



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

**POSTGRADO EN
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

**PLANTAS DE ZONAS SEMIÁRIDAS DEL ALTIPLANO
CENTRO-NORTE DE MÉXICO CON POTENCIAL PARA LA
PRODUCCIÓN DE ACEITE**

MIGUEL ANGEL FLORES VILLAMIL

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRÍA EN CIENCIAS

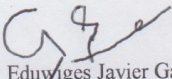
Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México
Octubre 2016

La presente tesis, titulada: **PLANTAS DE ZONAS SEMIÁRIDAS DEL ALTIPLANO CENTRO-NORTE DE MÉXICO CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ACEITE** realizada por el alumno(a) **MIGUEL ANGEL FLORES VILLAMIL**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito parcial para obtener el grado de:

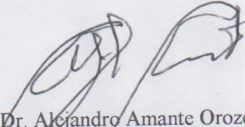
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

CONSEJO PARTICULAR

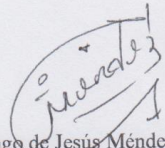
CONSEJERO:


Dr. Eduwiges Javier García Herrera
GRADO Y NOMBRE DEL PROFESOR

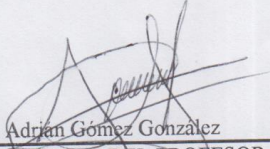
DIRECTOR DE TESIS:


Dr. Alejandro Amante Orozco
GRADO Y NOMBRE DEL PROFESOR

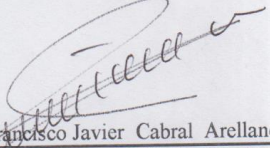
ASESOR:


Dr. Santiago de Jesús Méndez Gallegos
GRADO Y NOMBRE DEL PROFESOR

ASESOR:


Dr. Adrián Gómez González
GRADO Y NOMBRE DEL PROFESOR

ASESOR:


Dr. Francisco Javier Cabral Arellano
GRADO Y NOMBRE DEL PROFESOR

PLANTAS DE ZONAS SEMIÁRIDAS DEL ALTIPLANO CENTRO-NORTE DE MÉXICO CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ACEITE

Miguel Ángel Flores Villamil, MC.

Colegio de Postgraduados, 2016

RESUMEN

Actualmente se sufre una disminución permanente de las reservas mundiales de combustibles fósiles, estimándose, por ejemplo, que en alrededor de 30-35 años el petróleo se habrá agotado. Por otra parte, el uso de estos combustibles produce una considerable contaminación del ambiente, con lo cual se acelera el cambio climático. Por estas razones, el uso de energías renovables está siendo promovido a nivel mundial a través de las políticas gubernamentales de los diferentes países, como una alternativa clave para enfrentar esa problemática. Ante esta situación y con el objetivo de evaluar su posible utilización como fuente de bioenergía, se exploraron 19 plantas de zonas áridas, que no son comúnmente utilizadas como alimento y presentan resistencia a factores adversos edáfico-climáticos, para determinar su potencial productivo de aceite. Para ello se colectaron semillas, mediante muestreo por parcela, en tres estados de México. A las semillas de las especies consideradas se les determinó el contenido de aceite y se les caracterizó físico-químicamente. De las plantas estudiadas, *Agave* sp mostró el mayor rendimiento potencial de semilla con 24,305 kg ha⁻¹, sin embargo, tiene la desventaja de contar con un largo periodo de fructificación, además de que su contenido de aceite fue de los más bajos. Las semillas con mayores porcentajes de aceite correspondieron a las especies *Apodanthera undulata* (31.4), *Brassica* sp (30.3), *Cucurbita ficifolia* (34.1), *Cucurbita foetidissima* (33.9), *Jatropha dioca* (32.9) y *Proboscidea louisianica* (33.6). En cuanto a rendimiento de aceite, *Apodanthera undulata* mostró el mayor potencial con 1,315 kg ha⁻¹, el cual es comparable al de otros cultivos comercialmente utilizados. La variación en las características físico química de los aceites fue amplia, por lo que fue posible vislumbrar diferentes usos potenciales a los mismos, además del bioenergético.

Palabras clave: bioenergéticos, energías renovables, aceite vegetal, plantas del semidesierto.

PLANTS OF ARID ZONES NORTH HIGHLANDS CENTRAL MEXICO WITH POTENTIAL FOR OIL PRODUCTION

Flores Villamil Miguel Ángel, MC.

Colegio de Postgraduados, 2016

ABSTRACT

At current consumption rates it is estimated that global fossil fuel reserves will be exhausted within a period of 30 to 35 years. Furthermore, the use of these fossil fuels produces significant pollution of the atmosphere, accelerating climate change. For these reasons, the use of renewable energy is being promoted worldwide through government policies of different countries, as a key alternative to address this problem. Given this situation and in order to assess their potential use as a source of bioenergy, 19 plants of arid areas, that are not commonly used as food and are resistant to adverse edaphic-climatic factors, were explored to determine their potential for oil production. For this purpose, seeds were collected through sampling plots, in three states of Mexico. Oil content of the seeds was determined as well as its physico-chemical characterization. Of the plants studied, *Agave* sp showed the greatest potential for seed yield with 24,305 kg ha⁻¹, however, this plant has the disadvantage of having a long period of fructification, in addition to its low oil content. The seeds with higher percentages of oil corresponded to the species *Apodanthera undulata* (31.4), *Brassica* sp. (30.3), *Cucurbita ficifolia* (34.1), *Cucurbita foetidissima* (33.9), *Jatropha dioica* (32.9) and *Proboscidea louisianica* (33.6). As for oil yield, *Apodanthera undulata* showed the greatest potential with 1,315 kg ha⁻¹, which is comparable to other crops used commercially. The variation in the physicochemical characteristics of the oils was wide, so it was possible to see different potential uses for these oils, in addition to its use as bioenergetic.

Keywords: bioenergy, alternative energy, vegetable oil, desert plants

DEDICATORIA

A mi esposa Carmen Felicia Meza Rivera por su amor, comprensión y por estar siempre conmigo.

A mi hija Felicia Michelle Flores Meza por ser la motivación para salir adelante.

A mis padres Miguel Ángel Flores Flores y Juana Villamil Ibarra por su amor y apoyo incondicional.

A mis hermanos Erika Montserrat Flores Villamil y Christian Alexis Flores Villamil, esperando este logro los motive a seguirse preparando profesionalmente.

A mis suegros Sr. Gilberto Meza Cardona y Sra. María Del Carmen Rivera de Haro. Por todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

INSTITUCIONES

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada.

Al Colegio de Postgraduados *Campus* San Luis Potosí por abrirme de nueva cuenta las puertas para seguir creciendo en mi formación profesional.

A mi *Alma Mater* la Universidad Autónoma de Zacatecas y sus Unidades Académicas de Ciencias Biológicas, Ciencias Químicas y Física por recibirme en sus instalaciones para poder desarrollar parte del trabajo de laboratorio de esta investigación.

PERSONAS

A los integrantes de mi Consejo Particular por sus aportes, conocimiento, recomendaciones y amistad.

Al Maestro Salvador Rodríguez Nery por su oportuna asesoría para las pruebas de caracterización química de aceites.

A la Doctora Lucia Delgadillo por su asesoría en la parte de extracción de aceite y espectroscopia.

A la Maestra Clara Tovar por su colaboración en laboratorio.

A mis Amigos Isaac, Alejandra, Eddy, Mariana y Nallely que formamos la primera generación de la maestría y por compartir esta etapa de mi vida.

A toda la comunidad del Colegio de Postgraduados *Campus* San Luis Potosí. Doctores, administrativos, estudiantes y personal de apoyo.

A familiares y amigos que siempre estuvieron al pendiente de todo y que de alguna forma este logro también es de ellos.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 2 |
| 2.1 Consumo de Bioenergía en el mundo | 3 |
| 2.2 Bioenergía en México | 3 |
| 2.3 Cultivos energéticos | 5 |
| 2.4 Zonas áridas y semiáridas de México | 7 |
| 2.5 Plantas del semidesierto con potencial para producir aceite..... | 8 |
| 2.5.1 <i>Argemone mexicana</i> | 9 |
| 2.5.2 <i>Cucurbita foetidissima</i> | 10 |
| 2.5.3 <i>Apodanthera undulata</i> | 11 |
| 2.5.4 <i>Cucurbita ficifolia</i> | 12 |
| 2.5.5 <i>Datura inoxia</i> | 14 |
| 2.5.6 <i>Datura ferox</i> | 15 |
| 2.5.7 <i>Bidens odorata</i> | 16 |
| 2.5.8 <i>Eruca sativa</i> | 17 |
| 2.5.9 <i>Brassica</i> sp. | 18 |
| 2.5.10 <i>Proboscidea louisianica</i> | 19 |
| 2.5.11 <i>Helianthus annuus</i> | 20 |
| 2.5.12 <i>Leonotis nepetifolia</i> | 21 |
| 2.5.13 <i>Schinus molle</i> | 22 |
| 2.5.14 <i>Xanthium strumarium</i> | 23 |
| 2.5.15 <i>Larrea tridentata</i> | 24 |
| 2.5.16 <i>Jatropha dioica</i> | 26 |
| 2.5.17 <i>Acacia farnesiana</i> | 27 |
| 2.5.18 <i>Prosopis glandulosa</i> Torrey..... | 28 |
| 2.5.19 <i>Agave salmiana</i> | 30 |
| 2.6 Aceite vegetal | 31 |
| 2.7 Biodiesel..... | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.7.1 | Aceites vegetales utilizados para producir biodiesel..... | 35 |
| 2.7.2 | Aceites alternativos para producir biodiesel y otros usos | 36 |
| 3. | OBJETIVOS..... | 38 |
| 3.1 | Objetivo general..... | 38 |
| 3.1.1 | Objetivos específicos | 38 |
| 4. | HIPÓTESIS | 39 |
| 5. | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 40 |
| 5.1 | Área de estudio | 40 |
| 5.1.1 | Altiplano Centro-Norte de México | 40 |
| 5.1.2 | Geología | 41 |
| 5.1.3 | Clima | 41 |
| 5.1.4 | Vegetación..... | 41 |
| 5.1.5 | Economía..... | 42 |
| 5.2 | Selección de especies..... | 42 |
| 5.3 | Recolecta de semilla..... | 43 |
| 5.4 | Estimación de rendimientos de semilla | 45 |
| 5.5 | Caracterización física de las semillas | 46 |
| 5.5.1 | Tamaño..... | 46 |
| 5.5.2 | Peso | 47 |
| 5.6 | Extracción de aceite de las semillas..... | 47 |
| 5.7 | Caracterización físico-química del aceite | 50 |
| 5.7.1 | Índice de Refracción | 50 |
| 5.7.2 | Índice de saponificación | 51 |
| 5.7.3 | Índice de Acidez (Ácidos grasos libres) | 53 |
| 5.7.4 | Índice de peróxidos | 55 |
| 5.7.5 | Índice de yodo..... | 57 |
| 5.8 | Caracterización de la estructura química de aceite vegetal mediante espectrometría | 58 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 60 |
| 6.1 | Caracterización de las especies..... | 60 |
| 6.2 | Caracterización física de las semillas..... | 61 |

_Toc461528586

| | |
|---|----|
| 6.2.2 Peso | 62 |
| 6.3 Rendimiento de semilla y aceite | 63 |
| 6.4 Caracterización físico-química del aceite | 72 |
| 6.4.1 Índice de refracción (IR)..... | 73 |
| 6.4.2 Índice de saponificación | 74 |
| 6.4.3 Índice de acidez | 74 |
| 6.4.4 Índice de Yodo | 75 |
| 6.4.5 Índice de peróxidos | 76 |
| 6.5 Espectrometría FTIR..... | 76 |
| _Toc461528602 | |
| 7 CONCLUSIONES..... | 79 |
| 8 LITERATURA CITADA | 80 |

LISTA DE CUADROS

| Cuadro | Descripción | Página |
|------------|---|--------|
| Cuadro 1. | Clasificación de los bioenergéticos (Masera et al., 2011). | 5 |
| Cuadro 2. | Principales ácidos grasos (Eii, 2015). | 34 |
| Cuadro 3. | Localización de los sitios de colecta de las especies evaluadas. | 44 |
| Cuadro 4. | Características generales de las especies estudiadas. | 61 |
| Cuadro 5. | Características generales de las especies estudiadas. | 62 |
| Cuadro 6. | Peso promedio de semillas y número de semillas por kilogramo. | 63 |
| Cuadro 7. | Variables agroproductivas de las especies estudiadas. | 64 |
| Cuadro 8. | Producción potencial de aceite. | 66 |
| Cuadro 9. | Matriz de correlación de las variables de campo. | 70 |
| Cuadro 10. | Autovalores del Análisis de Componentes Principales. | 72 |
| Cuadro 11. | Autovectores del Análisis de Componentes Principales. | 72 |
| Cuadro 12. | Características físico-químicas de los aceites vegetales. | 73 |
| Cuadro 13. | Principales ácidos grasos presentes en los aceites de las especies estudiadas. | 78 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Descripción | Página |
|------------|--|--------|
| Figura 1. | Consumo de energía en México en 2008 (SENER, 2009). | 4 |
| Figura 2. | Distribución de las zonas áridas y semiáridas de México (UACH, 2011). | 8 |
| Figura 3. | Detalle de una planta con flores de <i>Argemone mexicana</i> . | 10 |
| Figura 4. | Desarrollo natural de <i>Cucurbita foetidissima</i> . | 11 |
| Figura 5. | Frutos y tallos de <i>Apodanthera undulata</i> . | 12 |
| Figura 6. | Ejemplar de <i>Cucurbita ficifolia</i> mostrando un fruto. | 13 |
| Figura 7. | Detalle de una planta de <i>Datura innoxia</i> . | 14 |
| Figura 8. | Frutos de <i>Datura ferox</i> . | 15 |
| Figura 9. | Plantas con flores de <i>Bidens odorata</i> . | 17 |
| Figura 10. | Vista de <i>Eruca sativa</i> establecida en surcos de frijol. | 18 |
| Figura 11. | Vista de flores y vainas de <i>Brassica</i> sp. | 19 |
| Figura 12. | Ejemplar de <i>Proboscidea louisianica</i> . | 20 |
| Figura 13. | Vista de las flores de <i>Helianthus annuus</i> . | 21 |
| Figura 14. | Inflorescencia de <i>Leonotis nepetifolia</i> . | 22 |
| Figura 15. | Racimos de frutos de <i>Schinus molle</i> . | 23 |
| Figura 16. | Vista de los frutos de <i>Xanthium strumarium</i> . | 24 |
| Figura 17. | Vista de un ejemplar de <i>Larrea tridentata</i> . | 26 |
| Figura 18. | Distribución en campo de <i>Jatropha dioica</i> . | 27 |
| Figura 19. | Vista de un ejemplar en fase de floración de <i>Acacia farnesiana</i> . | 28 |
| Figura 20. | Vista de un ejemplar de <i>Prosopis glandulosa</i> Torrey. | 29 |
| Figura 21. | Ejemplar de <i>Agave salmiana</i> . | 31 |
| Figura 22. | Estructura de un triglicérido (http://www.ehu.es/biomoleculas/lipidos). | 32 |
| Figura 23. | Representación de ácidos grasos saturados e insaturados (cis y trans) (Giascopini, 2008). | 34 |
| Figura 24. | Altiplano Centro-Norte de México. | 40 |
| Figura 25. | Parcela cuadrada de 1m x 1m. | 45 |
| Figura 26. | Material utilizado para medir las semillas. | 46 |
| Figura 27. | Balanza utilizada para pesar las semillas. | 47 |
| Figura 28. | Determinador de grasa y aceite SOXTEC SYSTEM HT 1043®. | 48 |
| Figura 29. | Refractómetro de Abee. | 51 |
| Figura 30. | Sistema para determinar el Índice de Saponificación. | 52 |
| Figura 31. | Titulación de la muestra para determinar el índice de saponificación. | 53 |
| Figura 32. | Titulación de la muestra para determinar el índice de acidez. | 54 |
| Figura 33. | Material utilizado en la determinación del índice de peróxidos. | 56 |
| Figura 34. | Equipo FTIR utilizado en este trabajo. | 59 |
| Figura 35. | Contenido de aceite en las semillas de las especies de plantas colectadas. | 67 |
| Figura 36. | Relación entre rendimiento potencial de semilla y de aceite | 69 |
| Figura 37. | Espectro de infrarrojo de los ácidos grasos utilizados. | 77 |

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se investigan diversas fuentes alternativas de energía, debido al creciente agotamiento del principal combustible fósil que es el petróleo y debido a los efectos contaminantes que éste y sus derivados generan al medio ambiente (Lafargue-Pérez *et al.*, 2012). Por lo anterior, se recurre cada vez más a utilizar energías alternas, como la energía solar, la eólica, la geotérmica, las pequeñas centrales hidráulicas y la oceánica (Estrada e Islas, 2010). Esto, también abre paso a la bioenergía que se obtiene de la biomasa (plantas) y sus componentes: hojas, tallos, ramas, desechos de la agricultura, entre otras fuentes, las cuales almacenan la energía en forma de carbohidratos o azúcares (Bioenergy Research Center, 2005). Estos materiales pueden producir energía y se tiene la ventaja de que la gran mayoría de estas plantas pueden ser cultivadas en forma regular, reproduciéndose de manera constante, debido a esta característica el uso de plantas se puede considerar como una fuente de energía renovable para utilizarse como bionergético (Ghosh y Preal, 2011). Así, la biomasa de las plantas puede utilizarse para producir biocombustibles en forma de sólida, gaseosa y líquida. Los cuales son utilizados principalmente en los sectores transporte, industrial, comercial y en el hogar (Ghosh y Preal, 2011).

