrió lo siguiente en cuanto a la fertilización del maní: “De todos los tratamientos sometidos a prueba, concluimos que el tratamiento C (fertilización máxima + foliar) obtuvo el mejor rendimiento agrícola”.

El tratamiento D120F0 a pesar de tener 10 plantas por metro lineal, al igual que el tratamiento D120F100, tuvo una diferencia de rendimiento de 0.78 toneladas por hectárea. De esta manera recalcando nuevamente la importancia de la fertilización en este tipo de cultivos, que posee un crecimiento rastrero y una expansión de las ramas en busca de suelos fértiles. Comprobando lo que plantea Morla (2016), en su estudio de fertilización en maní “...explicado por el aumento de frutos cuajados encontrado en los tratamientos fertilizados”.

Figura 10

Efecto de Tres Niveles de Fertilización en el Rendimiento de Maní (tn/ha).



Nota. A-B.: Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

F: Fertilización.

Determinación del Contenido de Aceite de Cuatro Cultivos Oleaginosos Utilizando Dos Métodos de Extracción

Una vez obtenidos los datos de rendimiento, es menester tomar en cuenta los análisis de contenido de aceite y el porcentaje de extracción. Esto con la finalidad de establecer un plan de producción, estimando la cantidad exacta de aceite necesario y seleccionando el cultivo ideal para cada propósito de producción. Los resultados obtenidos con los métodos de solvente y extrusión son presentados a continuación.

Extracción de Aceite por el Método de Solvente

Se observó que el ajonjolí y el maní presentaron un mayor porcentaje de grasa cruda, en comparación con el jícaro y la soya, que tuvieron porcentajes considerablemente más bajos. La soya presentó la cantidad más baja entre los 4 cultivos, debido a su alto contenido de proteína que posee, alrededor del 40%. "Sus principales componentes son la proteína y la grasa. La soya es la leguminosa

que tiene mayor cantidad y mejor calidad de proteínas y por esto, se utiliza para fortificar productos a base de cereales como el maíz y el trigo” (Luna 2006). La interacción entre grasa y proteína dentro del grano de soya es inversamente proporcional, por lo que posee un bajo nivel de grasa comparado con otros granos que tienen un valor proteico menor. Este método ha sido ampliamente reportado como el más eficiente de todos, acercándose al 100% de la extracción. Esto concuerda con lo establecido por Balcinde et al. (2005), que al finalizar su estudio comparativo de diversos métodos de extracción, afirmó lo siguiente: “De todos los métodos empleados, la extracción con soxhlet fue el más eficiente”. Es necesario tener en cuenta que el método de extracción por solvente requiere una alta inversión inicial y un entrenamiento técnico de uso, a diferencia del proceso de extracción por prensado. En el Cuadro 6 se presentan los resultados del análisis de grasa cruda, mediante la extracción de aceite con la utilización del equipo Soxtec 8000:

Cuadro 6

Medias del Contenido de Grasa Cruda en 100 Gramos por Muestra de Cada Cultivo Oleaginoso, Extraída en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Grano	Grasa Cruda (g) ± DE
Ajonjolí	50.39 ± 0.12 ^A
Jícaro	32.27 ± 0.59 ^B
Maní	50.29 ± 0.30 ^A
Soya	17.50 ± 0.34 ^C
P	<.0001
C.V.	0.81

Nota. P: valor de probabilidad estadística. DE.: Desviación Estándar. A-C.: Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa

(P < 0.05). g: gramos. C.V.: Coeficiente de variación.

Extracción de Aceite por Medio de un Procesamiento de Extrusión

Los resultados de la extracción a través del método prensado no indican el contenido de grasa en el grano, solamente indican la eficiencia de extracción de la máquina. Por lo que es necesario comparar los resultados del análisis de grasa cruda extraída por solventes con los resultados de la extracción en la extrusora. De esta manera se puede ver la cantidad exacta que se obtuvo de aceite y la cantidad que permaneció en la torta como subproducto. En los resultados se puede observar que

todos los cultivos presentaron diferencias significativas entre ellos (Cuadro 7). El ajonjolí presentó una mayor cantidad de aceite (24%) durante el prensado con relación a los otros 3 granos. Sin embargo, no se terminó de extraer todo el aceite y una parte se quedó como subproducto en la torta. Esto es debido a que la extracción por solvente es más eficiente. “El uso de solventes es efectivo, así como capaz de extraer la mayor cantidad de aceite contenido en semillas. Igualmente es más rápido y caro en comparación con el proceso de extracción mecánica. Sus principales desventajas incluyen el coste general del equipamiento usado y la peligrosidad de los solventes que pueden a menudo provocar una explosión” (García et al. 2017).

Cuadro 7

Medias del Contenido de Aceite Extraído por Cada 100 Gramos en Extrusión Caliente, Extraído en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Grano	Aceite (g) ± DE
Ajonjolí	24.41 ± 0.002 ^A
Jícaro	18.30 ± 0.009 ^B
Maní	16.47 ± 0.04 ^C
Soya	11.69 ± 0.008 ^D
P	<.0001
C.V.	1.562667

Nota. P: valor de probabilidad estadística. DE.: Desviación Estándar. A-C.: Letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa

(P < 0.05). g: gramos. C.V.: Coeficiente de variación.

El tamaño del grano de cada cultivo puede influenciar en gran medida en la extracción por prensado. Mientras que en el método de solvente los granos deben estar molidos y las partículas reducidas, en el prensado el grano entra entero. En el caso de la extracción por solvente, el ajonjolí y el maní presentaron los valores más altos (50%). Sin embargo, en la extracción por prensado el valor obtenido para el maní estuvo muy por debajo de lo esperado. Esto se debe a que el grano de maní es más grande puede variar en forma, lo que dificulta la extracción consistente. Esto concuerda con lo que dice Nuñez (2008) “El tamaño de partícula está dado ya que cuanto más pequeñas y homogéneas sean estas, mayor será la superficie interfacial y más se favorecerá la operación”.

La obtención de aceite por el método de solvente resultó ser más eficiente en la extracción en gran medida, en comparación con el prensado. Sin embargo, una ventaja de la utilización del método de extrusión caliente resulta en un subproducto, llamado torta, que tiene amplios usos en la industria ganadera. Una gran porción de la proteína y de la grasa restante se quedan en la torta, haciendo que esta tenga un valor nutricional relativamente alto. Presentando así, una gran oportunidad para el sector de la alimentación del ganado. “En el procesamiento de los frutos del aceite hasta convertirlos en productos oleosos vegetales, se pueden distinguir varios pasos en los que también se generan grandes cantidades de subproductos” (van Dam 2016).

Comparación del Rendimiento de Aceite en Biodiesel de Cuatro Cultivos Oleaginosos

Se han estudiado diferencias entre el aceite crudo y el aceite refinado en la transformación a biodiesel. Es posible que el aceite crudo tenga compuestos que eviten en cierta medida el proceso de transesterificación. “Las diferencias en el rendimiento encontradas en los volúmenes de biodiesel obtenidos a partir de cada uno de los aceites para relaciones menores, con mayor cantidad de catalizador, es atribuida a la formación de jabones (emulsión) entre el NaOH y el agua que no fue retirada durante la reacción” (Guarenas M y Chirinos 2007). En la mayoría de los casos, el rendimiento de aceite refinado en la transformación supera casi en un 10 % al rendimiento de un aceite crudo. “Esta diferencia se atribuyó a la mayor cantidad de ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo. También podría ser por la presencia de fosfolípidos, que actúan como fuente de destrucción del catalizador. Se ha encontrado que la presencia de fósforo disminuye el rendimiento entre un 3% a 5%, a un nivel de fósforo de 50 ppm, dificultando la separación del glicerol de los ésteres.” (Charry 2005). Sin embargo, en el estudio realizado se compararon los rendimientos entre la soya extruida en el laboratorio y un aceite comercial de soya que tuvo el proceso de refinado RBD (Por si siglas en inglés, Refined, Bleached & Deodorized). Para evaluar estos parámetros se utilizaron 500 g de aceite. Los rendimientos obtenidos se observan en el cuadro 8.

Cuadro 8

Rendimientos en la Transformación de Aceite a Biodiesel de Cuatro Cultivos Realizado en el

Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Fuente de aceite	Peso final biodiesel	Rendimiento de conversión
Soya comercial	442 gramos	88.40%
Soya extruida	440 gramos	88.00%
Ajonjolí	488 gramos	97.60%
Jícaro	451 gramos	90.20%
Maní	486 gramos	97.20%

No se observó mayor diferencia entre el rendimiento de biodiesel de soya extruida y el rendimiento de biodiesel del aceite comercial. Esto es debido a que el aceite de soya que fue obtenido a través de la extrusión se conservó de manera adecuada, protegiéndolo de la descomposición de los triglicéridos por acción del oxígeno y de la luz. En el caso de que no se hubiera protegido el aceite correctamente, y el tiempo entre la obtención del aceite y la transformación a biodiesel hubiera sido muy extenso, la presencia de ácidos grasos libres hubiera reducido el rendimiento. Esto es debido a que el oxígeno rompe los enlaces de los triglicéridos, liberando los ácidos grasos libres, mientras que la luz y el calor aceleran estos procesos que ocurren naturalmente en los productos oleaginosos. “La velocidad de las reacciones de oxidación depende de la composición de AGL, la presencia de aire, luz o antioxidantes; así como también de la temperatura de almacenamiento, ya que la conversión de hidroperóxidos en los productos secundarios de la oxidación se ve favorecida cinéticamente a altas temperaturas” (Guerra 2010).

Análisis de Calidad del Biodiesel de los cuatro Cultivos

Estos resultados pretenden determinar la calidad y el potencial de uso y almacenamiento de los diferentes biocombustibles. Es necesario tomar en cuenta estas mediciones para realizar planes de producción de combustibles, para asegurar siempre una inclusión exitosa de biodiesel en las operaciones industriales.

Perfil de Ácidos Grasos de Aceite y Biodiesel de cuatro cultivos oleaginosos

Después de realizar la cromatografía de gases en el aceite y biodiesel, se pudo comparar los resultados en la transformación a nivel de ácidos grasos, después de la conversión a biodiesel. Se obtuvo una sumatoria de lecturas de ocho ácidos grasos entre los cuatro cultivos. El ácido palmítico, esteárico, behénico, oléico, vaccénico, nervónico, linoléico y linolénico. Cada uno de estos ácidos tiene un diferente peso molecular, por lo que llegan a su pico de ignición en momentos distintos. Esto ayuda en la caracterización de estos y en la determinación del porcentaje que ocupan dentro del total de ácidos grasos en el grano. Los resultados concuerdan en gran medida con lo descrito por Molina Mayo (2011), que caracterizó cuatro ácidos grasos de gran importancia investigativa: el palmítico, esteárico, oléico y linoléico. En este caso, el autor utilizó aceite proveniente de ajonjolí, maní y soya. Se encontró que los ácidos grasos se ubicaron dentro del rango propuesto por este autor, lo cual indica que los granos no varían de manera drástica en la proporción de ácidos grasos. La única diferencia encontrada en este estudio en comparación con Molina Mayo (2011), fue que este autor planteó un rango de ácido esteárico (C18:0) en el ajonjolí, de 6-8%, el cual resultó ser más alto que lo encontrado.

En cuanto a la caracterización del jícara, Corrales et al. (2014) reportó los niveles esperados de ácido oléico (C18:1 cis-9) y linoléico (C18:2n6 cis-9,12). Los resultados encontrados concordaron con este estudio y se ubicaron en el rango de ácido oléico correctamente (39-59%), mientras que el ácido linoléico estuvo por arriba del rango propuesto por el autor (18-21%).