Varios países han utilizado biomasa para producción de energía, entre los que destaca Estados Unidos, India y China con una producción de hasta 2500 petajoules, y entre los países que más bioenergía consumen son Brasil y Sudáfrica (FAO, 2008). Por otro lado, México a pesar de contar con una gran variedad de recursos naturales apenas empieza a incorporarse a la producción de bioenergía; ya que recientemente ha incorporado estas fuentes alternas en sus programas energéticos de mediano plazo. Sin embargo, es claro

En este sentido, en México existe una gran variedad de plantas utilizadas para producción de bioenergía, dentro de las cuales destacan para la fabricación de etanol, la caña de azúcar, maíz y sorgo; por otro lado, para la producción de biodiesel se encuentra la soya, girasol, colza, cacahuete y palma de aceite (Rodríguez y Zamarripa, 2013). Estas al ser plantas utilizadas para el consumo humano, no es viable utilizarlas ya que traería consecuencias en el incremento en el precio de los alimentos. Debido a esto es necesario buscar especies de plantas alternativas que cuenten con potencial bioenergético, con las que se puedan producir biocombustibles sin que éstos afecten el consumo humano (Rodríguez y Zamarripa, 2013). En el caso de las zonas áridas las plantas más estudiadas son: higuera, nopal y maguey. Este último altamente utilizado para la elaboración de tequila y mezcal (Escamilla-Treviño, 2012). En este contexto, en las zonas áridas y semiáridas del país, se considera existen especies con potencial para su uso como bioenergéticos, que no han sido exploradas, ni determinado de manera específica y a detalle su uso, sobre todo en lo que respecta a las características físico-químicas de las semillas, que pueden tener un aporte importante en la producción de aceite para producción de biodiesel y otros usos de importancia industrial.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La bioenergía se define como la energía obtenida de la materia orgánica de origen biológico, en ella la biomasa es el material más importante la cual es producida por las plantas al sintetizar, por medio de la fotosíntesis, luz, agua y CO₂. En este proceso la energía solar queda atrapada en enlaces químicos, y ésta se puede liberar en forma de biocombustibles por los procesos de digestión, descomposición, hidrólisis y fermentación (Aguillón *et al.*, 2010). La obtención de biocombustibles es viable ya que

se pueden obtener de diversos materiales como madera, frutos, granos o fibras (Aguillón *et al.*, 2010; Prehn y Cumana, 2010).

2.1 Consumo de Bioenergía en el mundo

Ante el incremento en la población será inevitable la demanda de más energía. Para el año 2035 IEA (2009) estima que la demanda de energía aumentará 47%, y de no incrementar el uso de energías alternas (dentro de estas la bioenergía), los combustibles fósiles representarán 71% de la energía utilizada. Lo anterior originaría un incremento de 41% en las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático y calentamiento global.

Ante este escenario, la bioenergía podría tener un gran aporte para satisfacer la demanda de energía generando menor cantidad de emisiones. El potencial de participación de la bioenergía en el sistema energético mundial podría estar entre 17 y 36% del consumo de energía primaria (Shubert, 2009).

2.2 Bioenergía en México

En el 2008 en México el 85% del consumo de energía provino del petróleo y del gas natural. Para el caso de las energías renovables su consumo fue del 10% del total, y de ese porcentaje el 5% fue para la bioenergía (Figura 1) SENER (2009).

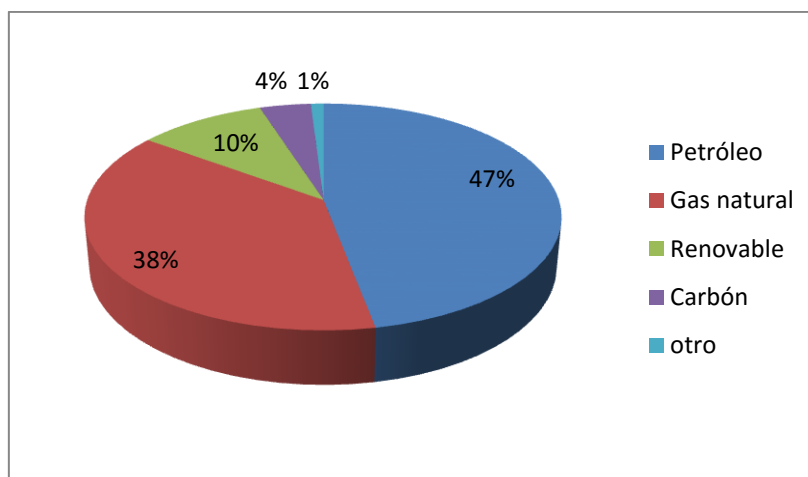


Figura 1. Consumo de energía en México en 2008 (SENER, 2009).

Esto abre paso a México, para que al ser uno de los países mega diversos, por contar con alrededor de 18,000 a 30,000 especies vegetales (CONABIO, 2015a), pueda utilizar sus recursos biomásicos para producir biocombustibles sólidos, líquidos y biogás. (Maserá *et al.*, 2011). El Gobierno Federal a través de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, comenzó a promover la elaboración de biocombustibles sin descuidar la seguridad alimentaria y el aprovechamiento eficiente de la materia prima derivada de las actividades agrícolas, forestales y pecuarias; así como aquella derivada de algas y procesos enzimáticos y biotecnológicos (DOF, 2008). En la elaboración de biocombustibles debe tenerse especial cuidado con el uso eficiente del agua y suelo, así como en la conservación de la biodiversidad del lugar. También establece que es necesario identificar especies vegetales que muestren potencial para producir biodiesel y etanol, con lo cual se evitará el uso de cultivos básicos para la alimentación humana en la industria de los biocombustibles, tal como se estipula en la Ley (DOF, 2008).

Los biocombustibles pueden utilizarse procesados o no procesados. Una de las ventajas de estos es que existen en los tres estados de la materia, según Maserá *et al.* (2011), como:

- Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): que pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirolisis, para producir calor y electricidad.
- Biocombustibles líquidos (bioetanol y biodiesel): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o aceite vegetal usado.

- Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos principalmente de los residuos municipales y estiércol.

Este mismo autor y sus colaboradores, consideran que de acuerdo a la tecnología necesaria para producir estos combustibles se clasifican en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de los bioenergéticos (Masera et al., 2011).

| | Sólido | Líquido | Gaseoso |
|------------------|---------------------------------------|---|--------------|
| 1era. Generación | Leña, carbón vegetal, pellets, bagazo | Bioetanol, biodiesel | Biogás |
| 2da. Generación | Biochar, torrefactos, torpellets | Etanol celulósico, syndiesel, aceite de pirolisis | |
| 3era. Generación | | Diésel de algas | Biohidrógeno |

2.3 Cultivos energéticos

Los combustibles a partir de biomasa cada vez están tomando más importancia como fuentes de energía; además la bioenergía es considerada como una fuente de energía renovable con un potencial que aún es inexplorado (Díaz-Ramírez *et al.*, 2013).

Da Silva *et al.* (2013), mencionan que en los últimos años ante la problemática existente, como la carencia, incremento en los precios y los altos grados de emisiones contaminantes (CO₂, HC, NO₂, SO₂, etc.) derivados de los combustibles fósiles, causantes de enfermedades respiratorias y en la piel de las personas, así como el cambio

climático, ha provocado la búsqueda de nuevas fuentes de energía a partir de la biomasa. Así, ante la gran demanda energética, se ha obligado a considerar nuevas estrategias como centrar la atención en los cultivos energéticos, que incluyen árboles forestales de ciclo corto, hierbas perennes y herbáceas, los cuales pueden dar como resultado nuevas fuentes de energía como gas natural y biodiesel (Díaz-Ramírez *et al.*, 2013).

Un ‘cultivo energético’ es aquel que puede proporcionar una gran cantidad de biomasa, la cual posteriormente será convertida en una energía alterna. Estos cultivos deben tener buenos rendimientos, balance energético positivo y poca demanda de insumos. Estos cultivos se pueden agrupar según el producto que se desee obtener como: electricidad, aceites para biodiesel o alcohol etílico (Fuentes, 2006).

Sin embargo, no son muchos los cultivos que se puedan usar para este fin, ya que existen limitantes para producir cultivos, para uso exclusivo como bioenergéticos. Por lo cual es necesario explorar en la gran diversidad de plantas que se tienen en los diferentes ecosistemas que existen en un país mega diverso como es México, donde las especies más utilizadas para producción de bioenergéticos son la higuera (*Ricinus communis*) y el piñón (*Jatropha curcas*); sin embargo éstas presentan un balance energético cuestionable (Montiel-Montoya, 2010). Un ejemplo de ello es *J. curcas* el cual se promueve como árbol milagroso, y del que aún se desconocen aspectos esenciales de su comportamiento genético, aspectos agronómicos, calidad de semilla y rendimiento de aceite cuando se cultivan bajo diferentes condiciones (Montiel-Montoya, 2010). Asimismo, *R. communis*, bajo las actuales condiciones de producción es medianamente competitiva y rentable, en relación a otros cultivos como maíz y frijol, por lo que se requieren mejoras tecnológicas al sistema de producción que permitan

incrementar su productividad e incrementar el precio de venta de la materia prima superior a los \$ 5.00 y, pueda de esta manera ser atractivo para los productores (Rodríguez y Zamarripa, 2013).

Uno de los ecosistemas con mayor extensión en México son las zonas áridas y semiáridas, cuyo potencial para la producción de plantas para uso bionergético no ha sido explorado del todo.

2.4 Zonas áridas y semiáridas de México

En el país las tierras áridas se encuentran ubicadas al norte, principalmente en los Desiertos Sonorense y Chihuahuense, este último es el más extenso, diverso y posiblemente el menos investigado (CONANP, 2014), en la región central originada por las sierras madre oriental y occidental (Figura 2).

Dichas zonas ocupan más de la mitad del territorio mexicano con 101.5 millones de hectáreas. De esta superficie, las zonas áridas representan 15.7%, las semiáridas 58% y el 26.3% restante corresponde a las zonas subhúmedas secas (UACH, 2011).

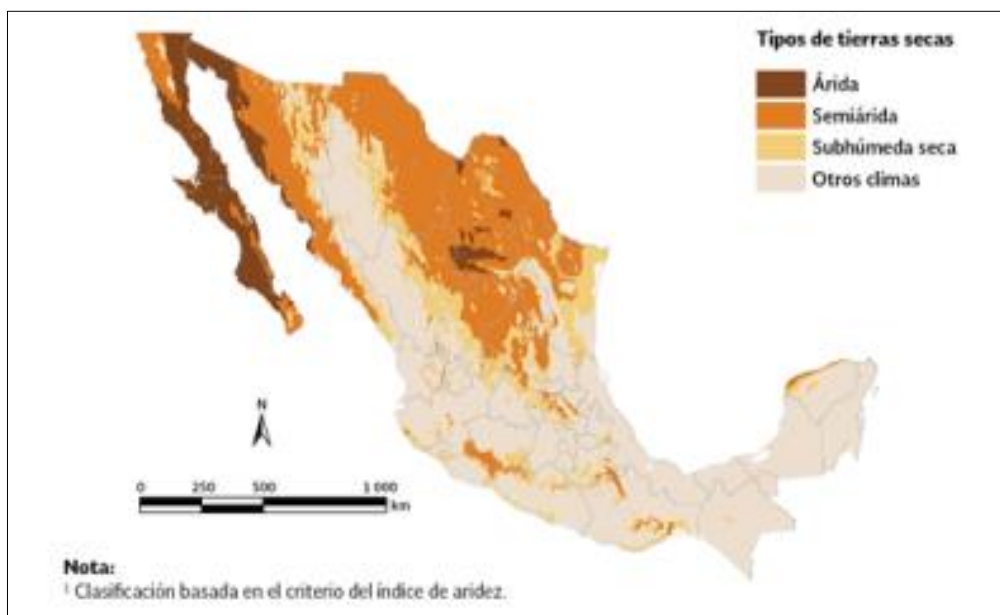


Figura 2. Distribución de las zonas áridas y semiáridas de México (UACH, 2011).

2.5 Plantas del semidesierto con potencial para producir aceite

México como país mega diverso, cuenta con características muy particulares que propician esa diversidad, como son: posición geográfica, diversidad de paisajes, aislamiento, tamaño e historia evolutiva. Estas características le permiten contar con una gran cantidad y diversidad de plantas y animales que representa alrededor del 70% de la diversidad mundial de especies (CONABIO, 2015b).

De igual forma, en las zonas áridas y semiáridas existe una gran variedad de vegetación característica de este tipo de hábitat, entre estos se encuentran diversos tipos de matorral, pastizal natural, vegetación de desiertos arenosos y la vegetación halófila (SEMARNAT, 2012). Estas regiones cuentan con una gran cantidad de endemismos, en especial de grupos como las cactáceas, compuestas y pastos (Flores, 2011). Las actividades antropogénicas como la ganadería, agricultura y extracción de numerosas plantas causan un gran impacto en este tipo de hábitat (SEMARNAT, 2012).

Sin embargo, estas zonas poseen una gran cantidad de recursos naturales que podrían explotarse de una manera sustentable para la industria, la medicina y los biocombustibles (Flores, 2011) y así impulsar la economía y mejorar la calidad de vida de las personas de las zonas áridas y semiáridas del país.

Dentro de las especies vegetales con potencial para utilizarse de manera sustentable, para la extracción de aceites para la industria y la producción de biocombustibles están las siguientes: higuerrilla, colza y piñón mexicano, entre otros. De las cuales ya se tiene

información respecto a su uso como bioenergéticos; sin embargo, aún falta explorar una gran parte de las especies endémicas de estas zonas, actividad que es objetivo de este estudio.

Como se mencionó, en México por la diversidad de plantas que posee, es posible encontrar especies vegetales endémicas e introducidas que pueden utilizarse en la producción de aceite para diferentes usos (industria y bioenergéticos). Muchas de estas especies son ruderales, arvenses y no son muy utilizadas debido al desconocimiento de los componentes químicos de sus órganos (Reveles *et al.*, 2010). En ese sentido, a continuación se describen plantas del semidesierto que pudieran presentar potencial de producción de aceite, las cuales fueron consideradas para su evaluación en el presente estudio.

2.5.1 *Argemone mexicana*

También conocida como “chicalote”. *A. mexicana* es una planta herbácea de ciclo anual, que crece por lo regular en latitudes mayores a 1500 msnm (Ariharan *et al.*, 2014). Esta planta cuenta con hojas sésiles, alternas, moteadas, de color verde-azuloso, lanceoladas o elípticas y transversalmente lobuladas, los lóbulos están partidos solo hasta la mitad; cada lóbulo tiene una espina en el ápice. Las flores tienen forma de botón, son flores solitarias situadas sobre 2-3 brácteas muy similares a las hojas, posee 3 sépalos con espinas en el ápice y 6 pétalos amarillos (CONABIO, 2015a). El tiempo de floración es de febrero a abril y se propaga mediante semillas pequeñas, redondas y negras. Esta planta se puede encontrar principalmente en suelos perturbados (Villegas *et al.*, 2000). Se ha utilizado con fines medicinales diversos, ya que la gente hace té con las flores y hojas para curar enfermedades respiratorias, esa misma infusión se aplica en la piel como medicina contra el salpullido, y toda la planta, incluyendo hojas y semillas,

contiene alcaloides similares a los del opio (*Papaver somniferum*) (Singh, 2010). En la Figura 3 se muestra una imagen de *A. mexicana*.

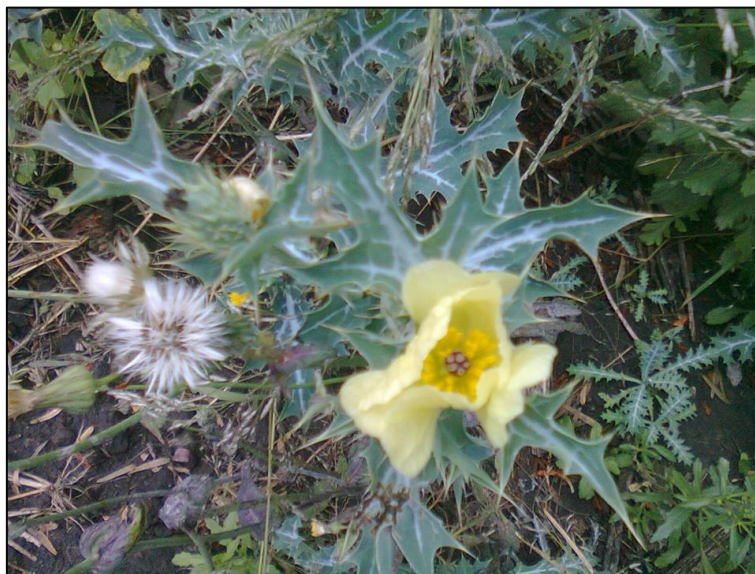


Figura 3. Detalle de una planta con flores de *Argemone mexicana*.

2.5.2 Cucurbita foetidissima

Popularmente conocida como “calabacilla loca”. *C. foetidissima* es una planta de ciclo perenne que crece tendida en el suelo y cuyos tallos pueden crecer alrededor de 6 m, cuenta con hojas correosas, triangular-ovadas, más largas que anchas, de hasta 30 cm de largo; los zarcillos robustos, con la parte basal no ramificada de más de 2 cm de largo (CONABIO, 2015a).

Sus frutos son globosos, de hasta 8 cm de diámetro, de color verde oscuro con franjas de color crema o blanco, volviéndose amarillentas al madurar, la pulpa es fibrosa, la cual florece y fructifica de abril a octubre (Rzedowski y Rzedowski, 2001). Esta planta es nativa de México y se distribuye hasta el sur de Estados Unidos, habitando los

lugares de climas secos con altitudes mayores a 1900 msnm, y donde hay suelos perturbados, principalmente. En la Figura 4 se muestra un ejemplar de *C. foetidissima*.



Figura 4. Desarrollo natural de *Cucúrbita foetidissima*.