Se observó que el jícara tuvo resultados más altos en el contenido de ácidos grasos saturados, en comparación con los otros tres cultivos. Este resultado se acerca bastante en lo propuesto por Salinas (2013), que plantea que el porcentaje de ácidos grasos saturados es del 23,8%, comparado con el 20.84% encontrado en este estudio. Por otro lado, el maní presentó una mayor cantidad de ácidos grasos mono insaturados, en comparación con los otros tres cultivos. En este caso, el único ácido graso mono insaturado que se encontró en gran proporción fue el ácido oléico, el cual suma un 64% de los ácidos grasos totales. De esta manera difiere levemente con Manisur (2019), que inicialmente planteó

niveles más bajos de este ácido graso. “Los ácidos grasos predominantes en el maní tradicional corresponden generalmente al oléico (45-50%) y al linoléico (30-35%)” (Manisur 2019). Por último, mediante los resultados se descubrió que la soya posee una mayor proporción de ácidos grasos poliinsaturados, en comparación con el jícara, ajonjolí y maní. Los resultados de ácidos grasos poliinsaturados se acercaron considerablemente a lo planteado por Rio de Gómez (2003), que establece un porcentaje de 62% para este tipo de ácidos grasos, en comparación con un 59% obtenido en este estudio. Los resultados del perfil de ácidos grasos del aceite están presentados en el cuadro 9.

Cuadro 9

Resultados del Análisis de Perfil de Ácidos Grasos del Aceite de los Cuatro Granos Oleaginosos en g/100 Gramos de Aceite, Realizado en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

PAG	Ajonjolí	Jícara	Maní	Soya
	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE
C16:0	9.7 ± 0.14 ^{BC}	15.4 ± 0.55 ^A	9.34 ± 0.54 ^C	11.05 ± 0.42 ^B
C18:0	4.61 ± 0.42 ^B	5.44 ± 0.12 ^A	3.47 ± 1.20 ^C	4.22 ± 0.16 ^B
C22:0	ND	ND	2.44 ± 0.014 ^A	ND
C18:1 cis-9	38.93 ± 0.56 ^C	56.72 ± 1.50 ^B	63.64 ± 0.77 ^A	21.74 ± 1.35 ^D
C18:1 cis-11	ND	ND	ND	3.10 ± 0.35 ^A
C24:1 cis-15	ND	ND	0.99 ± 0.70 ^A	ND
C18:2n6 cis-9,12	46.76 ± 0.84 ^A	23.78 ± 0.28 ^C	20.10 ± 1.90 ^D	53.51 ± 0.53 ^A
C18:3n3 cis-9,12,15	ND	ND	ND	5.97 ± 0.77 ^A
∑SAFA	14.31 ± 0.28 ^B	20.84 ± 0.67 ^A	15.26 ± 0.65 ^B	15.27 ± 0.21 ^B
∑MUFA	38.93 ± 0.57 ^C	56.72 ± 1.50 ^B	64.63 ± 0.84 ^A	24.84 ± 1.39 ^D
∑PUFA	46.76 ± 0.85 ^B	23.78 ± 2.83 ^C	20.10 ± 1.91 ^D	59.49 ± 0.60 ^A
% CV	2.7	3.9	6.36	7.04

Nota. DE.: Desviación Estándar. % CV.: Coeficiente de Variación. A-D.: Letras diferentes en cada fila indican diferencia significativa (P < 0.05).

ND.: No detectado PAG.: Perfil de Ácidos Grasos SAFA.: Ácidos grasos saturados (por sus siglas en inglés). MUFA.: Ácidos grasos monoinsaturados (por sus siglas en inglés). PUFA.: Ácidos grasos poliinsaturados (por sus siglas en inglés)

Realizando el perfil de ácidos grasos al biodiesel se pudo evidenciar el cambio que sufren los ácidos grasos al momento de la transformación del aceite (Cuadro 10). Con relación a los ácidos grasos saturados, el jícara continúa siendo el cultivo que tiene más concentración de estos, junto con el ajonjolí. De igual manera, estos dos cultivos sufrieron un aumento en la proporción de ácidos grasos saturados, mientras que el maní y la soya mostraron niveles más bajos. En cuanto a los ácidos grasos

mono insaturados, el maní presentó una mayor cantidad en el perfil del aceite al igual que en el perfil de ácidos grasos de biodiesel. Al momento de la transformación a biodiesel, el jícara aumentó la proporción de ácido oléico e igualó en cantidad (59%) al biodiesel de maní. En el caso de los ácidos grasos poliinsaturados, el biodiesel de soya presentó una gran diferencia con respecto a los otros tres cultivos. Por lo que se concluye que la soya presenta diferencias significativas mayores con la proporción de ácidos grasos poliinsaturados en el aceite y en biodiesel. Se presentó un caso particular con el ácido vaccénico en la soya, estando este presente en el aceite en un 3%, pero no en el biodiesel. Este ácido graso poco común tiene su pico de ignición muy cerca al ácido oléico, por lo que sus mediciones tienden a confundirse. Es por esta razón que en el aceite el ácido oléico tiene una proporción de 21%, mientras que en el biodiesel tiene 25%. Demostrando así que los ácidos grasos tienden a agruparse en las mediciones al momento de transformarse en biodiesel.

Cuadro 10

Resultados del Análisis de Perfil de Ácidos Grasos del Biodiesel de los Cuatro Granos Oleaginosos en g/100 Gramos de Biodiesel, Realizado en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

PAG	Ajonjolí	Jícara	Maní	Soya
	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE	Media (g) ± DE
C16:0	9.51 ± 0.85 ^B	16.76 ± 0.24 ^A	10.42 ± 0.78 ^B	10.73 ± 0.09 ^B
C18:0	5.55 ± 0.46 ^A	5.55 ± 0.42 ^A	2.52 ± 0.21 ^C	3.2 ± 0.01 ^B
C22:0	ND	ND	2.63 ± 0.03 ^A	ND
C18:1 cis-9	40.94 ± 0.60 ^B	59.30 ± 0.15 ^A	59.08 ± 0.18 ^A	25.32 ± 0.12 ^C
C24:1 cis-15	ND	ND	1.30 ± 0.01 ^A	ND
C18:2n6 cis-9,12	46.52 ± 0.42 ^A	17.33 ± 0.14 ^B	24.03 ± 0.15 ^B	52.13 ± 0.38 ^A
C18:3n3 cis-9,12,15	ND	ND	ND	4.88 ± 0.35 ^A
∑SAFA	15.06 ± 0.56 ^B	22.32 ± 0.40 ^A	12.94 ± 0.64 ^C	13.98 ± 0.94 ^{BC}
∑MUFA	40.94 ± 0.60 ^B	59.30 ± 1.55 ^A	59.08 ± 0.18 ^A	25.32 ± 1.20 ^C
∑PUFA	46.52 ± 0.42 ^B	17.33 ± 1.42 ^C	24.03 ± 0.15 ^C	57.09 ± 0.42 ^A
% CV	6.06	4.64	4.72	6.49

Nota. DE.: Desviación Estándar. % CV.: Coeficiente de Variación. A-C.: Letras diferentes en cada fila indican diferencia significativa (P < 0.05).