2.5.3 *Apodanthera undulata*

Es una planta de la familia de las cucurbitáceas comúnmente conocida como “melón hediondo”, que se distribuye del norte de México hacia el sur de Estados Unidos. Es de ciclo perenne crece en forma rastrera y cuenta con ramas que crecen en forma circular de entre 1 a 2 m de largo, donde crecen los frutos que miden de 7-10 cm de alto y 4-6 cm de ancho de color verde, cada fruto puede tener alrededor de 100 semillas las cuales contienen 28% proteína cruda y 31% de aceite (Vasconcellos *et al.*, 1981). Esta planta crece, principalmente, en lugares secos donde la altitud es mayor a 1800 msnm y en condiciones de poca humedad y alta radiación solar, principalmente en sitios como parcelas y orillas de caminos (CONABIO, 2015a). De esta planta se pueden aprovechar las hojas como forraje, las semillas por su aceite y para alimentación humana, así como la pulpa como jabón. Una planta de *A. undulata* se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Frutos y tallos de *Apodanthera undulata*.

2.5.4 *Cucurbita ficifolia*

Cucurbita ficifolia o “chilacayota” (Figura 6) es una planta de hábito rastrero, principalmente; cuenta con un tallo vellosos que puede alcanzar hasta 5 m y arroja zarcillos que la planta utiliza para enredarse en la vegetación adyacente (CONABIO, 2015a). Se puede encontrar a orillas de parcelas y caminos, en lugares con una altitud entre 1000 y 3000 msnm. Es una planta perenne en su estado silvestre en lugares tropicales, y en regiones secas se conoce más cultivada y se maneja como anual (Stevens *et al.*, 2001). Sus hojas son pecioladas y de gran tamaño, color verde. Las flores monoicas son solitarias, pentámeras y axilares; grandes y con pétalos carnosos, con una corola que mide alrededor de 75 mm de diámetro y son de color amarillo o naranja (CONABIO, 2015a). Las flores masculinas tienen un cáliz en forma de campana y son largas y pediceladas. Las femeninas presentan un ovario, que les permite trepar o sujetarse a otras plantas, enroscándose. La polinización en esta planta es mediante insectos, especialmente abejas del género *Peponapis*, y por algunos coleópteros. El fruto es globoso y de forma ovoide; puede alcanzar hasta 5 kg de peso. La epidermis, verde o blanquecina. Puede contener hasta 400 semillas aplanadas y oscuras, parduzco o negro según las

variedades. Una planta en condiciones óptimas puede dar hasta 50 frutos (CONABIO, 2015a).

El uso principal de esta cucúrbita es comestible ya que con la pulpa se hacen dulces, las semillas se consumen como botana y las flores se consumen como verdura. Tiene propiedades para la industria farmacéutica, ya que contiene en sus semillas propiedades antiparasitarias y otros usos potenciales por su buen contenido de aceite. Se conoce poco sobre su origen, aunque todo apunta que es originaria de México, en la actualidad se encuentra mayormente cultivada en una gran parte de América desde Argentina hasta el sur de Estados Unidos (Stevens *et al.*, 2001).



Figura 6. Ejemplar de *Cucurbita ficifolia* mostrando un fruto.

2.5.5 *Datura innoxia*

Datura innoxia o “toloache” es una herbácea de ciclo anual que puede medir hasta 1.5 m de alto, cuenta con hojas de hasta 25 cm con forma ovado-elípticas. Las flores son grandes y vistosas con forma de embudo color blanco y se les conoce como “trompeta de Ángel”. El fruto de *D. innoxia* es de forma globosa y mide alrededor de 4-6 cm de diámetro y está cubierto por numerosas espinas, en cuyo interior se producen gran cantidad de semillas (CONABIO, 2015a). Esta planta se puede encontrar a orillas de caminos, arroyos y lotes baldíos y a latitudes de más de 500 msnm.

Estas plantas son conocidas desde tiempos inmemorables por sus efectos medicinales o tóxicos. Los mexicas lo llamaban *tolohuaxíhuatl* y *tlápatl*. Lo usaban en diferentes rituales ya que provocaba alucinaciones, en la actualidad muchos curanderos lo utilizan para el “mal de amores”. Sin embargo muchas personas resultan envenenadas por la alta toxicidad de esta planta ya que contiene una cantidad elevada de alcaloides, siendo la escopolamina la que se encuentra en mayor cantidad (<http://www.mind-surf.net/drogas/toloache.htm>). Una planta de *D. innoxia* utilizada en el presente estudio se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Detalle de una planta de *Datura innoxia*.

2.5.6 *Datura ferox*

D. ferox (Figura 8) es una planta perteneciente al grupo de los “toloaches” conocida como “cardo cuco” o “chamico”. Es una planta de ciclo anual que puede llegar a medir 1.5 m de altura, las hojas son laminas ovadas que miden de 2.5 a 20 cm de largo por 1 a 18 cm de ancho aproximadamente, cuentan con un ápice agudo y margen sinuado y son de color verde oscuro (Rzedowski y Rzedowski, 2001). Las flores están sobre pedúnculos de 5 a 10 mm de largo, el cáliz es tubular, la corola es blanca o violeta de 6 a 10 cm de largo, de ahí otro de los nombres comunes que es “trompeta de ángel”. Frutos en forma de cápsula ovoide de alrededor de 4 cm de largo por 2.5 cm de diámetro, dehiscente por cuatro valvas, cubierto por espinas largas y agudas de hasta 2.5 cm de largo. Cuenta con numerosas semillas reniformes aplanadas de 3-4 mm de largo, negras y finamente reticuladas (Espinosa y Sarukhán, 1997).



Figura 8. Frutos de *Datura ferox*.

2.5.7 *Bidens odorata*

Conocida comúnmente como “aceitilla”, es una planta herbácea de ciclo anual la cual puede alcanzar alrededor de 1 m de altura. Cuenta con un tallo cuadrangular ramificado con tonalidad verde y morada. Las hojas tienen peciolo de hasta 10 cm de largo. Las flores son blancas con disco amarillo y crecen agrupadas en cabezuelas en los extremos de las ramas. Sus semillas son aquenios de 10-15 mm de largo, color negro o café (SAGARPA, 2005). *B. odorata* comúnmente se encuentra en altitudes de 2000 msnm en las cadenas montañosas de México, donde hay suelos perturbados ya sea a orillas de caminos o en parcelas de cultivo asociada sobre todo con maíz, teniendo en estas últimas una densidad mayor que la del cultivo en cuestión llegando a ser considerada como maleza (Vibrans, 1995).

Dentro de los usos que se le dan a la “aceitilla” está el de forraje y medicinalmente se utiliza para hacer lavados para el tratamiento de flujos vaginales (CONABIO, 2015a). Con las hojas se hace una infusión para tratar anginas, amigdalitis, aftas bucales, úlceras gastroduodenales y también se usa como cataplasma. Las semillas tostadas se utilizan para heridas leves externas. Las flores, hojas y raíces se utilizan contra la enfermedad o dolor en los dientes. Las flores tienen un uso antidiarreico. La raíz es utilizada en infusión para el dolor de oídos. También se utiliza la planta entera como antídoto en casos de envenenamiento (Zagal, 2012). Un ejemplar de *B. odorata* se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Plantas con flores de *Bidens odorata*.

2.5.8 *Eruca sativa*

Conocida comúnmente como “saramago”. *E. sativa* (Figura 10) es una planta de ciclo anual la cual puede alcanzar hasta un metro de altura; generalmente, cuenta con un tallo ramificado desde la base, las hojas inferiores son pinadas de hasta 20 cm de largo, las superiores son más pequeñas y divididas. La inflorescencia se presenta en racimos con flores de 1.5 a 3 mm, estas son de color blanco o crema con venación morada o café. Los frutos son silicuas alargadas con un pico aplanado en un extremo donde se producen numerosas semillas ovoides de 1.5 mm de color amarillo-café parecido al óxido de los metales (CONABIO 2015a). Esta planta se encuentra principalmente en altitudes mayores a 1500 msnm, en orillas de caminos y en diversos cultivos como maíz, frijol, alfalfa, nopales, siendo considerada una maleza (Villaseñor y Espinosa, 1998). *E. sativa* se usa como condimento en ensaladas, por su sabor un poco amargo y ser muy baja en calorías, se dice que las hojas contienen vitaminas P y K las cuales

ayudan a la función hepática del cuerpo (<http://buenasiembra.blogspot.mx/2011/05/la-rucula-eruca-sativa-sorprendentes.html>).



Figura 10. Vista de *Eruca sativa* establecida en surcos de frijol.

2.5.9 *Brassica* sp.

Brassica sp. o “mostacilla” (Figura 11) es una herbácea de ciclo anual o bianual que puede medir alrededor de 50 cm de altura, tiene un tallo de forma cilíndrica con pelos blancos en la base, las hojas son lanceoladas y miden hasta 15 cm de largo. La inflorescencia se presenta en racimos y la flor tiene cuatro sépalos de 4-5 mm de largo y cuatro pétalos de 6-8 mm de largo de color amarillo. El fruto es una silicua de 1.5 mm de diámetro y 5-10 cm de largo, la cual contiene numerosas semillas pequeñas de alrededor de 1-1.5 mm de color oscuro (Rzedowski y Rzedowski, 2001). Esta planta crece en climas templados o áridos arriba de los 1500 msnm, principalmente en suelos perturbados o en cultivos, llegando a considerarse una maleza (CONABIO, 2015a). Se dice que *Brassica* sp. es comestible cuando la planta es joven; sin embargo al madurar puede ser tóxica si se ingiere en grandes cantidades, en algunos países de medio oriente

se utilizan las semillas para preparar una infusión de sabor dulce la cual se dice purifica el hígado (CONABIO, 2015a).



Figura 11. Vista de flores y vainas de *Brassica* sp.

2.5.10 *Proboscidea louisianica*

P. louisianica o “toritos” (Figura 12) es una planta de ciclo anual que crece en suelos perturbados, y que a diferencia de otras especies esta no cuenta con grandes densidades por lo que no se le considera una maleza seria (CONABIO, 2015a). Es una planta herbácea que crece alrededor de 60 cm de alto, con hojas lobuladas de hasta 15 cm, las cuales están cubiertas de una sustancia pegajosa donde se adhiere tierra o insectos pequeños, las flores son de forma tubular color blanco en la base y morado en los pétalos. El fruto es una vaina carnosa color verde que puede medir hasta 10 cm de largo que al secarse se divide en dos garras, al momento que se divide la vaina libera las numerosas semillas de color negro de alrededor de 10 mm (www.wildflower.org/plants/result.php?id_plant=PRLO). Dentro de los usos que tiene *P. louisianica* es como alimento ya que las semillas son comestibles, también se usa de

manera ornamental y las vainas secas se utilizan para hacer artesanías (CONABIO, 2015a).



Figura 12. Ejemplar de *Proboscidea louisianica*.

2.5.11 *Helianthus annuus*

Las plantas del género *Helianthus* sp. (Figura 13) son conocidos como “girasol”, y son plantas de ciclo anual que crecen en praderas y en lugares con suelos perturbados como orillas de caminos y campos de cultivo que pueden llegar a medir hasta 3 m de altura (<http://www.pfaf.org/user/plant.aspx?LatinName=Helianthus+annuus>). Presenta un tallo erecto y ramificado, las hojas con pecíolos de hasta 20 cm y lámina lanceolada. Flores de 5-40 cm de ancho, capítulos similares a una sola flor rodeados por brácteas involucrales. Flósculos del disco de color amarronado, tubulares, pequeños; cinco estambres, gineceo formado por 2 carpelos unidos. Brácteas involucrales en 2 filas, frondosas, ovaladas, cónicas. Capítulos generalmente solitarios (http://plants.usda.gov/plantguide/pdf/cs_hean3.pdf). Los usos de *H. annuus* son diversos, según Moerman (1986) las hojas de esta planta se usan como infusión para tratar los riñones, para dolores de pecho y problemas pulmonares. Esta planta también

se utilizaba en diversas ceremonias, donde se usaba el aceite de las semillas para lubricar o pintar la cara y cuerpo. También se usa de manera ornamental y en algunas especies las semillas son comestibles (CONABIO, 2015a).



Figura 13. Vista de las flores de *Helianthus annuus*.

2.5.12 *Leonotis nepetifolia*

L. nepetifolia o “jara” (Figura 14), es una planta de origen Africano de ciclo anual que puede llegar a medir hasta 3 m de altura y se encuentra comúnmente en orillas de caminos. Cuenta con un tallo simple desde la base, tiene hojas sobre peciolo de hasta 10 cm, limbo ovado o lanceolado, ápice obtuso y borde lobulado. La inflorescencia son verticilos globosos de 4-6 cm de diámetro que se encuentran a lo largo del eje principal. Flores con corola de 1.5 a 4 cm de largo color naranja de aspecto aterciopelado, las semillas son mericarpios de 3 mm de largo (Rzedowski y Rzedowski, 2001). Dentro de los usos que tiene *L. nepetifolia* son como ornamental y medicinal, utilizándose como tónico estimulante, diurético, febrífugo, sudorífico, carminativo y antiespasmódico, así como en hemorragias uterinas, bronquitis crónica y asma. En sus hojas, se ha detectado actividad antibacteriana. Se dice que es alucinógena o tóxica ya que esta planta produce leonurina, entre otros alcaloides, responsables de sus efectos psicoactivos (Rzedowski y Rzedowski, 2001).



Figura 14. Inflorescencia de *Leonotis nepetifolia*.

2.5.13 *Schinus molle*

S. molle o “pirúl” es un árbol perenne que puede llegar a medir hasta 15 m de alto, se puede encontrar en altitudes de 2200 a 2800 msnm, en pastizales, orillas de caminos y/o arroyos. Tiene un tronco muy robusto y ramificado, en las ramas se encuentran las hojas pinnadas con folíolos de forma lanceolada de 2.5 a 6 cm regularmente, tiene flores con simetría radial de color blanco o amarillo. El fruto se da en forma de racimos y tiene forma de drupa, pequeña, carnosa. Durante su desarrollo, seco en la madurez, globoso, color rojo, brillante, de alrededor de 5 mm de diámetro, glabro, con una sola semilla (Rzedowski y Rzedowski, 1999).

Se utiliza como árbol de ornato, los frutos se emplean también como alimento para animales. En la parte medicinal, se utiliza en padecimientos genito-urinarios, la emulsión de la goma se emplea para curar enfermedades de los ojos como cataratas y manchas en la córnea, y la resina masticada ayuda a fortalecer las encías (Sánchez, 1969). Por su parte, Ibrahim y Al-Nacer (2014) analizaron el extracto de aceite de los

frutos de *S. molle* y señalan que se puede utilizar como un fungicida natural y amigable con el medioambiente. La Figura 15 muestra un ejemplar de *S. molle*.



Figura 15. Racimos de frutos de *Schinus molle*.

2.5.14 *Xanthium strumarium*

X. strumarium o ‘cadillo’ (Figura 16), es una planta anual que puede llegar a medir más de 1 m de altura, por lo regular se encuentra a latitudes mayores a 1500 msnm y florece de julio a septiembre, se encuentra principalmente como maleza de cultivos (CONABIO, 2015a).

Tiene un tallo áspero casi sin pelos que se ramifica, hojas sobre pecíolos de hasta 15 cm con láminas ovadas, flores masculinas y femeninas, en la madurez crece un fruto ovoide espinoso de 1-4 cm de largo, con un par de picos en un extremo, dentro del involucre se encuentran dos semillas en forma de aquenios alargados color café de 1.5 cm (Rzedowski y Rzedowski, 2001).

En muchos lugares la gente usa *X. strumarium* como diurético; las partes útiles de la planta son las raíces, las hojas y frutos, y por lo general se administran por vía oral en forma de droga seca y extracto fluido. Se le registran algunos efectos tóxicos cuando la

planta se encuentra en estado muy joven en humanos y ganado; el ovino es posiblemente el más afectado ya que las sustancias de esta planta reducen la longitud de las fibras de la lana (Jiménez *et al.*, 1999; CONANBIO, 2015a).



Figura 16. Vista de los frutos de *Xanthium strumarium*.

2.5.15 *Larrea tridentata*

L. tridentata o “gobernadora” (Figura 17), es un arbusto perenne que puede medir de 1 a 3 m de altura. Es muy común en los desiertos de norte de México en altitudes mayores a 1500 msnm. El nombre lo obtiene debido a su habilidad para inhibir el desarrollo de otras plantas a su alrededor gracias a su olor característico de eresota y de ese modo obtener más agua (CONABIO, 2015a). Cuenta con hojas formadas por dos folíolos unidos en la base con forma ovada, que miden de 4-15 mm de largo y de 3-8 mm de ancho. Tiene flores solitarias de 2.5 cm de diámetro, sépalos elípticos de 6 mm de largo por 4 mm de ancho, pubescentes, caedizos; pétalos de color amarillo, oblongos a lanceolados de 1 cm de largo por 3 a 5 mm de ancho, caedizos. Fruto subgloboso a obovoide, de 7 mm de largo, coriáceo, con pelos blancos, sedosos, que se vuelven café-

rojizos con el tiempo, 5 mericarpios con una semilla cada uno. Semillas café a negras, algo curvadas, de 2 a 4 mm de largo (Correll y Johnston, 1970; CONABIO, 2015a).

L. tridentata tiene varios usos registrados, por ejemplo la hoja se utiliza como adhesivo y la flor se usa como condimento. Las hojas se usan como forraje por su alto contenido de proteínas. También es empleada en la elaboración de grasas para el calzado, aceites, lubricantes y barnices como desincrustante de materias salinas en calderas. Las resinas muestran actividad fungicida, como insecticida contra el gorgojo pardo del frijol (*Acanthoscelides obtectus*) y el barrenador mayor de los granos (*Prostephanus truncatus*). Se le ha encontrado un uso medicinal para combatir afecciones de las vías urinarias como los cálculos renales y para otros malestares como dolor de riñón e inflamación de vejiga. La misma infusión es usada en baños para hemorroides, fiebre, paludismo, granos, golpes, buena cicatrización y reumatismo (CONABIO, 2015a).

En las hojas se ha aislado una resina que contiene una gran cantidad de ácido norhidroguaiarético usado como antioxidante. También se han identificado flavonoides, aceites esenciales y alcaloides halogénicos (www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/monografia.php?l=3&t=Larrea%20tridentata&id=7544).



Figura 17. Vista de un ejemplar de *Larrea tridentata*.