ND.: No detectado PAG.: Perfil de Ácidos Grasos SAFA.: Ácidos grasos saturados (por sus siglas en inglés). MUFA.: Ácidos grasos monoinsaturados (por sus siglas en inglés). PUFA.: Ácidos grasos poliinsaturados (por sus siglas en inglés)

Calorimetría

No se encontraron diferencias significativas entre los cultivos, en cuanto al poder calórico. El ajonjolí y la soya presentaron valores ligeramente más altos, sin embargo, técnicamente el biodiesel de ajonjolí, jícara, maní y soya tienen la misma capacidad energética al momento de la combustión. Los datos obtenidos fueron los esperados en cuanto a la cantidad de kilocalorías por 100 gramos que cada biodiesel puede ofrecer, y se acercan considerablemente a lo establecido por Fassinou et al. (2010). El cual estableció valores en MJ/kg para el biodiesel de maní y ajonjolí, de 38.08 y 38.36 respectivamente. Estos resultados convertidos a kilocalorías por 100 gramos vendrían a ser 909.04 para el maní y 916.21 para el ajonjolí, valores que se acercan en gran medida a los obtenidos en este estudio. En un estudio muy parecido Kumbhar et al. (2022), documentó un valor calórico para el biodiesel de soya, que se ubicaba en los 39.12 MJ/kg. Este valor convertido a kcal/100 g sería 934.36, el cual concuerda mucho con este estudio. Por lo que se podría concluir que el poder calorífico del biodiesel de varias fuentes de materia prima no varía en gran medida. De igual manera el biodiesel del mismo cultivo en diferentes repeticiones no varía su calorimetría considerablemente. El biodiesel de soya presentó valores mínimamente más altos en el presente estudio y en el estudio realizado por Kumbhar et al. (2022). Finalmente, el cultivo del jícara presentó un valor calórico de 935.63 kcal/100 g, el cual está por debajo de lo reportado por Ramírez (2008). Este autor reportó un poder calórico para el biodiesel de jícara de 964.93 kcal/100 g, discrepando levemente en lo encontrado durante este estudio (Cuadro 11).

Cuadro 11

Medias del Contenido de Calorimetría en 100 gramos por Muestra de Cada Cultivo Oleaginoso, Obtenidas en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Grano	Calorimetría (kcal/100 g) ± DE
Ajonjolí	944.06 ± 0.19
Jícara	935.63 ± 0.19
Maní	941.82 ± 0.59
Soya	945.46 ± 0.30

Grano	Calorimetría (kcal/100 g) ± DE
P	0.7891
C.V.	1.34

Nota. P: valor de probabilidad estadística. DE.: Desviación Estándar. g: gramos. C.V.: Coeficiente de variación.

Índice de Estabilidad Oxidativa

El índice de estabilidad oxidativa ayuda a determinar el tiempo en el que un compuesto tarda en degradarse, en este caso, el biodiesel. Se utilizaron dos normas de calidad de diferentes orígenes. La norma europea, EN 14112, que permite un mínimo de 6 horas de en condiciones de oxidación acelerada. De igual manera, se comparó el índice de oxidación con la norma estadounidense ASTM D6751 (American Society for Testing and Materials), que permite un mínimo de 3 horas como tiempo de oxidación (Moreira 2012).

En el Cuadro 12 se presentan los tiempos de la prueba de oxidación acelerada en el equipo Rancimat 873. Es importante entender que el aceite utilizado para la preparación del biodiesel nunca fue refinado. En algunos casos el refinamiento podría reducir la vida útil del producto final, por la extracción de antioxidante naturales en el proceso de RBD. “En los aceites originales existen antioxidantes naturales, pero algunos de ellos son extraídos durante el refinado, por eso se permite el uso de aditivos para mejorar este parámetro” (Alonso 2014).

Cuadro 12

Tiempo de Oxidación Acelerada en el Equipo Rancimat 873 de 4 Cultivos, Obtenido en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Cultivo	Tiempo de estabilidad (h)	Norma
Ajonjolí	16.53	EN 14112/ASTM D6751
Jícaro	29.46	EN 14112/ASTM D6751
Maní	4.4	ASTM D6751
Soya	5.67	ASTM D6751

Nota. h: horas.

Adicionalmente, se encontró que el biodiesel de maní presentó un menor tiempo de resistencia a la oxidación. Esto es debido a la estructura del aceite que compone el biodiesel. En la mayoría de los casos, la composición de antioxidantes y ácidos grasos define el tiempo de oxidación.

Al revisar el cuadro 11, se observa que el maní posee un 64% de ácidos monoinsaturados y un 20% de ácidos grasos poliinsaturados. La presencia de estos compuestos puede contribuir a la aceleración de la oxidación. “Los compuestos di y triinsaturados tales como ésteres de ácidos grasos linoleico y linolénico, tienen una mayor susceptibilidad a la oxidación, que contienen sitios reactivos para la iniciación de la reacción de oxidación” (Moreira 2012). Por otro lado, vemos que el jícara tuvo el mayor tiempo de resistencia a la oxidación, sumando un total de 29 horas. Refiriéndonos nuevamente al cuadro 11, observamos que el aceite de jícara es el que posee una mayor cantidad de ácidos grasos saturados entre los 4 cultivos, con un 20%. Esto influye directamente en el tiempo de oxidación, ya que los ácidos grasos saturados tienden a ser más estables. “Los ácidos grasos saturados están saturados e inertes y por lo tanto son muy estables. En términos de utilización, esto significa que pueden soportar elevadas temperaturas y almacenarse durante largos períodos” (García et al. 2017).

Caracterización del Fruto de Jícara

El estudio de este fruto resulta muy pertinente para entender de qué manera una producción de biocombustibles puede ser sostenible. Al momento de procesar el fruto de este árbol, se puede obtener beneficio de todas las partes de este producto. Las semillas pueden ser utilizadas para la extracción de aceite, la pulpa puede utilizarse para la alimentación animal o para la producción de bioetanol, y la cáscara se puede utilizar como fuente de combustión, gracias a su naturaleza leñosa. De igual manera, se pueden obtener subproductos de la extracción del aceite de las semillas, y subproductos de la torta después de su procesamiento. “Del jícara se puede obtener aceite vegetal para consumo humano, etanol o alcohol para la industria farmacéutica o la producción de bebidas espirituosas, carbón vegetal, harina para alimento concentrado para animal y una pulpa que también sirve para elaborar ese concentrado” (Fernandez 1994).

Sumándole a esto, el árbol puede establecerse con facilidad en suelos marginales y posee cierta resistencia a sequías. Al mismo tiempo, ofreciendo servicios ecosistémicos como la filtración de agua, filtración de carbono, sombra para el ganado en sistemas silvopastoriles, y barrera viva en los

límites de los potreros. “Es el único árbol tropical que no exige el uso exclusivo del suelo, sino que crece en asociación con cualquier cultivo para mejorarlo mediante su sombra ligera. Su profunda raíz central pivotante le permite resistir sequías, así como inundaciones prolongadas” (Jochims 2007).

Durante este estudio, se realizó una estimación del porcentaje de fruto que corresponde a la semilla y a la pulpa. Se observó que aproximadamente el 14% del peso de un fruto de jícara corresponde a las semillas. Mientras que la semilla en conjunto con la pulpa, representan el 51% aproximadamente. El peso de la pulpa concuerda con lo establecido por Ramírez (2008), con un 50%. Sin embargo, el peso de la semilla presentado por este autor fue de 9%, mientras que en este estudio representa un 14%. Aquí es donde se puede observar la gran diferencia que hay entre el volumen de la pulpa relacionado con el volumen que ocupa la semilla dentro del fruto.

Los resultados del análisis de 20 frutos de jícara están presentados en el cuadro 13.

Cuadro 13

Peso de 20 Frutos de Jícara con Porcentajes Correspondientes a Semillas y Pulpa, Obtenido en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano.

Unidad	Peso (g)	Pulpa + Semilla (g)	Peso semilla (g)	semilla + pulpa (%)	Semilla (%)
1	348	173.45	67.53	49.84	19.41
2	373	186.96	73.04	50.12	19.58
3	363	227	39.47	62.53	10.87
4	290	155.76	29.003	53.71	10.00
5	273	154.43	42.23	56.57	15.47
6	293	153.51	30.19	52.39	10.30
7	289	122.07	65.27	42.24	22.58
8	274	157.46	45.18	57.47	16.49
9	212	114.07	37.67	53.81	17.77
10	323	154.43	46.86	47.81	14.51
11	331	177.99	30.81	53.77	9.31
12	249	129.86	37.06	52.15	14.88
13	293	155.12	40.17	52.94	13.71
14	228	114.95	35.39	50.42	15.52
15	210	85.86	25.04	40.89	11.92
16	343	185.53	51.3	54.09	14.96
17	232	131.41	44.55	56.64	19.20
18	361	186.26	58.33	51.60	16.16
19	177	70.12	14.75	39.62	8.33
20	254	129.96	16.93	51.17	6.67
Promedio	285.8	148.31	41.54	51.49	14.38

Nota. g: gramos. % = porcentaje.

Es necesario considerar todos estos factores para definir qué parte del fruto se desea explotar como producto principal, y qué parte se desea incluir como producto secundario o subproducto. Ambos datos son importantes a tomar en cuenta, dependiendo del objetivo de producción utilizando esta materia prima.

Conclusiones

Dentro de los factores que podemos controlar en el manejo agronómico, la densidad resultó ser más decisiva en el cultivo de girasol, mientras que la adecuada nutrición del cultivo resulta más influyente en el rendimiento del cultivo de maní.

El porcentaje de aceite varía considerablemente entre los 4 cultivos, siendo el maní y ajonjolí los que presentaron mayores porcentajes de aceite. Sin embargo, el contenido se ve influenciado por otros componentes dentro del grano, como la proteína.

La calidad y el rendimiento de los biocombustibles varía de gran manera según su composición de ácidos grasos. De manera que el aceite de maní y ajonjolí tuvieron mejores rendimientos a biodiesel y el biodiesel de jícara y ajonjolí tuvieron mejores índices de estabilidad oxidativa.

El jícara representa una gran oportunidad en la región para ofrecer bienes ecológicos y productos de gran valor, con un alto potencial de explotación industrial. Siendo la cáscara y la pulpa los mayores componentes dentro del fruto, aportando cerca del 86% de peso total.

Recomendaciones

Realizar un análisis económico para determinar la factibilidad de cada cultivo en la producción de aceite y/o biodiesel.

Estudiar variables agronómicas de cultivos analizados en la fase de laboratorio de este estudio (Soya, Jícaro, Ajonjolí).

Realizar estudios sobre el valor y uso de los subproductos obtenidos a partir de los procesos de extracción de aceite y transformación a biodiesel.

Estudiar el comportamiento agronómico y rendimiento a biomasa y bioetanol de otros cultivos energéticos.