2.5.16 *Jatropha dioica*

J. dioica conocida como “sangre de grado” (Figura 18), es una planta perenne que habita en zonas secas y suelos pedregosos o perturbados, aproximadamente a latitudes de 1400-2100 msnm, y es encontrada comúnmente en ecosistemas de matorral xerófilo (López-Ibarra y Mendoza-Moreno, 2000).

Esta planta es leñosa y los tallos pueden llegar a medir poco más de 50 cm de alto para dar la apariencia de arbustos, son carnosos y poco ramificados. Las hojas son deciduas, crecen en la época de lluvias y se agrupan en fascículos, son obovadas, siendo más anchas hacia la zona del ápice y su borde es entero o lobulado. Cuenta con flores masculinas y femeninas en plantas separadas que se desarrollan a un costado de las hojas, son pequeñas y agrupadas en cimas o fascículos, su corola es de blanquecina a rosada. La época de floración es durante los meses de abril a mayo, principalmente; el fruto es esférico de 1.5 cm de diámetro y contiene una semilla color café de 1 cm de diámetro (Martínez *et al.*, 2014).

Dentro de los usos que se le dan principalmente está el medicinal, para tratar hemorroides, úlcera péptica, gastritis, asma, caída del cabello, manchas en la piel, acné, sangrado de encías y dolor de dientes, entre otras (Martínez *et al.*, 2014).



Figura 18. Distribución en campo de *Jatropha dioica*.

2.5.17 *Acacia farnesiana*

A. farnesiana o “huizache”, es una planta perenne que se extiende desde el sur de Estados Unidos, pasando por México y Centroamérica. Comúnmente se le encuentra en las orillas de caminos, de arroyos, de parcelas abandonadas, de terrenos con disturbio, en terrenos sucesionales, así como en sitios ruderales (<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/874Acacia%20farnesiana.pdf>).

Se encuentra donde predominan climas cálidos (Aw) y semicálidos A(C), en regiones que tienen desde 300 mm de precipitación anual y temperaturas que varían de 5 a 30 °C. Prospera en una gran variedad de suelos desde muy arcillosos hasta muy arenosos o con poca materia orgánica (González *et al.*, 2102). Esta planta, que dependiendo de las condiciones, puede tener forma arbustiva espinosa o árbol pequeño que puede medir de 1 a 2 m de altura (Figura 19); la forma arbórea, de 3 a 10 m, cuenta con un diámetro a la

altura del pecho (DAP) de hasta 40 cm. Las hojas son folíolos pequeños y numerosos con 2 a 7 pares de folíolos primarios opuestos y 10 a 25 pares de folíolos secundarios (<http://www.uaq.mx/FCN/naturaleza/Acacia%20farnesiana.php>). Tiene tronco corto y delgado o ramificado desde la base con numerosos tallos. Las flores son cabezuelas de color amarillo, originadas en las axilas de las espinas, solitarias o en grupos de 2 a 3, de 5 mm de largo; cáliz verde, campanulado, papiráceo de 1.8 mm de largo; corola amarillenta o verdosa de 2.3 mm de largo (González *et al.*, 2102). Los frutos son vainas rojizas, semiduras, subcilíndricas, de 2 a 10 cm de largo, las cuales permanecen en el árbol después de madurar. Estas contienen la semilla reniformes, de 6 a 8 mm de largo, pardo-amarillentas (<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/874Acacia%20farnesiana.pdf>).

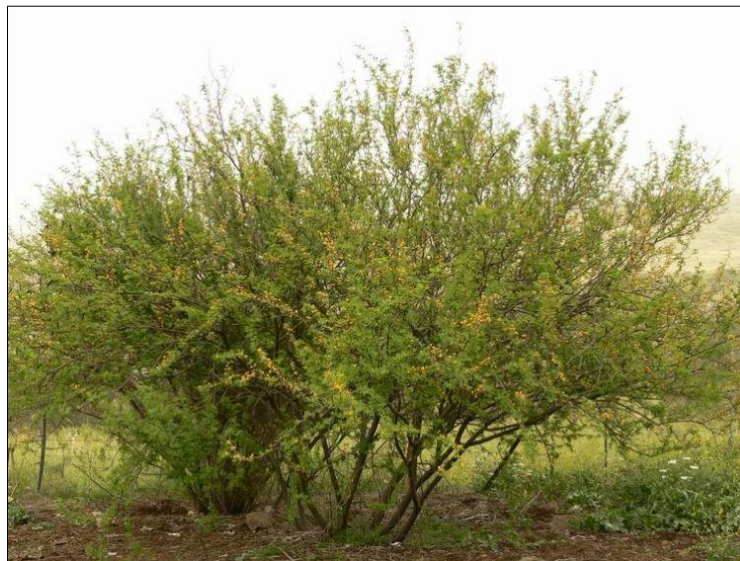


Figura 19. Vista de un ejemplar en fase de floración de *Acacia farnesiana*.

2.5.18 *Prosopis glandulosa* Torrey

P. glandulosa o “mezquite” (Figura 20), es una planta ampliamente distribuida en México en las regiones áridas. Se le encuentra en latitudes mayores a 1500 msnm,

frecuentemente a lo largo de los drenajes en zonas donde la lluvia es inferior a 150 mm y persiste sobre las tierras altas, sobre áreas neutras y alcalinas donde la lluvia supera 750 mm. Es utilizado como forraje y leña (Méndez *et al.*, 2007). Por contar con numerosas flores es una excelente fuente de néctar para abejas. Las plantas mayores crecen en lugares abiertos y pueden alcanzar alturas de 7 a 13 m. También existen mezquites de tipo arbustivo que comúnmente invade las tierras de pastoreo. Esta planta tiene espinas axilares de 1 a 4.5 cm de largo; se encuentran a veces en pares, pero por lo común son solitarias (Ffolliott y Thames, 1983). Las hojas son glabras y tienen uno o dos pares de pinnas de 6 a 17 cm de largo que llevan 6 a 17 pares de foliolos cada una. Los pétalos florales son de 2.5 a 3.5 mm de largo y el ovario es peloso. La vaina es linear, aplanada, amarilla y de casi 10 a 20 cm de largo, 1 cm de ancho y 0.5 cm de espesor. El exocarpio es duro sobre un mesocarpio pulposo y dulce. Las vainas contienen de 5 a 18 semillas ovaladas, pardo lucientes de 5 mm de ancho, 7 mm de largo y 2 mm de espesor (Ffolliott y Thames, 1983).



Figura 20. Vista de un ejemplar de *Prosopis glandulosa* Torrey.

2.5.19 *Agave salmiana*

A. salmiana o “maguey” (Figura 21), es una planta que requiere un clima semiseco, generalmente se le encuentra alrededor de 2000 msnm en diferentes tipos de hábitat, desde valles y planicies hasta cerros y laderas pedregosas, así como lugares montañosos de gran altitud (García-Herrera *et al.*, 2010). Su reproducción puede ser por semilla o bulbillo o más eficientemente mediante rizomas. La edad óptima de un agave para reproducirse es entre los 3 y los 5 años, y puede dar origen anualmente a uno o dos hijuelos (COANBIO, 2015a).

Esta planta tiene hojas de 1.5 a 2.0 m de largo, de 15 a 25 cm de ancho, lanceoladas y acanaladas en el haz, dientes sobre mamilas, en la parte media de 0.5 a 1.0 cm de largo, 0.6 a 1.2 cm de ancho, rectos o recurvados; espina terminal 3.5 a 4.0 cm de largo. Inflorescencia paniculada, laxa, de 6 a 9 m de alto, contorno general ovalado, fértil desde la mitad o el tercio superior, presenta de 20 a 35 ramas primarias de 1 a 1.2 m largo; pedúnculo verde-glaucos, brácteas del pedúnculo de 30 a 60 cm largo, base hasta 10 cm de ancho, triangulares, margen entero, y espina de 1 a 1.5 mm largo (Reynoso *et al.*, 2012). Cuenta con flores de 6 a 7.5 cm largo, hipocrateriformes, verde-amarillentas; cápsulas de 4.0 a 5.5 cm largo y de 2.0 a 2.5 cm ancho; cuenta con numerosas semillas de 9 a 10 mm largo y de 7 a 8 mm ancho, de color negro cuando maduran (Reynoso *et al.*, 2012).

Los usos más importantes de los magueyes por los humanos son como fuente de fibras duras para la fabricación de diferentes artículos, para la alimentación, medicinal-farmacéutica y para la elaboración de bebidas alcohólicas fermentadas y destiladas

(García-Herrera *et al.*, 2010). Un ejemplar de *Agave salmiana* se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Ejemplar de *Agave salmiana*.

Una característica común de las especies anteriormente revisadas es que de ellas se puede extraer aceite vegetal además de otros parámetros o índices de importancia industrial, lo que constituye un punto a evaluar en el presente trabajo.

2.6 Aceite vegetal

El aceite vegetal es un lípido que se obtiene de las plantas y sus partes, principalmente de las semillas, que contienen estos compuestos, los cuales son una fuente de energía muy importante ya que componen una parte fundamental en la dieta del ser humano, esto por la cantidad de ácidos grasos derivados de las grasas y aceites comestibles (Ortega y Vázquez, 1993).

Por otro lado, los aceites vegetales, dependiendo de sus características, muestran diferentes usos de importancia socioeconómica, esto los hace muy atractivos, ya que son un producto renovable y su obtención requiere muchas veces de procesos simples (Roger-Riva *et al.*, 2010).

De esto deriva que se les caracterice a nivel fisicoquímico para su correcta utilización (Lafargue-Pérez *et al.*, 2012). Los aceites pueden ser utilizados en la industria de lubricantes, farmacéutica, cosméticos, jabones, ceras, recubrimientos, barnices, alimentaria y la de los bioenergéticos donde el resultado es el biodiesel, capaz de sustituir al diésel derivado del petróleo, con las ventajas de ser biodegradable y tener un impacto ambiental menor por la generación de gases menos tóxicos para el medio ambiente (Lafargue-Pérez *et al.*, 2012).

2.6.1 Composición de los aceites vegetales

Los aceites vegetales están constituidos por triglicéridos, que son ésteres de una molécula de glicerina con tres ácidos grasos (Figura 22). En su mayoría los triglicéridos son mixtos, es decir que dos o tres de sus ácidos grasos son diferentes.

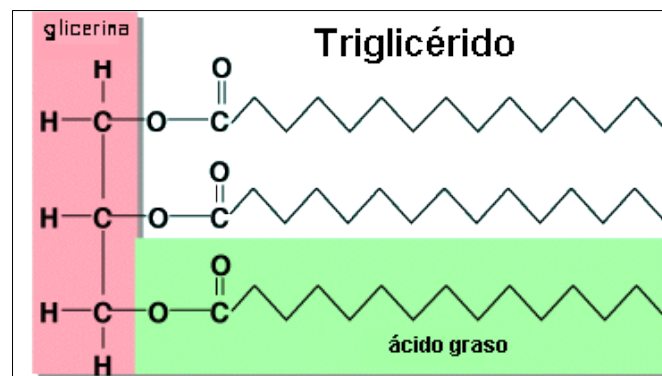


Figura 22. Estructura de un triglicérido (<http://www.ehu.eus/biomoleculas/lipidos>).

Los principales ácidos grasos que constituyen los triglicéridos no son sintetizados por el organismo del ser humano, y dada la importancia que juegan en la realización de diversas funciones, es necesario que se adquieran de los alimentos.

2.6.2 Ácidos grasos

Los lípidos se encuentran en los tejidos animales y vegetales y los más comunes son los glicerolípidos. Los ácidos grasos constituyen los principales componentes de estos lípidos y han sido subdivididos en tres grupos según el grado de insaturación, por lo que estos pueden ser saturados, insaturados y poliinsaturados (FAO, 2012).

2.6.2.1 Ácidos grasos saturados

Los aceites vegetales están formados por un gran número de ácidos grasos, estos ácidos presentan la fórmula general R-COOH. Los ácidos grasos saturados se caracterizan por no tener dobles enlaces y se clasifican en subgrupos dependiendo de la longitud de su cadena, así podemos tener ácidos grasos de cadena corta, media, larga o muy larga (FAO, 2012):

- Ácidos grasos de cadena corta: de 3 a 7 átomos de carbono.
- Ácidos grasos de cadena media: de 8 a 13 átomos de carbono.
- Ácidos grasos de cadena larga: de 14 a 20 átomos de carbono.
- Ácidos grasos de cadena muy larga: con 21 o más átomos de carbono.

2.6.2.2 Ácidos grasos insaturados

Los ácidos grasos insaturados se caracterizan por contener uno o más dobles enlaces en sus cadenas de carbono. De acuerdo a la orientación de los átomos de hidrógeno unidos a los carbonos con doble enlace, estos pueden tener una configuración '*cis*', la cual consiste en que los átomos de hidrógeno unidos a los dobles enlaces se encuentran en el mismo plano. Por otro lado, si los átomos se encuentran en planos opuestos, la configuración se denomina *trans* (Figura 23) (FAO, 2012). La clasificación de estos ácidos se da en tres subgrupos según la longitud de su cadena. Al igual que los saturados FAO (2012) propone la siguiente clasificación:

- Ácidos grasos insaturados de cadena corta: con 19 o menos átomos de carbono.
- Ácidos grasos insaturados de cadena larga: de 20 a 24 átomos de carbono.
- Ácidos grasos insaturados de cadena muy larga: con 25 o más átomos de carbono.

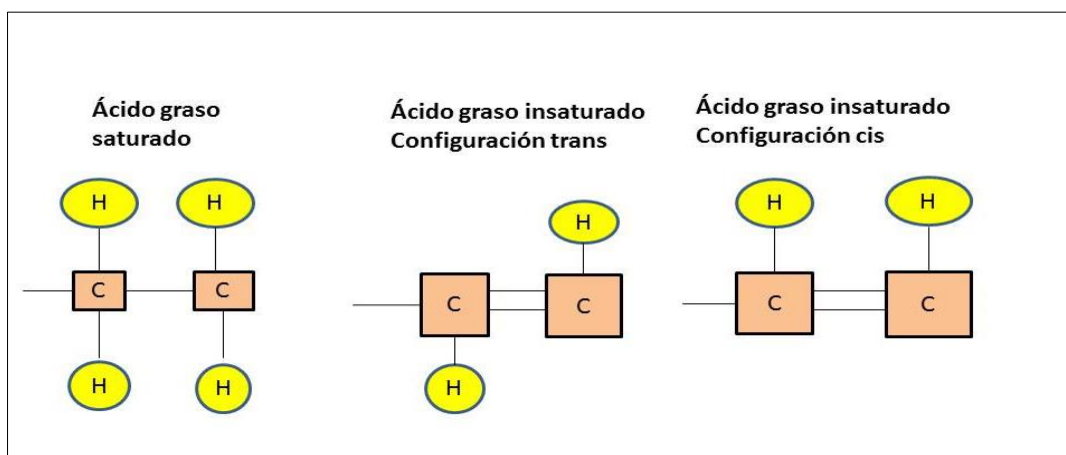


Figura 23. Representación de ácidos grasos saturados e insaturados (cis y trans) (Giascopini, 2008).

En el Cuadro 2 se muestran los principales ácidos grasos saturados e insaturados con el número de carbonos con que cuenta su cadena, así como los vegetales (o animales) en los que se encuentran en mayores cantidades.

Cuadro 2. Principales ácidos grasos (Eii, 2015).

| Ácido graso | Nº de C | Enlaces dobles | Estructura |
|---------------|---------|----------------|---|
| Láurico | 12 | - | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$ (coco y semillas de palma) |
| Mirístico | 14 | - | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$ (nuez moscada, coco y semillas de palma) |
| Palmítico (s) | 16 | - | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$ (animales, casi todos los aceites vegetales) |
| Estearico (s) | 18 | - | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$ (animales, cacao y casi) |

| | | | |
|--------------|----|---|---|
| | | | todos los aceites vegetales) |
| Araquídico | 20 | - | $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{18}\text{-COOH}$ (cacahuate) |
| Palmitoleico | 16 | 1 | $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_5\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$ (animales y vegetales) |
| Oleico | 18 | 1 | $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$ (aceituna y almendra) |
| Linoleico | 18 | 2 | $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$ (aceituna, girasol, soja) |
| Linolénico | 18 | 3 | $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$ (lino) |
| Araquidónico | 20 | 4 | $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-(CH=CH-CH}_2\text{)}_3\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_3\text{-COOH}$ (vegetales) |
| Erúcico | 22 | 1 | $\text{CH}_3\text{(CH}_2\text{)}_7\text{CH=CH(CH}_2\text{)}_{11}\text{COOH}$ (colza, uva) |

2.7 Biodiesel

Demirbas (2008), define al biodiesel como una energía alterna, cuyo compuesto proviene de fuentes biológicas renovables, de ácidos grasos y derivados de aceites de plantas oleaginosas (aceites comestibles o no comestibles vegetales) o grasas animales. Estas grasas y aceites están constituidos por triglicéridos que en su estructura tienen una cadena principal de tres carbonos (glicerina) con una cadena de hidrocarburo de longitud determinada unida a cada uno de los carbonos, que al derivarse de diferentes materias primas puede tener diferentes propiedades y composiciones (Escobar *et al.*, 2009; Benjumea *et al.*, 2011). El proceso de transformación de aceite a biodiesel se realiza a través de una reacción química llamada ‘transesterificación’ el cual rompe las moléculas de aceite (con o sin catalizador) y convierte el aceite nuevo o usado en biodiesel y glicerina (Purcella, 2008).