Referencias

- [AOCS] American Oil Chemists Society. 2017a. Official method Cd 12b-92: oil stability index. [sin lugar]: American Oil Chemists Society.
- [AOCS] American Oil Chemists Society. 2017b. Official method Ce 1j-07: cis-, trans-, saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids in extracted fats by capillary GLC. [sin lugar]: American Oil Chemists Society.
- [AOCS] American Oil Chemists Society. 2017c. Official method Ce 2b-11: direct methylation of lipids in foods by alkali hydrolysis. [sin lugar]: American Oil Chemists Society.
- [AOP] Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos. 2021. Biocombustibles de primera, segunda y tercera generación: ¿qué son? ¿cómo contribuyen a reducir emisiones? España: AOP; [consultado el 30 de jun. de 2022]. <https://www.aop.es/blog/2021/06/03/biocombustibles-de-primera-segunda-y-tercera-generacion-que-son-como-contribuyen-a-reducir-emisiones/>.
- [DIN] Deutsches Institut für Normung. 2005. Testing of solid and liquid fuels - determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value. [sin lugar]: Deutsches Institut für Normung.
- [FAO] La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2008. La FAO pide una revisión de las políticas y subvenciones a los biocombustibles. [sin lugar]: [sin editorial]; [consultado el 12 de jun. de 2022]. <https://www.fao.org/news/story/es/item/8224/icode/>.
- Alonso E. 2014. Biodiesel de ésteres etílicos de ácidos grasos: correlación composición-propiedades [Tesis]. [sin lugar]; [consultado el 14 de jun. de 2022]. https://oa.upm.es/23459/2/PFC_Elena_Alonso_Castro_3.pdf.
- Balcinde Y, Rosa Hung B, Marrero A, Tirado S, Pérez C, Falero A. 2005. Comparación de diferentes métodos de extracción para la obtención de una fracción rica en fitosteroles a partir de la cachaza de caña de azúcar. CENIC Ciencias Químicas; [consultado el 20 de jun. de 2022]. 36(1):6–8. <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181620586001.pdf>.
- Bautista C. 2011. Subproductos generados en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de tempate. San Salvador: Universidad Francisco Gavidia ; [consultado el 12 de jun. de 2022]. https://icti.ufg.edu.sv/doc/SUBPRODUCTOS_DE_BIODISEL.pdf.
- Benavides A, Benjumea P, Pashova V. 2007. El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores de diesel. Scielo; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 74(153):141–150. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a16v74n153.pdf>.
- Bravo R, Cortés García R, Aguilar G, Tovar Miranda R. 2007. Biocombustibles: su uso y relación con el calentamiento global. La Ciencia y el Hombre; [consultado el 15 de nov. de 2021]. 10(1). <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num1/articulos/biocombustibles/index.html>.
- Castellar G, Angulo E, Cardozo B. 2014. Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. Universidad Autónoma del Caribe; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 12(2):90–104. <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>.
- Charry G. 2005. Transesterificación de aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea usando CaO Y Fe₂O₃ como catalizadores [Tesis]. [sin lugar]: Universidad de los Andes; [consultado el 22

- de may. de 2022]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22530/u270718.pdf?sequence=1>.
- Corrales C, Salinas R, Dávila I, Vaillant F, Pérez A. 2014. Investigaciones en Seguridad Alimentaria y Nutricional. [sin lugar]: PRESANCA; [consultado 17/06/22]. <file:///D:/OneDrive%20-%20Zamorano/Downloads/Investigaciones%20en%20Seguridad%20Alimentaria%20y%20Nutricional.pdf>.
- Escalante L, Escalante Y, Linzaga C. 2008. Densidad de siembra del girasol forrajero. *Agronomía Costarricense*; [consultado el 23 de jun. de 2022]. 32(2):177–182. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43632213.pdf>.
- Fassinou WF, Sako A, Fofana A, Koua KB, Toure S. 2010. Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels. *Energy*; [consultado el 19 de jun. de 2022]. 35(12):4949–4954. doi:10.1016/j.energy.2010.08.030.
- Fernandez R. 1994. Jícaro, árbol sagrado y respuesta económica. *Envío*; [consultado el 21 de jun. de 2022]. 147(1). <https://www.envio.org.ni/articulo/848>.
- Garcés-Fiallos F, Gallo K, Sanchez-Mora F. 2015. Respuesta de genotipos de maní a tres densidades de siembra y presencia de enfermedades en Quevedo, Ecuador. *Cultivos Tropicales*; [consultado el 21 de jun. de 2022]. 36(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000300016.
- García T, Yosvany Díaz Domínguez, Maylin Rondón Macias, Elina Fernández Santana, Ramón Piloto Rodríguez. 2017. Extracción de aceites de origen vegetal. [sin lugar].
- García-Díaz M. 2013. Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado.: Gandón-Hernández, José, & Maqueira-Tamayo, Yudisel. 33(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000200005.
- García-Muentes SA, Lafargue F, Labrada, Benicio, Díaz, Manuel, Del Campo, Ana. 2018. Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 30(1):142–158. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443557751012>.
- Guarenas M A, Chirinos A. 2007. Producción de Biodiesel de aceite de coco artesanal de una población del Estado Falcón. *Prospectiva*; [consultado el 12 de jun. de 2022]. 5(2):16–23. <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251110004.pdf>.
- Guerra R. may. 2010. Análisis del proceso de oxidación del biodiesel y estudio técnico y económico para el arranque de una planta productiva-edición única [Tesis]. México: Tecnológico de Monterrey; [consultado el 12 de jun. de 2022]. <https://1library.co/document/ky6j70oq-analisis-oxidacion-biodiesel-tecnico-economico-arranque-productiva-edicion.html>.
- Jochims K. 2007. El árbol de jícaro y su múltiple aprovechamiento. Nicaragua: [sin editorial]; [consultado el 21 de jun. de 2022]. <http://www.ideassonline.org/pic/doc/jicaro.pdf>.
- Knothe G, Krahl J, van Gerpen J. 2010. *The Biodiesel Handbook*. 2ª ed. [sin lugar]: Academic Press. ISBN: 9780983507260.
- Kumbhar V, Pandey A, Sonawane CR, El-Shafay AS, Panchal H, Chamkha AJ. 2022. Statistical analysis on prediction of biodiesel properties from its fatty acid composition. *Case Studies in Thermal Engineering*; [consultado el 19 de jun. de 2022]. 30(11). doi:10.1016/j.csite.2022.101775.