2.7.1 Aceites vegetales utilizados para producir biodiesel

Los países pioneros en producir biodiesel se han enfocado en producirlo a partir de especies que tienen una gran disponibilidad local (Benjumea *et al.*, 2009). En el mundo se están utilizando plantas como soya, girasol, colza y palma de aceite para sustituir el diesel convencional proveniente del petróleo (Rodríguez-Hernández y Zamarripa-

Colmenero, 2013). En países europeos los aceites de semillas oleaginosas más utilizados son la colza y el girasol. En Estados Unidos y Argentina la soya es la semilla más utilizada, por otra parte, en países tropicales la palma de aceite es la principal opción (Benjumea *et al.*, 2009); Sin embargo, el empleo de granos destinados al consumo humano para producir biocombustibles, ha traído como consecuencia un incremento en los precios de los alimentos, por lo que es necesario buscar otras especies para generar biocombustibles que no compitan con los cultivos destinados al consumo humano y animal (Rodríguez y Zamarripa, 2013).

2.7.2 Aceites alternativos para producir biodiesel y otros usos

De manera paralela a la fabricación de biodiesel a partir de las plantas antes mencionadas, se está realizando investigación en campo y laboratorio con la finalidad de evaluar la factibilidad de producir biodiesel con aceites vegetales alternativos, los cuales preferentemente no sean comestibles (Benjumea *et al.*, 2009).

Dentro de las especies alternativas más estudiadas para producir biodiesel en México se encuentran la higuera (*Ricinus communis*) y el piñón (*Jatropha curcas*), que se caracterizan por ser plantas que generalmente no son comestibles y tienen semillas con rendimientos de aceite mayores al 30% (Benjumea *et al.*, 2009). Estas plantas ya se han utilizado como materia prima para producir bioturbosina en México y se producirá por medio de un proceso llamado “hidrocraqueo”. En abril de 2011 se llevó a cabo el primer vuelo demostrativo con bioturbosina producida a partir de aceite de *J. curcas* cultivada en Chiapas y en julio del mismo año el primer vuelo comercial (Masera *et al.*, 2011). Dado que *J. curcas* es una planta que se cultiva principalmente en climas tropicales del sureste de México (Zamarripa-Colmenero *et al.*, 2009), su uso para biocombustible se

ve altamente limitado solo a esta región del país, con la gran desventaja que en México la mayor parte del territorio es de climas secos .

Por otro lado se está comenzando a establecer cultivos de higuera intercalados a cultivos comerciales como maíz y frijol, sin tener aún los resultados esperados en la aceptación entre los productores, debido a que no lo encuentran competitivo, dado que no existe un paquete tecnológico adecuado que haga al cultivo de higuera tener un mayor rendimiento y sea más rentable al buscar que tenga una menor demanda de insumos (Rodríguez y Zamarripa, 2013). Ante esto, se hace necesario buscar otras plantas que se muestren como alternativa para la producción de aceite. En este sentido el presente trabajo se plantea con ese objetivo.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar el potencial de producción de aceite para biodiesel y otros usos de importancia socioeconómica en especies de plantas nativas del Altiplano Centro-Norte de México.

3.1.1 Objetivos específicos

- Estimar el potencial de rendimiento de semilla y aceite de las plantas evaluadas.
- Caracterizar morfológicamente las semillas de las especies estudiadas.
- Realizar un análisis físico-químico de los aceites obtenidos de las semillas.

4. HIPÓTESIS

Existen plantas en el Altiplano Centro-Norte de México con potencial para producir aceite que pueden competir con las actualmente utilizadas para la producción de este insumo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

5.1.1 Altiplano Centro-Norte de México

La colecta de semillas de las especies consideradas en el estudio, se realizó en el Altiplano Centro-Norte de México (Figura 24), ubicado en la región fisiográfica del Altiplano Mexicano (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). El área abarca de los 21° 30' a 23° 30' latitud norte y de 100° 45' a 102° 45' longitud oeste, e incluye zonas de los estados de San Luis Potosí, Zacatecas, Aguascalientes y algunas regiones del norte de Guanajuato y Jalisco (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). En ella se conjuntan cuatro regiones fisiográficas: la altiplanicie septentrional, en el centro y norte; la altiplanicie meridional, en el sur y oriente; las sierras inferiores, al noreste y, las sierras altas con valles, al occidente del área (Tamayo, 1981).

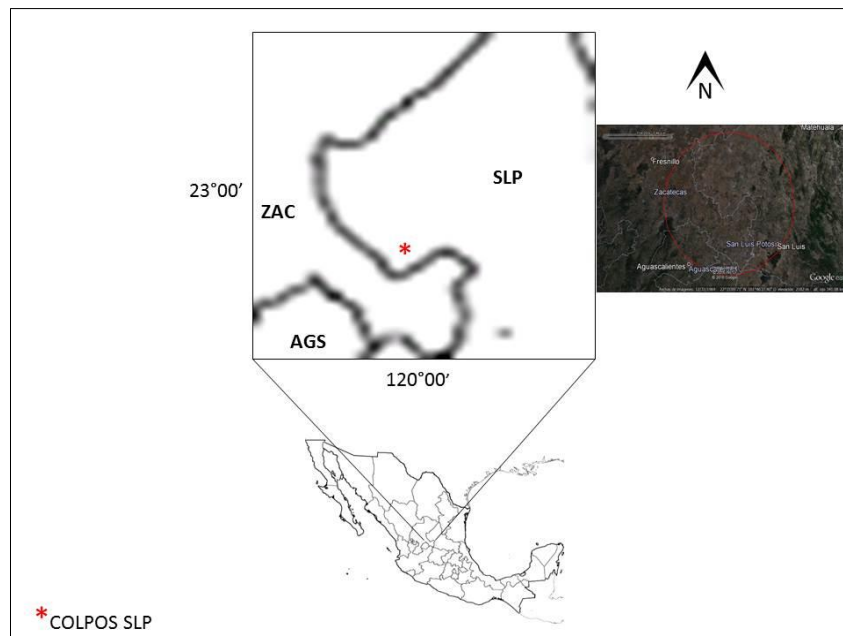


Figura 24. Altiplano Centro-Norte de México.

5.1.2 Geología

La región cuenta con diferentes sustratos, entre los más comunes son las rocas calizas del cretácico y del jurásico ubicadas al norte del área; en el suroeste son más comunes las rocas ígneas (Ferrusquía-Villafranca, 1993). En la región predominan suelos tipo calcisol, particulares por su alto contenido de carbonato de calcio; en el noreste existen zonas de regosol, al occidente se encuentran planosoles y hacia el sureste se localizan suelos feozem ricos en materia orgánica (Luna-Cavazos *et al.*, 2007; FAO-UNESCO-ISRIC, 1988). En el noreste del área los suelos predominantes son castañozem lúvico, castañozem cálcico, xerosol háplico y xerosol cálcico (CONANP, 2014).

5.1.3 Clima

El clima en esta región corresponde al grupo B (secos) donde las temperaturas extremas pueden alcanzar máximas superiores a 40 °C (CONANP, 2014). El tipo de clima predominante es BS, con las variantes BS0, el más seco y BS1, el menos seco, la temperatura media anual varía de 13.5 a 20.5 °C (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). La precipitación típica de las regiones áridas y semiáridas, presenta un promedio anual de 240 a 770 mm (CONANP, 2014).

5.1.4 Vegetación

Las comunidades vegetales predominantes son el matorral xerófilo o xerofítico (micrófilo y rosetófilo) propio del Desierto Chihuahuense (CONANP, 2014). Entre las comunidades vegetales más abundantes en el área destacan los matorrales micrófilos de *Larrea tridentata* D.C. (Coville) y *Flourenzia cernua* D.C.; los matorrales rosetófilos de *Agave lechuguilla* Torr., *Agave striata* Trel., y *Hechtia glomerata* Zucc.; el matorral crasicale de *Opuntia*; los izotales *Yucca carnerosana* (Trel.) McKelvey y *Yucca*

filifera Chabaud (CONANP, 2014); así como masas de matorral espinoso de *Prosopis laevigata* y *P. glandulosa* var. (Luna-Cavazos *et al.*, 2007). En las serranías meridionales de San Luis Potosí existen bosques de *Pinus cembroides* y *Pinus johannis* (Luna-Cavazos *et al.*, 2007).

5.1.5 Economía

En la mayor parte del Altiplano prevalece la propiedad ejidal de la tierra (Charcas *et al.*, 1988). Las principales actividades económicas son la producción de cosechas de secano y riego, de frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz (*Zea mays*), cebada (*Hordeum vulgare*), alfalfa (*Medicago sativa*), vid (*Vitis vinífera*) (CONANP, 2014) y hortalizas, entre estas últimas destaca la producción de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) Otra de las actividades económicas es la ganadería donde la producción animal se hace con especies menores (ovinos y caprinos). Las principales plantas de recolección para venta son la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), palma samandoca (*Yucca carnerosana*), piñón (*Pinus cembroides*) y los nopales (*Opuntia* spp.), entre otras. En menor cantidad se practica la caza de especies; entre las utilizadas son la rata de campo (*Neotoma albigula*), el conejo (*Sylvilagus* spp.), la liebre (*Lepus* spp.) y el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) (CONANP, 2014; Charcas *et al.*, 1988). Otras actividades económicas importantes son la minería y la emigración a las principales ciudades del país y a los Estados Unidos.

5.2 Selección de especies

Luego de realizar recorridos en campo y determinar que plantas son más abundantes en sitios como parcelas de cultivos, orilla de carreteras y caminos, así como vegetación de los diferentes ecosistemas presentes en el área de estudio, se plantearon los criterios para seleccionar las especies a evaluar, considerándose los siguientes: 1) abundancia de

la especie en el área de estudio, 2) presencia y cantidad de semilla, 3) accesibilidad para realizar el muestreo, 4) antecedentes de uso. Con base a los criterios anteriores se consideraron las siguientes especies para realizar el presente trabajo: chicalote (*Argemone mexicana*), calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima*), melón hediondo (*Apodanthera undulata*), aceitilla (*Bidens odorata*), jara (*Leonotis nepetifolia*), toloache (*Datura innoxia*), cardo (*Datura ferox*), cadillo (*Xanthium strumarium*), pirúl (*Schinus molle*), toritos (*Proboscidea louisianica*), mostacilla (*Brassica* sp.), saramago (*Eruca sativa*), sangre de grado (*Jatropha dioica*), gobernadora (*Larrea tridentata*), girasol (*Helianthus annuus*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), chilacayota (*Cucurbita ficifolia*), huizache (*Acacia farnesiana*), maguey (*Agave salmiana*). Estas especies silvestres presentan resistencia a factores edáfico-climáticos, no compiten por espacio con cultivos agrícolas para la alimentación del hombre, y sus semillas contienen aceites con potencial bioenergético y otros usos.

5.3 Recolecta de semilla

La colecta de semillas de las especies en estudio, se llevó a cabo mediante recorridos de campo en los sitios donde fueron observadas las plantas, considerando los sitios marcados en el Cuadro 3. La recolecta se hizo durante dos periodos, de junio a diciembre de 2014 y de enero a mayo de 2015.

Cuadro 3. Localización de los sitios de colecta de las especies evaluadas.

| Estado | Municipio | Sitio | Latitud | Longitud | Msnm | Especie(s) |
|--------|-----------------------|--------------------------|-------------|--------------|------|--|
| Ags. | Cosío | Salero | 22°23'39.8" | 102°18'23.4" | 2008 | <i>D. inoxia</i> |
| Ags. | San José de Gracia | E. Mosqueira | 22°08'36.9" | 102°21'26.4" | 1980 | <i>H. annuus, A. undulata</i> |
| Ags. | Tepezalá | Rio Hondo | 22°13'33.2" | 102°14'14.2" | 1887 | <i>X. strumarium, D. ferox, B. odorata</i> |
| SLP | Ahualulco | Milpillas | 22°19'38.8" | 101°12'15.3" | 1862 | <i>P. louisianica</i> |
| SLP | Salinas | Ejido Diego Martín | 22°43'56.0" | 101°42'40.0" | 2096 | <i>B. odorata, E. sativa</i> |
| SLP | Mexquitic | Corte Primero | 22°19'38.8" | 101°12'15.0" | 1870 | <i>B. odorata, Brassica, P. louisianica</i> |
| SLP | Mexquitic | Las Moras | 22°16'23.4" | 101°05'35.0" | 1980 | <i>L. nepetifolia</i> |
| SLP | Salinas | Ejido La Paz | 22°37'32.6" | 101°41'15.0" | 2110 | <i>P. louisianica, H. annuus, E. sativa, B. odorata, X. strumarium</i> |
| SLP | Venado | Venado | 22°55'54.3" | 101°04'25.6" | 1755 | <i>B. odorata, X. strumarium</i> |
| SLP. | Salinas | San Juan sin Agua | 22°35'59.9" | 101°42'07.0" | 2115 | <i>L. tridentata, J. dioica</i> |
| Zac. | Pánfilo Natera | La Blanca | 22°40'22.9" | 102°06'28.4" | 2127 | <i>P. louisianica</i> |
| Zac. | Zacatecas | Periodistas | 22°45'26.9" | 102°33'51.1" | 2418 | <i>B. odorata, H. annuus, D. inoxia</i> |
| Zac. | Zacatecas | Picones | 22°45'51.4" | 102°38'21.2" | 2325 | <i>J. dioica</i> |
| Zac. | Zacatecas | Minera | 22°46'00.3" | 102°35'03.8" | 2444 | <i>A. mexicana</i> |
| Zac. | Guadalupe | Santa Mónica | 22°45'04.2" | 102°27'10.4" | 2193 | <i>C. foetidissima</i> |
| Zac. | Loreto | San Marcos | 22°16'19.3" | 101°57'30.4" | 2047 | <i>S. molle</i> |

Para caracterizar la población de cada una de las especies en estudio así como determinar su rendimiento potencial, una vez localizadas las plantas consideradas, se utilizó el método de muestreo por parcelas propuesto por Mostacedo y Fredericksen (2000), el cual permite estimar cobertura, densidad y frecuencia de plantas. Los tamaños de parcelas fueron de 1 m x 1 m para herbáceas, de 5 m x 5 m para las cucurbitáceas rastreras y de 10 m x 10 m para arbustivas y arbóreas. Un ejemplo de una parcela utilizada se muestra en la Figura 25. Este método es rápido y eficiente para obtener información no solo en estudios ecológicos, sino también florísticos (Tello *et al.*, 2006).



Figura 25. Parcela cuadrada de 1m x 1m.

Durante el muestreo, las plantas se geo-referenciaron y se tomaron medidas de altura, diámetros, número de flores y número de frutos, a la vez que se obtuvo un archivo fotográfico de cada especie colectada.

5.4 Estimación de rendimientos de semilla

Posteriormente, en laboratorio se realizó manualmente la separación de las semillas, de las cuales se registró su peso, para poder estimar sus rendimientos, los cuales se

calcularon a partir de las variables número de ramas, número de frutos, peso y número de semillas. Así como la densidad de plantas que se calculó con la fórmula:

$$D = \text{No. Individuos} / \text{Unidad de área}$$

Los cálculos se hicieron según el tamaño de la parcela y según la densidad de la especie y los resultados obtenidos para la parcela se extrapolaron a una hectárea.

5.5 Caracterización física de las semillas

La caracterización física de las semillas recolectadas en campo de las diferentes especies nativas consideradas en el estudio, se realizó a través de su peso y tamaño.

5.5.1 Tamaño

El tamaño de semillas se obtuvo tomando al azar muestras de diez semillas de cada una de las especies, de acuerdo a la metodología propuesta por (Pérez *et al.*, 2006). A dichas semillas se les midió por triplicado largo, ancho y espesor, utilizando un Vernier y cinta métrica como se muestra en la Figura 26.

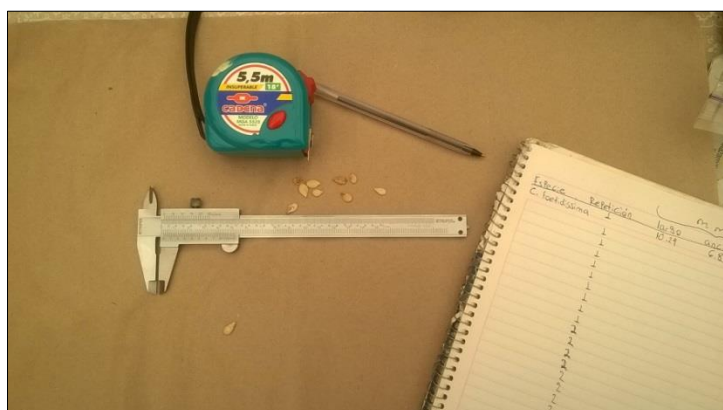


Figura 26. Material utilizado para medir las semillas.

5.5.2 Peso

El peso se obtuvo tomando al azar 100 semillas de cada una de las especies, éstas fueron pesadas en una balanza analítica Vlab modelo VE-300®, con capacidad de 300 g y sensibilidad de 1 mg (Figura 27). Todos los pesos se hicieron por triplicado.



Figura 27. Balanza utilizada para pesar las semillas.

5.6 Extracción de aceite de las semillas

La extracción de aceite de las semillas de las plantas en estudio, se realizó mediante el método de extracción química, en este caso por solventes. Para este trabajo se utilizó Hexano al 99 %, que es el solvente más utilizado para la extracción de aceites vegetales. Por ser más eficiente en consumo de solvente y por permitir realizar un mayor número de corridas en menor cantidad de tiempo, a comparación de los aparatos Soxleth tradicionales, se eligió hacer la extracción con un determinador de grasa y aceite. El determinador de grasa y aceite utilizado en el trabajo fue el SOXTEC SYSTEM HT 1043® el cual se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Determinador de grasa y aceite SOXTEC SYSTEM HT

1043®.

La técnica utilizada para la extracción se basa en la aplicada por Loredó (2012), adecuada a las indicaciones del manual de usuario del determinador de grasa y aceite.

Para la extracción del aceite, se pesaron 25 g de semilla de cada una de las especies con una balanza analítica, y se llevaron a la estufa durante 18 horas a 60 °C para ser deshidratadas. Luego de este periodo se retiraron las semillas y se colocaron en el desecador hasta llegar a peso constante, posteriormente éstas se molieron en una licuadora comercial. Se obtuvieron muestras de 5 g de las semillas previamente preparadas, las cuales se colocaron en papel filtro Whatman 42 y, posteriormente, se introdujeron en los dedales de celulosa y anillos metálicos del equipo de extracción. Esto se realizó por triplicado para cada especie.