- Luna A. 2006. Valor nutritivo de la proteína de soya. *Investigación y Ciencia*; [consultado el 12 de jun. de 2022]. 14(36):29–34. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67403606.pdf>.
- Manisur. 2019. Maní alto oléico. Argentina: [sin editorial]; [consultado el 18 de jun. de 2022]. <https://www.manisur.com.ar/es/nuestro-mani/mani-alto-oleico>.
- Molina Mayo C. 2011. Estudio de la composición y estabilidad de biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales limpios y procedentes de aceites de fritura [Tesis doctoral]. San Cristobal de La Laguna: Universidad de la Laguna. 1 CD-ROM. Texto en español; resúmenes en español e inglés; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://www.worldcat.org/title/estudio-de-la-composicion-y-estabilidad-de-biodiesel-obtenido-a-partir-de-aceites-vegetales-limpios-y-procedentes-de-aceites-de-fritura/oclc/864332007?ap=citavi>.
- Montiel E. 2003. Modelo poblacional de heterogeneidad funcional [Tesis doctoral]. [sin lugar]: Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada; [consultado el 21 de jun. de 2022]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3360/1/153681.pdf>.
- Moreira E. 2012. Las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel. *Ingenium*; [consultado el 22 de jun. de 2022]. 13(25). <http://www.revistas.usb.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/1307>.
- Morla F. 2016. Fertilización cálcica en regiones maniseras de Córdoba [Tesis]. Argentina: Universidad Nacional del Río Cuarto; [consultado el 27 de jun. de 2022]. https://www.researchgate.net/publication/305850952_FERTILIZACION_CALCICA_CON_NITRATO_DE_CALCIO_Y_RENDIMIENTO_DE_MANI_EN_LA_REGION_MANISERA_DE_CORDOBA/link/57a38e2108ae3f4529237080/download.
- Nuñez C. 2008. Extracciones con equipo soxhlet. Argentina: [sin editorial]; [consultado el 20 de jun. de 2022]. <https://www.scribd.com/doc/51751551/Extraccion-con-equipo-Soxhlet>.
- Planelles M. 2015. La acumulación de gases de efecto invernadero alcanza niveles históricos. España: [sin editorial]; [actualizado 2015; consultado el 16 de nov. de 2021]. https://elpais.com/internacional/2015/11/09/actualidad/1447066103_999102.html.
- Quevedo M, Beltrán J, Barragan E. 2018. Efecto de la densidad de siembra en el rendimiento y rentabilidad de un híbrido de maíz en condiciones tropicales. *Agronomía Colombiana*; [consultado el 12 de jun. de 2022]. 36(3):248–256. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-99652018000300248&script=sci_abstract&tlng=es.
- Ramírez I, Chávez Vela NA, Jáuregui Rincón J. 2012. Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 20(55):62–70. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67424409008.pdf>.
- Ramírez MA. 2008. Cultivos para la producción sostenible de biodiesel, el jícara. Honduras: SNV; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 24 p. <http://www.bibalex.org/search4dev/files/289309/120293.pdf>.
- Reategui W, Salas F. 2013. Estudio del proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma en un reactor por lotes. *Producción + Limpia*; [consultado el 16 de nov. de 2021]. 8(1):119–134. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1011/1/443-969-1-PB.pdf>.

- Rio de Gómez E. 2003. El aceite de soja es un importante elemento terapéutico-nutricional. Argentina: Universidad de Buenos Aires; [consultado el 18 de jun. de 2022]. <https://www.intramed.net/contenidover.asp?contenidoid=26269>.
- Salinas R. 2013. Obtención y evaluación físico-química de leche vegetal a partir de semilla de jícara sabanero [Tesis]. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua; [consultado el 18 de jun. de 2022]. <http://riul.unanleon.edu.ni/jspui/bitstream/123456789/6100/1/223334.pdf>.
- Thiex N, Anderson S, Gildemeister B. 2003. Crude Fat, Diethyl Ether Extraction, in Feed, Cereal Grain, and Forage (Randall/Soxtec/Submersion Method): Collaborative Study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*; [consultado el 23 de jun. de 2022]. 86(5):888–898. doi:10.1093/jaoac/86.5.888.
- Torres JA, Montiel C. 2001. Evaluación de niveles de fertilización química en el cultivo de maní, su incidencia en el rendimiento y calidad de cosecha [Tesis]. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria; [consultado el 21 de jun. de 2022]. <https://repositorio.una.edu.ni/1798/1/tnf04t693e.pdf>.
- van Dam J. 2016. Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Países Bajos: Wageningen University & Research; [consultado el 20 de jun. de 2022]. https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Memorias%20de%20la%20XVIII%20Conferencia%20Internacional%20sobre%20Palma%20de%20aceite/M_2_15_%20Subproductos%20de%20la%20palma.pdf.
- Zuil S. 2011. Densidad de siembra y fertilización nitrogenada en girasol. Argentina: Estación Experimental Agropecuaria Reconquista; [consultado el 21 de jun. de 2022]. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_vye_nro33_densidad_de_siembra_y_fertilizacion_ni.pdf.

Anexos

Anexo A

Generalidades sobre la combustión de biodiesel

Se estima que, durante la combustión de este tipo específico de combustibles, se reduce un 95% de los hidrocarburos liberados a la atmósfera, en comparación con la gasolina tradicional (Bravo et al. 2007). También existen otras fuentes de biocombustibles que requieren de una inversión muy alta por cada galón producido, como es la tecnología de producción de aceite a partir de microalgas fotosintéticas. De igual manera, existen otras opciones, tales como la utilización de aceites usados de cocina. Es por esta razón que es importante hacer un análisis de costos económicos y ecológicos, para poder identificar qué alternativa es la más eficiente en el área que se va a situar la producción.

Anexo B

Información sobre la aplicación de biocombustibles en motores comunes.

El biodiesel es un biocombustible muy parecido al diesel de origen fósil, es por esta razón que puede ser mezclado en cierto porcentaje, dependiendo el origen del biodiesel, con el diésel convencional. El proceso de transformación de aceite a biodiesel es necesario para su utilización en forma de combustible, esto debido a su alta viscosidad y densidad. Elevados valores de densidad y viscosidad de los aceites vegetales y las grasas de animales tienden a causar problemas cuando son usados directamente en motores diesel (García-Muentes et al. 2018).