El hexano al 99 %, se colocó en vasos de aluminio, los cuales son parte del equipo, éstos se llevaron previamente a la estufa hasta peso constante. Los vasos se llenaron a 60 mL y se colocaron en la plancha de calentamiento del equipo. Los periodos de

proceso utilizados fueron: 60 min de lavado, 30 min de enjuague y 20 min para recuperación del solvente.

Terminado el proceso, se retiraron los vasos con aceite y se llevaron a secar a la estufa a 60 °C por 18 horas, después se colocaron en el desecador por 15 min y finalmente se calculó el porcentaje de aceite por diferencia de masas aplicando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de aceite} = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100$$

Donde:

m_1 = peso del recipiente (g)

m_2 = peso del recipiente con aceite (g)

m = peso de la muestra (g)

5.7 Caracterización físico-química del aceite

Los aceites vegetales son mezclas de diferentes triglicéridos, los cuales en su mayoría están compuestos por diversos ácidos grasos. Sus propiedades físicas y químicas están relacionadas directamente con el número y la estructura química de los ácidos grasos unidos al glicerol, así como, con el grado de saturación de los ácidos grasos y su longitud de cadena (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Los aceites y las grasas se pueden caracterizar de acuerdo a sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción, entre otras) o químicas (índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, entre otras) (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). En este estudio, debido a la poca disponibilidad de aceite, se decidió realizar las determinaciones de los índices de refracción, saponificación, acidez, peróxidos, yodo y espectrometría para caracterizar los aceites de las diferentes especies consideradas en el estudio, lo cual a su vez determinará el uso específico que se le pueda dar a cada uno de los aceites de las plantas estudiadas. A continuación se presentan las técnicas utilizadas para determinar a cada uno de ellos.

5.7.1 Índice de Refracción

El índice de refracción (IR) es la relación que existe entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, ángulos que se forman al pasar un rayo de luz del aire a otro medio, en que la luz se propaga con diferentes velocidades (NMX-F074-S-1981). El IR es característico dentro de ciertos límites para cada aceite y es un indicador de su pureza, de igual modo que este valor está relacionado con el grado de saturación, con la razón cis/trans de los dobles enlaces y puede estar influenciado por el daño que sufre el aceite tras la oxidación (Martínez-Valencia *et al.*, 2011).

La determinación del IR se realiza por medida directa del ángulo de refracción o bien por la observación directa del límite de reflexión total manteniéndose la sustancia dentro de las condiciones de isotropismo y transparencia (NMX-F-074-S-1981). En este caso se realizó con un refractómetro de Abbe (Figura 29), para lo cual se calibra el equipo con agua destilada cuyo valor es conocido (1.33). Las lecturas se tomaron a una temperatura de 24 °C, y para ello se agregó y expandió en el prisma del refractómetro de 2 a 3 gotas de los aceites obtenidos previamente, y se procedió a tomar la lectura del IR. Entre una lectura y otra se limpió el prisma con alcohol.



Figura 29. Refractómetro de Abbe.

5.7.2 Índice de saponificación

Índice de saponificación (IS) es la cantidad de hidróxido de potasio, expresado en miligramos, necesario para saponificar un gramo de aceite o grasa. El método para determinar el IS se basa en la reacción química de los ácidos grasos con un álcali,

formándose la sal del ácido y está se realizó según lo especifica la (NMX-F-174-S-1981) para lo cual se montó el sistema que se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Sistema para determinar el Índice de Saponificación.

En el sistema se acoplaron matraces de ebullición con tubos de condensación, y éstos se conectaron en serie para facilitar y hacer más eficiente el consumo de agua. A cada matraz se le colocó 1 g de muestra y 15 mL de solución de hidróxido de potasio (KOH) alcohólica y se colocaron encima de una parrilla eléctrica, la cual estuvo funcionando a 280 °C durante 45 min. Posteriormente, se agregaron 3 mL de alcohol y se tituló con fenolftaleína y ácido clorhídrico (HCl) (Figura 31).

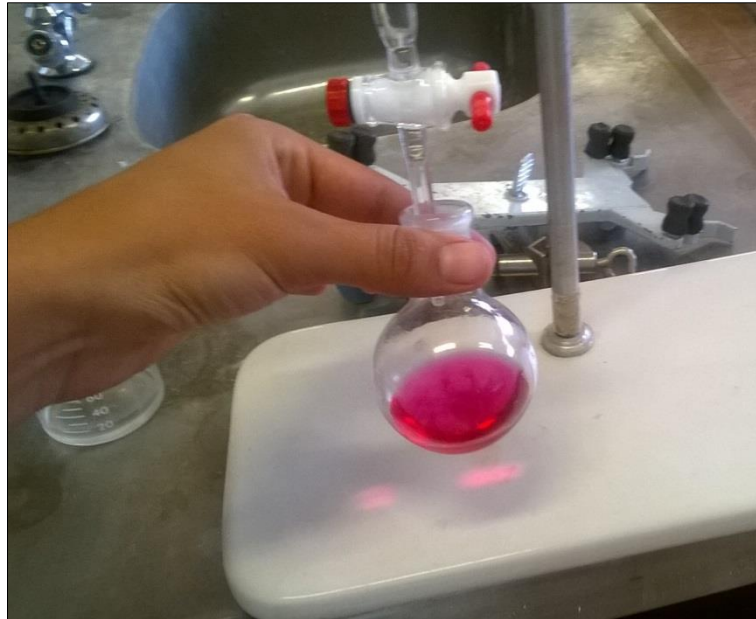


Figura 31. Titulación de la muestra para determinar el índice de saponificación.

El procedimiento se hizo por duplicado para cada una de las muestras. Posteriormente, el cálculo del IS se realizó con la siguiente fórmula:

$$IS = \frac{V1 - V}{P} * 28.05$$

En donde:

IS = índice de saponificación.

V1 = mL de solución de HCl 0.5 N empleados en la titulación del testigo.

V = mL de ácido clorhídrico 0.5 N empleados en la titulación de la muestra.

P = masa de la muestra (g).

28.05 = mg de KOH equivalente a 1 mL de HCl 0.5 N.

5.7.3 Índice de Acidez (Ácidos grasos libres)

La determinación del índice de acidez (IA), se llevó a cabo siguiendo la metodología de la norma mexicana NMX-F-101-1987. Esta se basa en la titulación de los ácidos grasos

libres con un álcali y el IA se expresa como porcentaje de ácidos grasos, en este caso, en el aceite.

Para la determinación se preparó un litro de solución 0.01 N de hidróxido de sodio (NaOH), esto se hizo agregando 19.58 mL de solución de NaOH 0.5106 N, el resto fue de agua destilada, en un matraz aforado de 1000 mL. Posteriormente se valoró con una solución de fenolftaleína al 1% como indicador.

Se preparó también una solución 1:2 de Alcohol-Éter, la cual se neutralizó con la solución de NaOH utilizando fenolftaleína como indicador.

La prueba comenzó colocando en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, 1.56 g de muestra, luego se le agregaron 20 mL de la solución Alcohol-Éter y 20 gotas del indicador fenolftaleína. Se llenó una bureta de 25 mL con solución de NaOH y se tituló agitando el matraz hasta que en la mezcla persistiera un color rosado (Figura 32).



Figura 32. Titulación de la muestra para determinar el índice de acidez.

El porcentaje de ácidos grasos libres se calcula con la ecuación que se muestra a continuación. Frecuentemente se expresa como ácido oleico, sin embargo, también se llega a expresar como laúrico o palmítico.

$$\% \text{ ácidos grasos libres} = \frac{\text{meq} * N * V}{P} * 100$$

En donde:

meq = miliequivalente químico del ácido graso de referencia.

N = normalidad de la solución de NaOH.

V = mL de solución valorada de NaOH gastados en la titulación de la muestra.

P = peso de la muestra (g).

5.7.4 Índice de peróxidos

El índice de peróxidos (IP) se determinó utilizando la metodología propuesta por la norma mexicana NMX-F-154-1987 modificada. El fundamento de este método se basa en la determinación, en la solución de prueba, de la cantidad de peróxidos contenidos por medio de una titulación. De acuerdo a esta norma, el IP indica los miliequivalentes de oxígeno en forma de peróxido por kilogramo de grasa o aceite.

Para la determinación se preparó una solución de tiosulfato de sodio 0.01 N para titular, una solución saturada de yoduro de potasio (KI) y una solución A de ácido acético-cloroformo.

Se pesaron en la balanza analítica 0.5 g de muestra, la cual se colocó en un frasco ámbar y posteriormente se ingresó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL con tapón esmerilado (Figura 33). Luego se agregaron 5 mL de solución A y se mezcló, después se agregaron 5 gotas de KI saturado, se mezcló y el matraz se metió a oscuridad por 10 min.

Posteriormente se sacaron los matracas y se les agregó 5 mL de agua hervida y enfriada con la ayuda de una pipeta. Después se les agregó almidón y se mezcló hasta que la mezcla se tornó oscura y por último se procedió a titular con tiosulfato 0.01 N hasta que la mezcla quedó del color del aceite que se pesó al principio.

Las pruebas se hicieron por duplicado y el cálculo del IP se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$IP = \frac{V * N * 126}{P} * 0.253$$

Dónde:

IP = Índice de peróxidos.

V = Volumen de tiosulfato de sodio 0.01 N gastado en la titulación (mL).

N = Normalidad del tiosulfato de sodio.

P = Peso de la muestra (g).

126 = miliequivalente del yodo utilizado

0.253 = peso molecular del yodo.



Figura 33. Material utilizado en la determinación del índice de peróxidos.

5.7.5 Índice de yodo

El índice de yodo (IY) es la medida de la no saturación de las grasas y aceites y se expresa en términos del número de centigramos de yodo absorbidos por gramo de muestra (% de yodo absorbible).

La determinación de este índice se realizó de acuerdo a la norma mexicana NMX-F-408-S-1981, que se basa en la reacción del monobromuro de yodo, en medio acético, sobre los lípidos, y en medir la cantidad de yodo que está presente libremente; en función de éste se determina el grado de insaturación del aceite.

Se pesaron 0.25 g de muestra y se colocaron en un matraz para yodo de 200 mL con tapón de vidrio esmerilado, posteriormente se le adicionaron 100 mL de cloroformo con pipeta, girando el matraz, después se le agregaron 10 mL de reactivo de hanus, y se dejó reposando treinta minutos en obscuridad (este tiempo es suficiente para que el yodo sea absorbido completamente). Al transcurrir los treinta minutos se le agregaron al matraz 10 mL de una solución de yoduro de sodio 0.1 N y 100 mL de agua fría previamente hervida. Posteriormente se procedió a titular con tiosulfato de sodio 0.1 N dejándolo caer lentamente y agitando hasta la desaparición del color amarillo; en ese momento se agregaron 3 gotas de solución indicadora de almidón y se continuó la titulación hasta que desapareció completamente la coloración azul. Al final de la titulación se agitó vigorosamente el matraz bien tapado para verificar que todo el yodo ya se ha titulado.

Las pruebas se hicieron por duplicado y el cálculo del índice de yodo se llevó a cabo utilizando la siguiente fórmula:

$$IY = \frac{(Vt - Vm) * N * 12.69}{m}$$

Dónde:

IY = Índice de yodo.

Vt = mL de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación del blanco.

Vm = mL de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación de la muestra.

N = Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

12.69 = Equivalente del yodo.

m = Masa de la muestra (g).

5.8 Caracterización de la estructura química de aceite vegetal mediante espectrometría

Con la finalidad de detectar los ácidos grasos presentes en los aceites, se realizaron análisis de Espectroscopia Infrarroja Transformada de Fourier (FTIR) con un equipo Nicolet iS50 (Figura 34). Se midió en la región de 600 a 4000 cm^{-1} . Se agregaron 100 μL de muestra de los aceites de las semillas de las plantas estudiadas (Cuellar-Sánchez *et al.*, 2016) realizando el espectro para los estándares de los ácidos grasos Palmítico, Oleico, Linoleico y Linolénico (Sigma Aldrich®). Posteriormente, se hizo un análisis de los picos de absorbancia en los espectros obtenidos a través del análisis de los grupos funcionales presentes en éstos. Los gráficos se realizaron en el programa Originpro 8 agrupando las especies por familia o por tipo de planta.



Figura 34. Equipo FTIR utilizado en este trabajo.

5.9. Análisis estadístico de la información

A las variables medidas de cada especie se les calcularon parámetros de estadística descriptiva (promedios y desviación estándar) y en los casos de rendimientos de semilla y aceite se realizaron análisis de varianza y separación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) mediante el programa SAS (Statistical Analysis System). Por otro lado, y con ayuda del programa InfoStat/L, se realizó una matriz de correlaciones. También con este último programa se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se hicieron recorridos de campo a diferentes sitios del Altiplano centro-norte, en busca de realizar muestreos de especies de plantas, que de acuerdo a ciertos criterios, tendrían potencial para producción de aceite. Posteriormente, a la semilla colectada de cada especie, se le extrajo aceite y a éste se le hizo una caracterización físico-química en laboratorio. Aquí se muestran los resultados obtenidos.

6.1 Caracterización de las especies

Durante los recorridos de campo se encontraron diferentes especies, las cuales cumplieron con los criterios establecidos para su colecta. Posteriormente, se midieron las variables de campo necesarias para estimar los rendimientos potenciales de semilla y aceite. Las especies colectadas se distribuyeron a altitudes de 1775 a 2444 msnm, por otro lado, se observó también que la mayoría son plantas ruderales de ciclo anual, las cuales se encontraron a la orilla de la carretera, terrenos baldíos o como invasoras de campos de cultivo, donde claramente se observó que se encontraban en hábitats que han sido modificados por el hombre. En el Cuadro 4 se muestran los valores promedio para las variables altura, cobertura aérea y densidad (número de plantas por 100 m² y por hectárea). Las densidades estimadas de plantas por hectárea serían en condiciones silvestres, sin manejo alguno, las cuales bajo manejo agronómico se podrían comparar a las densidades de cultivos comerciales como la soya que tiene densidades desde 200,000 plantas ha⁻¹ (Tosquy-Valle *et al.*, 2010), o la colza con una densidad de 75,000 plantas ha⁻¹ (Ventimiglia y Torrens, 2010).

Cuadro 4. Características generales de las especies estudiadas.

| Especie | Altura (cm) | Cobertura aérea (cm²) | Densidad (plantas 100 m⁻²) | Densidad* (plantas ha⁻¹) |
|--------------------------------|------------------------|---|--|--|
| <i>Acacia farnesiana</i> | 210.0 | - | 1.6 | 160 |
| <i>Argemone mexicana</i> | 40.3 | 531.3 | 950.0 | 95,000 |
| <i>Apodanthera undulata</i> | - | - | 20.0 | 2,000 |
| <i>Agave sp.</i> | 110.0 | - | 1.5 | 150 |
| <i>Bidens odorata</i> | 32.2 | 400.9 | 660.0 | 66,000 |
| <i>Brassica sp.</i> | 75.1 | 531.3 | 550.0 | 55,000 |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | - | - | 450.0 | 45,000 |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | - | - | 550.0 | 55,000 |
| <i>Datura ferox</i> | 94.4 | 152.2 | 300.0 | 30,000 |
| <i>Datura innoxia</i> | 46.0 | 789.6 | 440.0 | 44,000 |
| <i>Eruca sativa</i> | 34.8 | 708.7 | 680.0 | 68,000 |
| <i>Heliantus annuus</i> | 115.0 | 2,389.0 | 500.0 | 50,000 |
| <i>Jatropha dioica</i> | 8.7 | - | 1,500.0 | 150,000 |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 122.0 | 498.3 | 600.0 | 60,000 |
| <i>Larrea tridentata</i> | 128.6 | - | 60.0 | 6,000 |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 190.0 | - | 1.5 | 150 |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 34.8 | 7,040.0 | 230.0 | 23,000 |
| <i>Schinus molle</i> | 1,250.0 | 12,021.0 | 0.2 | 17 |
| <i>Xanthium strumarium</i> | 23.0 | 24.1 | 367.0 | 36,700 |

* Densidad de plantas estimada.

6.2 Caracterización física de las semillas

6.2.1 Tamaño

En el Cuadro 5 se observa que las semillas de *Cucurbita ficifolia* mostraron el mayor largo y ancho con 17.32 mm y 10.73 mm respectivamente por otro lado las semillas de mayor espesor con 9.66 mm corresponden a *Jatropha dioica*. Sin embargo, las semillas de esta última especie fue la que presentó de los mayores valores en las tres medidas, por lo que fueron las semillas de mayor tamaño. Por su parte, las semillas de *Eruca sativa* fueron las más pequeñas pues tienen de los menores valores de largo, ancho y espesor que el resto de las especies. En todos los casos, los valores de desviación estándar se muestran relativamente pequeños, lo que señala que en las tres variables medidas (largo, ancho y espesor) no existe gran variabilidad en las dimensiones de las

semillas de una misma especie. Sin embargo, si se aprecia una gran variabilidad en las dimensiones de las semillas de las diferentes especies.