Anexo C

Descripción de proceso de transesterificación.

Este proceso es realizado por lotes, a través de un catalizador, que divide el proceso en tres etapas para obtener el biodiesel y la glicerina. Primero, una cadena de ácido graso se separa del triglicérido y se combina con el primer mol de alcohol metílico formando un mol de metil-éster y un mol de diglicérido. Luego una cadena de ácido graso se separa del diglicérido formado y se combina con el segundo mol de alcohol metílico formando una molécula de metil-éster y una molécula de monoglicérido. Finalmente, el monoglicérido formado se combina con el tercer mol de alcohol metílico formando una molécula de metil-éster y una molécula de glicerina, terminando de este modo el proceso de transesterificación (Reategui y Salas 2013). El producto final está conformado por compuestos llamados Ácido Graso Metil Éster (AGME), que son los que constituyen el biodiesel. En cuanto a los otros compuestos que son ingredientes claves para la producción de biodiesel, el metanol y un catalizador, en este caso el hidróxido de potasio. El metanol se une a los ácidos grasos al momento que se separan de la molécula de glicerina, mientras que el catalizador acelera estos procesos de manera eficaz.

Anexo D

Generalidades sobre la reducción de contaminación utilizando biocombustibles.

Se debe tomar en cuenta siempre el costo del transporte, de la utilización de agroquímicos y los recursos naturales utilizados en la producción vegetal, destinada a la transformación a biocombustibles. En otros casos se ha realizado estudios de comparación entre la cantidad de carbono que es emitido y la cantidad de carbono que es capturado al suelo por los procesos de fotosíntesis. “Los biocombustibles ofrecen oportunidades, pero también plantean riesgos. El resultado dependerá del contexto específico del país y de las políticas adoptadas” ([FAO] La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura 2008). Los factores considerados en la mayoría de los casos son: el uso de la tierra, el uso de agua y el uso de insumos agrícolas para la producción de estos cultivos energéticos. Estos factores están ligados directamente con las especificaciones del cultivo, por lo que se utiliza una amplia variedad de plantas oleaginosas para la producción de biodiesel.

Anexo E

Datos generales sobre los cultivos utilizados en el estudio.

La soya (*Glycine max*) es la oleaginosa de mayor importancia en el mundo. Su alto valor económico radica en la calidad de su aceite y proteína, las cuales son industrializadas en otros productos de valor agregado. La pasta proteica de soya es considerada como la más nutritiva dentro de las proteínas de origen vegetal.” La soya es la fuente más abundante y valiosa de proteínas vegetales, ya que además de ser de gran calidad, cuenta con un adecuado contenido de aminoácidos esenciales que representan beneficios importantes para la salud” (Luna 2006). El maní (*Arachis hypogaea*), en su cápsula contiene de dos a cuatro granos. Este cultivo oleaginoso es uno de los que posee el rendimiento más alto en cuanto a la extracción de aceite por prensado. Cada grano tiene un promedio de 50% de aceite y un 22%-30% de contenido proteínico. En Centro América, el mayor productor de este cultivo es Nicaragua. En cuanto al ajonjolí (*Sesamum indicum*), las semillas contienen cerca de 25% de proteína y son ricas en calcio (1.3%). Las semillas presentan un 50-60% de aceite de sabor suave. El aceite producido del primer prensado en frío se encuentra entre los aceites comestibles más caros del mundo debido a su bajo contenido en colesterol y alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados: conteniendo cerca del 47% de ácido oleico y 39% de ácido linoleico. Por último, el cultivo del jícara (*Crescentia cujete*). El cultivo de jícara tiene una ventaja sobre los otros cultivos bajo estudio. Esta ventaja está relacionada con el uso del suelo y con su naturaleza perenne. El cultivo presenta una cáscara dura que puede ser utilizada como combustible al momento de perder la humedad. De igual manera las semillas y la pulpa son de gran palatabilidad para el ganado vacuno. Por último, se pueden aprovechar los subproductos provenientes de la extracción de aceite para alimentar al ganado. Se estima que por cada fruto el 9.5% corresponde a semilla, la que contiene un promedio de 33% de aceite, los rendimientos de semilla de jícara oscilan entre 0.93 – 1.43 ton/ha, a una densidad de 500 árboles por ha. De igual manera, a una densidad de 500 árboles, el rendimiento de aceite por extracción mecánica oscila entre 0.28 – 0.42 ton/ha (Ramírez 2008). Debido a su

contenido de fibra, las semillas de jícara pueden entorpecer el proceso de extracción de aceite por prensado caliente. Debido a la fricción que este genera puede causar daños en la máquina y en la calidad del aceite. Por lo que se recomienda utilizar otro tipo de extracción, ya sea por prensado frío o por solvente. La inclusión del jícara en este estudio es muy acertada, ya que pretende evaluar la posibilidad de las especies locales de ser explotadas localmente por sus productos. Todo esto mientras ofrecen servicios ecosistémicos en potreros y parcelas productivas.

Anexo F

Información de sostenibilidad utilizando cultivos bioenergéticos.

Es importante tomar en cuenta que no todos estos cultivos están establecidos naturalmente en todos los países del mundo, de igual manera, no todos los países cumplen con los factores edafoclimáticos para producirlos. Por otro lado, si la extracción de aceite es realizada a nivel local con los materiales genéticos que poseen, se ahorra una gran parte del combustible utilizado en el transporte del aceite o biodiesel. Mas aun, los subproductos de extracción de aceites para la conversión a biodiesel pueden ser utilizados en la alimentación animal. De esta manera, reemplazar total o parcialmente el uso de alimentos producidos directamente para alimentación animal. De tal manera, que las áreas que se dedicaban a la producción de alimentos para animales pueden ser destinadas a la producción de biocombustibles y sus subproductos para la producción animal.” Esta torta proteínica puede ser desgrasada aún más en una planta de extracción por disolventes. También puede ser utilizada directamente como alimento de ganado o, si ha sido tratada higiénicamente, puede pasar a una instalación para obtención de proteínas para la alimentación humana” (Bautista 2011).