Cuadro 5. Características generales de las especies estudiadas.

| Especie | Largo (mm) | ± | Ancho (mm) | ± | Espesor (mm) | ± |
|--------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-------------------------|----------|
| <i>Argemone mexicana</i> | 1.85 | 0.11 | 1.73 | 0.01 | 1.67 | 0.10 |
| <i>Apodanthera undulata</i> | 10.72 | 0.75 | 8.34 | 0.59 | 3.69 | 0.54 |
| <i>Acacia farnesiana</i> | 6.35 | 0.18 | 5.86 | 0.56 | 4.12 | 0.23 |
| <i>Agave</i> sp. | 10.34 | 0.27 | 7.3 | 0.43 | 0.01 | 0.03 |
| <i>Bidens odorata</i> | 10.22 | 2.27 | 0.84 | 0.15 | 0.59 | 0.12 |
| <i>Brassica</i> sp. | 1.51 | 0.18 | 1.36 | 0.70 | 1.20 | 0.30 |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | 17.32 | 0.30 | 10.73 | 0.25 | 2.65 | 0.26 |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | 9.62 | 0.68 | 2.28 | 0.36 | 1.58 | 0.44 |
| <i>Datura ferox</i> | 3.74 | 0.31 | 2.91 | 0.26 | 1.49 | 0.15 |
| <i>Datura innoxia</i> | 4.52 | 0.63 | 3.31 | 0.42 | 1.31 | 0.01 |
| <i>Eruca sativa</i> | 1.56 | 0.11 | 1.24 | 0.11 | 0.77 | 0.14 |
| <i>Heliantus annuus</i> | 5.64 | 0.68 | 2.28 | 0.36 | 1.58 | 0.44 |
| <i>Jatropha dioica</i> | 11.61 | 0.92 | 10.17 | 0.85 | 9.66 | 0.53 |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 3.91 | 0.31 | 1.48 | 0.14 | 1.01 | 0.18 |
| <i>Larrea tridentata</i> | 5.41 | 0.71 | 1.59 | 0.29 | 2.26 | 0.33 |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 8.75 | 0.58 | 5.10 | 0.36 | 2.90 | 0.37 |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 5.56 | 0.30 | 4.28 | 0.40 | 2.40 | 0.18 |
| <i>Schinus molle</i> | 4.51 | 0.48 | 4.27 | 0.45 | 4.01 | 0.63 |
| <i>Xanthium strumarium</i> | 13.75 | 2.45 | 4.11 | 0.61 | 2.21 | 0.43 |

± Desviación estándar.

6.2.2 Peso

Los valores de peso de 100 semillas y número de semillas por kilogramo, reportados en el Cuadro 6, indican que las semillas de la especie con mayor peso fueron las de *Jatropha dioica* (154.6 g), esto debido a que, como se mencionó anteriormente, fueron las semillas que presentaron el mayor tamaño. Por otra parte, las semillas provenientes de *Eruca sativa* fueron las más livianas (0.072 g), que como ya se dijo fueron las de menor tamaño. Por razones obvias, *Jatropha dioica* presentó el menor número de semillas por kilogramo, en tanto que el mayor valor correspondió a *Eruca sativa*.

Cuadro 6. Peso promedio de semillas y número de semillas por kilogramo.

| Especie | Promedio peso 100 semillas(g) | ± | No. semillas/kg |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------|
| <i>Argemone mexicana</i> | 0.260 | 0.0098 | 384123 |
| <i>Acacia farnesiana</i> | 10.6000 | 0.2080 | 9434 |
| <i>Apodanthera undulata</i> | 12.638 | 1.263 | 7913 |
| <i>Agave</i> | 0.8300 | 0.0450 | 120482 |
| <i>Bidens odorata</i> | 0.139 | 0.0015 | 721154 |
| <i>Brassica sp.</i> | 0.0820 | 0.0830 | 1219512 |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | 3.7013 | 0.0368 | 27017 |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | 17.3150 | 0.0360 | 5775 |
| <i>Datura ferox</i> | 0.797 | 0.027 | 125471 |
| <i>Datura inoxia</i> | 0.9413 | 0.0181 | 106232 |
| <i>Eruca sativa</i> | 0.0723 | 0.0029 | 1382488 |
| <i>Heliantus annuus</i> | 0.626 | 0.0616 | 159744 |
| <i>Jatropha dioica</i> | 154.60 | 1.95 | 647 |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 0.1850 | 0.0036 | 540541 |
| <i>Larrea tridentata</i> | 0.5077 | 0.0345 | 196980 |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 3.1970 | 0.0850 | 31279 |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 3.5277 | 0.0596 | 28347 |
| <i>Schinus molle</i> | 2.6537 | 0.0222 | 37684 |
| <i>Xantum strumarium L.</i> | 5.6120 | 0.0357 | 17819 |

± Desviación estándar.

6.3 Rendimiento de semilla y aceite

Respecto a los resultados obtenidos de rendimientos de semilla y su producción de aceite potencial de las especies estudiadas, el análisis de varianza realizado muestra que existen diferencias estadísticas entre los rendimientos de semilla y aceite. La especie que presentó el mayor rendimiento de semilla fue *Agave* sp., con 24,305 kg ha⁻¹, el cual fue estadísticamente diferente al resto de los rendimientos (Cuadro 7). Sin embargo, el caso del *Agave* es especial ya que la etapa de madurez en las especies grandes se da entre los 10 y 25 años, mientras que en las especies pequeñas es entre los cuatro y cinco

años (García-Mendoza, 2002). Aun asumiendo un periodo promedio de ocho años para la fructificación, esta especie tendría uno de los rendimientos anuales de semilla más altos (3,038 kg ha⁻¹) en relación al resto de las especies. Un caso extremo lo representa *Larrea tridentata*, que debido al peso tan liviano de sus semillas presenta un rendimiento anual estimado de semillas menor a 1 kg ha⁻¹.

Cuadro 7. Variables agroproductivas de las especies estudiadas.

| Especie | Densidad (Plantas 100 m ⁻²) | Ramas | Frutos | Semillas por fruto | Semilla (g m ⁻²) | Semilla (kg ha ⁻¹)* |
|--------------------------------|---|-------|--------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <i>Acacia farnesiana</i> | 1.6 | - | 17.22 | 11 | 3.6 | 36.1 c |
| <i>Argemone mexicana</i> | 950.0 | 2.8 | 4.34 | 500 | 518.1 | 5,180.6 b |
| <i>Apodanthera undulata</i> | 20.0 | 4.5 | 5.50 | 90 | 232.6 | 2,326.5 c |
| <i>Agave</i> sp. | 1.5 | - | 175.00 | 307 | 2,430.5 | 24,305.5 a |
| <i>Bidens odorata</i> | 660.0 | 2.8 | 15.02 | 16 | 4.2 | 41.8 c |
| <i>Brassica</i> sp. | 550.0 | 3.5 | 9.83 | 30 | 12.8 | 127.9 c |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | 450.0 | 4.5 | 4.50 | 100 | 76.2 | 761.9 c |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | 550.0 | 4.5 | 5.50 | 22 | 2.4 | 23.6 c |
| <i>Datura ferox</i> | 300.0 | 2.7 | 15.50 | 150 | 40.0 | 400.5 c |
| <i>Datura innoxia</i> | 440.0 | 4.0 | 7.17 | 150 | 130.6 | 1,306.1 c |
| <i>Eruca sativa</i> | 680.0 | 3.8 | 30.42 | 26 | 4.0 | 40.5 c |
| <i>Heliantus annuus</i> | 500.0 | 8.9 | 23.67 | 102 | 40.1 | 401.5 c |
| <i>Jatropha dioica</i> | 1,500.0 | 17.4 | 2.00 | 1 | 34.0 | 340.1 c |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 600.0 | 3.1 | 2.17 | 100 | 13.2 | 131.7 c |
| <i>Larrea tridentata</i> | 60.0 | - | 116.40 | 5 | 0.1 | 0.8 c |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 1.5 | - | 140.00 | 11 | 5.6 | 56.3 c |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 230.0 | 5.0 | 26.75 | 51 | 207.1 | 2,071.4 c |
| <i>Schinus molle</i> | 0.2 | - | - | 1 | 73.5 | 735.4 c |
| <i>Xanthium strumarium</i> | 367.0 | 1.3 | 5.17 | 2 | 5.6 | 55.7 c |

* Rendimiento estimado en una hectárea.

Martínez-Valencia *et al.* (2011) hacen referencia a rendimientos (en kg ha⁻¹) de semillas oleaginosas de cultivos comerciales como palma (*Elaeis guineensis*) (12,246), coco (*Cocos nucifera*) (4,645), tung (*Aleurites fordii*) (2,409), higuera (*Ricinus communis*) (2,060), piñón (*Jatropha curcas*) (1,900), colza (*Brassica napus*) (2,081), cacahuate (*Arachis hypogaea*) (1,582), girasol (*Helianthus annuus*) (1,419) y soya (*Glycine max*) (1,677). Estos rendimientos de semilla son comparables a los estimados (en kg ha⁻¹) para las especies *Argemone mexicana* (5,180), *Apodanthera undulata* (2,365), *Agave* sp (3,038 –anual), *Datura innoxia* (1,306) y *Proboscidea louisianica* (2,071).

El rendimiento estimado para *Argemone mexicana* (5,180 kg ha⁻¹) es superior al reportado por Singh (2010) de 460 kg ha⁻¹. Por otra parte, (uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/oleaginosas/girasol.pdf) mencionan que cultivos comerciales como girasol tienen rendimientos de semilla de 2,300 kg ha⁻¹, los cuales son superiores a los rendimientos estimados para la mayoría de especies analizadas en este trabajo, incluyendo, al rendimiento del girasol silvestre (401 kg ha⁻¹). Mazzani (2007) señala que *R. communis* llega a producir entre 350 y 700 kg ha⁻¹ con cuidados mínimos al cultivo y hasta 1250 kg ha⁻¹ con empleo de tecnología avanzada. Machado *et al.* (2012) evaluaron diferentes accesiones de esta misma especie y encontraron rendimientos de hasta 4,398 kg ha⁻¹.

El contenido de aceite de las semillas de las especies estudiadas, así como el rendimiento potencial de aceite, estimado a partir del rendimiento de semillas, se muestran en el Cuadro 8. En la Figura 35, se aprecia que las semillas de seis especies tienen contenidos de aceite mayores a 30%, siendo estas *C. ficifolia* (34.1), *C. foetidissima* (33.9), *P. louisianica* (33.6), *A. undulata* (31.4), *J. diodica* (32.8) y *Brassica* sp. (30.3). Porcentajes que en general son menores a los reportados por Martínez-Valencia *et al.* (2011) para cultivos oleaginosos comerciales como girasol (*Helianthus annuus*) (45-55%), canola (*Brassica napa*) (40-44%), palma (*Elaeis guineensis*) (44-57%), coco (*Cocos nucifera*) (65-75%), cacahuete (*Arachis hypogaea*) (48-50%) y cártamo (*Carthamus tinctorius*) (35-40%); así como al reportado por Calderón *et al.* (2013) para palma de 51%. Por otra parte, los mejores rendimientos estimados, se ubican dentro de los rangos de contenido de aceite reportados de 31 a 49% para algunas accesiones de *Jatropha curcas* (Cruz *et al.*, 2015), de 20 a 60% para esta misma planta y de 26 a 66% para *Ricinus communis* (Martínez-Valencia *et al.*, 2011), y de 29.3 y 36% para algunas variedades de colza (Del Gatto *et al.*, 2015). No obstante, son

superiores a los rendimientos de soya (*Glycine max*) (18-20%) y algodón (*Gossypium hirsutum*) (18-25%), reportados por Martínez-Valencia *et al.* (2011). En la Figura 35, se aprecia que seis de las especies utilizadas tienen porcentajes de aceite entre 10 y 30 y siete resultaron con un contenido de aceite menor al 10%.

Cuadro 8. Producción potencial de aceite.

| Especie | Contenido de aceite (%) | Rendimiento de aceite (g m ⁻²) | Rendimiento de aceite (kg ha ⁻¹)* |
|--------------------------------|-------------------------|--|---|
| <i>Acacia farnesiana</i> | 3.33 | 12.03 | 120.30 b |
| <i>Argemone mexicana</i> | 25.40 | 131.59 | 1315.90 a |
| <i>Apodanthera undulata</i> | 31.40 | 74.31 | 743.10 ab |
| <i>Agave</i> sp. | 2.10 | 2.37 | 23.70 b |
| <i>Bidens odorata</i> | 6.20 | 0.26 | 2.60 b |
| <i>Brassica</i> sp. | 30.33 | 3.88 | 38.80 b |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | 34.10 | 25.98 | 259.80 b |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | 33.90 | 2.79 | 27.90 b |
| <i>Datura ferox</i> | 9.73 | 4.01 | 40.10 b |
| <i>Datura inoxia</i> | 18.60 | 24.29 | 242.90 b |
| <i>Eruca sativa</i> | 16.93 | 0.71 | 7.10 b |
| <i>Heliantus annuus</i> | 11.07 | 4.90 | 49.00 b |
| <i>Jatropha dioica</i> | 32.86 | 10.68 | 106.80 b |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 20.60 | 2.64 | 26.40 b |
| <i>Larrea tridentata</i> | 2.07 | 0.002 | 0.02 b |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 2.93 | 0.19 | 1.90 b |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 33.60 | 73.02 | 730.20 ab |
| <i>Schinus molle</i> | 7.27 | 5.35 | 53.50 b |
| <i>Xanthium strumarium</i> | 20.46 | 1.20 | 12.00 b |

* Producción estimada en una hectárea.

Se observa en el Cuadro 8 que *A. mexicana* resultó la especie con el mayor rendimiento de aceite con 1,315 kg ha⁻¹, el cual es estadísticamente diferente al resto de los rendimientos (DSH = 773.2). Este rendimiento de aceite es tan competitivo o mejor que varios cultivos comerciales que se utilizan en la producción de biodiesel, entre ellos soya (*Glycine max*) (335 kg ha⁻¹), girasol (*Helianthus annuus*) (568 kg ha⁻¹), cacahuate (*Arachis hypogaea*) (712 kg ha⁻¹), colza (*Brassica napus*) (832 kg ha⁻¹), piñón (*Jatropha curcas*) (950 kg ha⁻¹), higuera (*Ricinus communis*) (1133 kg ha⁻¹), tung (*Aleurites fordii*) (1204 kg ha⁻¹), rendimientos reportados por Martínez-Valencia *et al.* (2011).

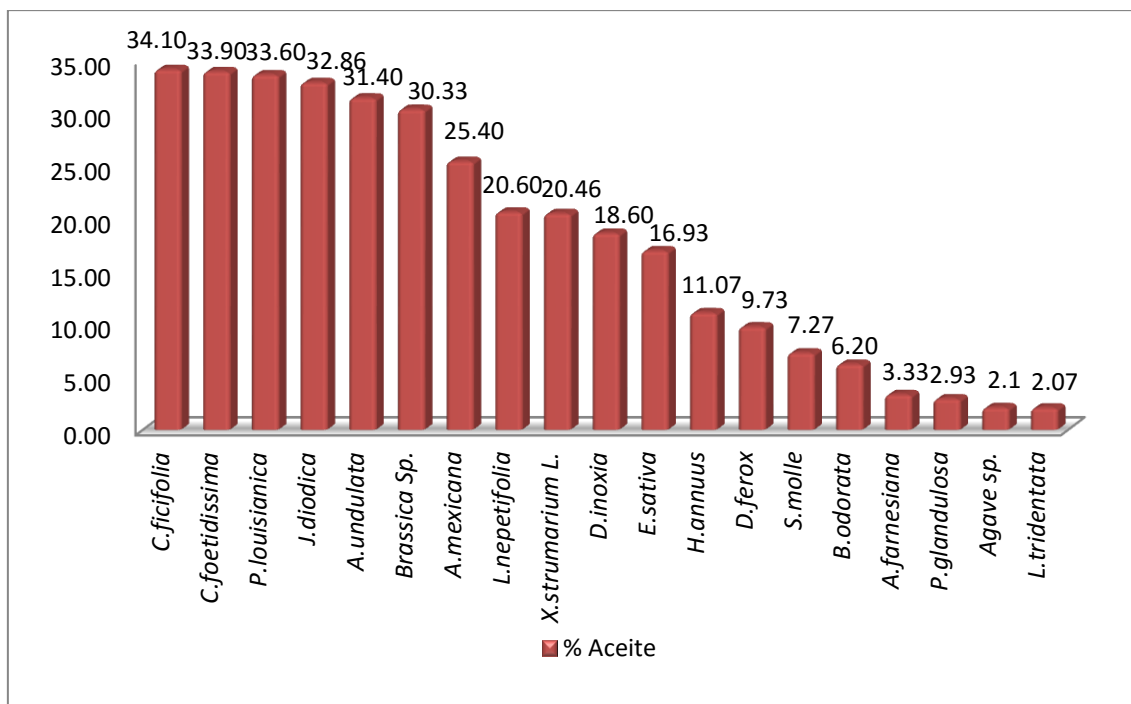


Figura 35. Contenido de aceite en las semillas de las especies de plantas colectadas.

Las especies *A. undulata* y *P. louisianica* mostraron rendimientos interesantes de aceite de 743 y 730 kg ha⁻¹, respectivamente, lo cual se explica por su número de frutos, tamaño y cantidad semillas y en especial por su contenido de aceite superior a 30%. Estos valores, no obstante, son más bajos al rendimiento de aceite de 5,772 L ha⁻¹ obtenido en girasol por el INTA (1997), pero cercanos a los 1,466 L ha⁻¹ reportados por Reborá y Gómez (2007) para colza. El rendimiento potencial de aceite de 1,315.9 kg ha⁻¹ estimado para *A. mexicana* es un valor muy superior al encontrado por Singh (2010) de 190 L ha⁻¹. Este rendimiento de aceite es también superior al obtenido en *R. communis* de 1,130.2 kg ha⁻¹ (Machado *et al.* 2012).

Si se considera que los rendimientos de semilla mostrados en el Cuadro 7 fueron estimados en base a las densidades de plantas observadas en condiciones naturales, se podría suponer que con un manejo agronómico apropiado y con altas densidades de

población, los rendimientos de semilla, y por lo tanto de aceite, se incrementarían sustancialmente, lo que ampliaría el número de especies con rendimientos atractivos de aceite

La Figura 36 muestra a las 19 especies utilizadas en este estudio con sus rendimientos respectivos de semilla y aceite. En ella resalta la tendencia mostrada por *A. mexicana*, que exhibe una combinación de alto rendimiento de semilla (5,180 kg ha⁻¹) y alto rendimiento de aceite (1,315 kg ha⁻¹). En contraste, *Agave* sp cuenta con un rendimiento alto de semilla (3,038 kg ha⁻¹ año⁻¹) combinado con uno bajo de aceite (23.7 kg ha⁻¹). Lo anterior, se debe a las diferencias en los contenidos de aceite en las semillas, pues mientras las de *A. mexicana* tienen un 25.4% de aceite, las de *Agave* sp solo contienen el 2.1%. Debido a estas diferencias en los contenidos de aceite de las semillas, no existe una tendencia a obtener mayores rendimientos de aceite, a medida que las especies presentan mayores rendimientos de semilla, como se observa en la Figura 36. Esta débil relación entre las dos variables se confirma por el bajo valor del coeficiente de correlación ($r = 0.10$) obtenido entre los rendimientos de semilla y aceite (Cuadro 9).

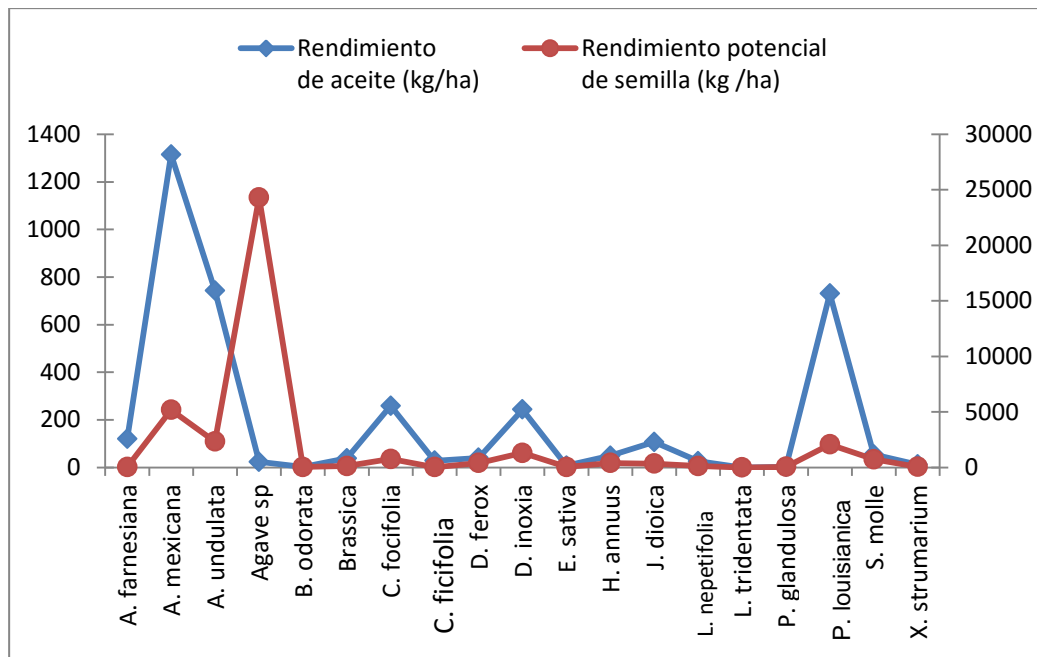


Figura 36 Relación entre rendimiento potencial de semilla y de aceite

En el Cuadro 9, se presentan el resto de correlaciones entre las variables medidas en campo para las especies muestreadas. En general, se aprecia que las relaciones entre las variables incluidas son débiles. De todas ellas, las dos que muestran la mayor relación ($r = -0.65$) entre ellas, fueron la altura de planta y el porcentaje de aceite contenido en las semillas, cuyo coeficiente de correlación indica que a mayor altura de planta menor fue el contenido de aceite en las semillas, o viceversa, es decir, las semillas de las plantas de pirúl y las arbustivas mostraron la tendencia a presentar menores contenidos de aceite en las semillas, con relación a los contenidos de aceite en las semillas de las plantas herbáceas. Otras tendencias, aunque no fuertes, son las relaciones positivas observadas entre el porcentaje de aceite en las semillas y el rendimiento de aceite ($r = 0.45$), la cual resulta lógica, así como, entre el peso de 100 semillas y el porcentaje de aceite en las semillas ($r = 0.35$), que indica una ligera tendencia, a obtener un mayor contenido de aceite en las semillas de mayor peso o de mayor tamaño. También, se encontró una

relación negativa ($r = -0.39$) entre las variables altura de planta y densidad de plantas, que indica una tendencia a encontrar densidades bajas de plantas conforme la altura de las mismas se incrementa, lo cual era de esperarse.

Cuadro 9. Matriz de correlación de las variables de campo

| | AP | DPL | ALT | RSE | RAC | PSE | %AC |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| AP | 1 | | | | | | |
| DPL | -0.39 | 1 | | | | | |
| ALT | -0.11 | 0.10 | 1 | | | | |
| RSE | -0.04 | -0.19 | -0.03 | 1 | | | |
| RAC | -0.31 | 0.09 | 0.32 | 0.10 | 1 | | |
| PSE | -0.19 | -0.09 | 0.31 | -0.09 | -0.04 | 1 | |
| %AC | -0.65 | 0.06 | 0.05 | -0.23 | 0.45 | 0.35 | 1 |

AP = Altura de planta; DPL = Densidad de plantas; ALT = Altitud; RSE = Rendimiento de semilla; RAC = Rendimiento de aceite; PSE = Peso de 100 semillas; %AC = % de aceite en la semilla.

Mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) se elaboró la Figura 37, utilizando los dos primeros componentes. La figura muestra que las variables de campo que más influyen en el porcentaje y rendimiento de aceite son, la densidad de plantas y el peso de 100 semillas, de tal manera que las especies *A. mexicana*, *D. inoxia*, *A. undulata*, *P. louisianica*, *C. ficifolia*, *C. foetidissima* y *J. dioica*, se encuentran agrupadas, por lo que se infiere un comportamiento similar de estas especies. Las especies con mayor altura como *S. molle*, *A. farnesiana*, *Agave* sp, *L. tridentata* y *P. glandulosa* se relacionan con bajas densidades, bajos contenidos y rendimientos de aceite. Asimismo, se observa la relación negativa entre la variable altura de planta y el contenido y rendimiento de aceite, puesto que ninguna de las especies arbóreas y arbustivas presentó alto contenido de aceite en las semillas. Sin embargo, se observa una tendencia a que las plantas con mayor altura presenten los mayores rendimientos estimados de semillas. Todos estos resultados obtenidos con el ACP, confirman los anteriores resultados.

En cuanto a los componentes principales, en el Cuadro 10 se aprecia que los dos primeros explican en conjunto un total de 49% de la variabilidad contenida en los datos. La información del cuadro indica a partir de los primeros cuatro componentes se explicaría el 81% de la variación en los datos. Por su parte, el Cuadro 11 muestra las variables que mayor peso tienen en cada uno de los componentes de acuerdo al valor de los autovectores. Así, el primer componente, que explica un 32% de la variación total, se relaciona con plantas cuyas semillas contienen altos porcentajes de aceite (0.56) y que son de porte bajo o herbáceas (-0.54). El segundo componente se asocia a plantas que presentan altas densidades (0.60) que producen semillas de poco peso o tamaño (-0.58). Plantas con altos rendimientos de semilla (0.74) y de aceite (0.51) representan al tercer componente. Finalmente, se podría decir que el cuarto componente lo define la altura sobre el nivel del mar (0.70) en que las plantas se distribuyen.

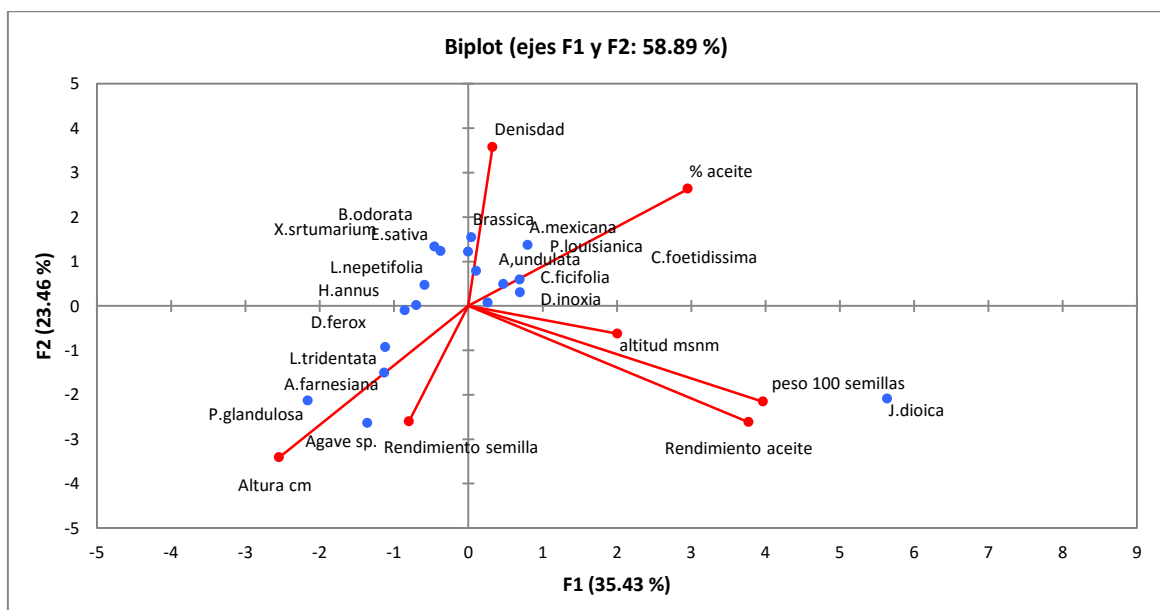


Figura 37. Gráfico de las 19 especies vegetales y principales variables con los componentes principales 1 y 2.

Cuadro 10. Autovalores del Análisis de Componentes Principales.

| Componente principal | Valor | Proporción | Proporción acumulada |
|----------------------|-------|------------|----------------------|
| 1 | 2.24 | 0.32 | 0.32 |
| 2 | 1.23 | 0.18 | 0.49 |
| 3 | 1.18 | 0.17 | 0.66 |
| 4 | 1.03 | 0.15 | 0.81 |
| 5 | 0.82 | 0.12 | 0.93 |
| 6 | 0.36 | 0.05 | 0.98 |
| 7 | 0.14 | 0.02 | 1.00 |

Cuadro 11. Autovectores del Análisis de Componentes Principales.

| Variable | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Altura de planta | -0.54 | -0.25 | -0.10 | 0.19 |
| Densidad de plantas | 0.25 | 0.60 | -0.09 | 0.49 |
| Rendimiento de aceite | 0.41 | -0.05 | 0.51 | 0.09 |
| Rendimiento de semilla | -0.12 | -0.19 | 0.74 | -0.15 |
| Peso 100 semillas | 0.28 | -0.58 | -0.40 | -0.07 |
| Porcentaje de aceite | 0.56 | 0.00 | -0.10 | -0.44 |
| Altura sobre el nivel del mar | 0.27 | -0.45 | 0.08 | 0.70 |

6.4 Caracterización físico-química del aceite

De acuerdo a Martínez-Valencia *et al.* (2011), la eficiencia en la elaboración del biodiesel y su calidad, dependen del proceso de transesterificación y de la calidad del aceite vegetal utilizado como insumo, el cual debe contener una baja concentración de ácidos grasos libres, una alta proporción de ácidos grasos monoinsaturados, sin presencia de gomas e impurezas, entre otras propiedades. Por su parte, Martínez-Sánchez *et al.* (2015) mencionan que las propiedades químicas más utilizadas para clasificar y determinar la calidad comercial de los aceites son los índices de yodo, saponificación, peróxidos y acidez; dentro de las propiedades físicas señalan la gravedad específica, el índice de refracción, el punto de fusión y la densidad. Los valores de los índices considerados en el presente estudio para caracterizar los aceites

obtenidos se muestran en el Cuadro 12. En función de la disponibilidad de aceite de cada una de las especies estudiadas fueron las pruebas realizadas.

Cuadro 12. Características físico-químicas de los aceites vegetales.

| Especie | IR | IS (mg KOH g ⁻¹) | IY (g I ₂ 100 g ⁻¹) | IA % (ácido oleico) | IP (meq kg ⁻¹) |
|--------------------------------|--------|---------------------------------|---|------------------------|-------------------------------|
| <i>Acacia farnesiana</i> | 1.4768 | | 60.68 | | |
| <i>Argemone mexicana</i> | 1.4730 | 119.31 | 117.94 | 11.71 | 0.39 |
| <i>Apodanthera undulata</i> | 1.4870 | 141.48 | 123.80 | 11.25 | 0.75 |
| <i>Agave sp.</i> | 1.4762 | | | | 0.68 |
| <i>Bidens odorata</i> | 1.4725 | 149.81 | 96.57 | | 1.62 |
| <i>Brassica sp.</i> | 1.4715 | 174.17 | 29.45 | 3.13 | 0.79 |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | 1.4748 | | 73.12 | 0.68 | 1.08 |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | 1.4750 | 180.02 | 141.26 | 11.51 | 0.47 |
| <i>Datura ferox</i> | 1.4700 | 142.31 | | 29.66 | |
| <i>Datura inoxia</i> | 1.4720 | 146.22 | 114.95 | 8.70 | 1.06 |
| <i>Eruca sativa</i> | 1.4780 | 129.64 | 97.59 | 4.24 | |
| <i>Heliantus annuus</i> | 1.4723 | 152.27 | 29.68 | 7.69 | 0.77 |
| <i>Jatropha dioica</i> | 1.4725 | | 113.49 | | |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | 1.4658 | 149.93 | 30.95 | 36.17 | 0.47 |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | 1.4757 | | | | |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | 1.4735 | 182.83 | 116.65 | 3.50 | 0.72 |
| <i>Schinus molle</i> | 1.4850 | | 99.40 | 26.80 | 0.79 |
| <i>Xanthium strumarium</i> | 1.4750 | | 23.35 | 1.79 | 0.67 |

IR = Índice de refracción; IS = Índice de saponificación; IY = Índice de yodo; IA = Índice de acidez; IP = Índice de peróxidos.

6.4.1 Índice de refracción (IR)

Los índices de refracción (IR) de los aceites de las plantas estudiadas (Cuadro 12) arrojaron valores muy similares entre todas las especies, con valores que se encuentran entre 1.4730 y 1.4870. La mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de valores de este índice reportado por la A.S.T.M. (2008) para el aceite de *Ricinus communis*, que es de 1.47 o muy cercanos, el cual es utilizado en la producción de biodiesel. Las especies que más se acercaron a este valor de 1.47 fueron *Datura ferox*

(1.4700), *Brassica* sp. (1.4715), *Datura inoxia* (1.4720), *Heliantus annuus* (1.4723), *Bidens odorata* (1.4725) y *Jatropha dioica* (1.4725).

6.4.2 Índice de saponificación

Danlami *et al.* (2015) reportan, para *Ricinus communis*, índices de saponificación (IS) de 174.6, 176.3 y 173.8 mg KOH g⁻¹, valores que son muy parecidos a los que se obtuvieron en especies como *Cucurbita foetidissima*, *Proboscidea louisianica* y *Brassica* sp. (Cuadro 12). Los IS de los aceites de estas tres especies coinciden o son similares a aquellos del girasol, colza y ricino mencionados por Corpodib (2015). Para la industria de los cosméticos, Ruiz y Huesa (1991) reportaron valores de IS de 180 a 190 mg KOH g⁻¹ para el aceite de Karité (*Butyruspermum parki*), la cual es una de las plantas más utilizada actualmente en esta industria, valores de (180-190 mg KOH g⁻¹), que son similares a los aceites de *Cucurbita foetidissima* (180.02 mg KOH g⁻¹) y *Proboscidea louisianica* (182.83 mg KOH g⁻¹), lo que posibilita a los aceites de estas plantas para su posible uso en la industria de los cosméticos.

6.4.3 Índice de acidez

Martínez-Valencia *et al.* (2011), afirman que valores mayores del 5% de índice de acidez (IA) indican que el aceite contiene alta cantidad de ácidos grasos libres, generado por un alto grado de hidrólisis, lo cual afecta negativamente de varias maneras la eficiencia de la transesterificación en el proceso de producción de biodiesel. En el Cuadro 12 se aprecia que el aceite de las especies con IA menor de 5 % son *Cucurbita ficifolia* (0.68 %), *Brassica* sp. (3.13 %), *Eruca sativa* (4.24 %), *Proboscidea louisianica* (3.50 %) y *Xanthium strumarium* (1.79 %), lo que los hace aptos para la elaboración de biodiesel, sin necesidad de llevar a cabo un pretratamiento del aceite

para neutralizar los ácidos grasos libres. El aceite del resto de las especies presenta IA mayores de 5 %, de las cuales *Datura ferox*, *Leonotis nepetifolia* y *Schinus molle* presentaron los valores mayores con 29.66, 36.17 y 26.80 %, respectivamente. Otros aceites utilizados para elaborar biodiesel como el de soya muestran un IA de 1.5 % (Pinzi *et al.*, 2009), en tanto que los de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), piñón mexicano (*Jatropha curcas*) e higuierilla (*Ricinus communis*) presentan valores para este índice de 4.95, 3.19 y 1.77 %, respectivamente (Martínez-Valencia *et al.*, 2011).

6.4.4 Índice de Yodo

Los índices de yodo (IY) que resultaron para los aceites de las especies estudiadas, existen por su grado de insaturación, secantes, semi secantes y no secantes. Los aceites no secantes por su bajo índice de yodo son los de *A. farnesiana*, *B. odorata*, *Brassica* sp., *C. ficifolia*, *E. sativa*, *H. annuus*, *L. nepetifolia*, *S. molle* y *X. strumarium*. Estos aceites por sus características no solidificarán. Los semisecantes son los de *A. undulata*, *A. mexicana*, *D. inoxia*, *J. dioica* y *P. louisianica*, que se encuentran a la par de aceites comerciales como el de ajonjolí y el maíz (Ortega y Vázquez, 1993).

Por otro lado los aceites secantes se utilizan principalmente en la industria, para la producción de pinturas y barnices, por lo regular son los que cuentan con IY alto (Bailey, 1984). Para este fin se podrían utilizar las plantas *C. foetidissima*, *J. dioica*, *D. inoxia*, y *P. louisianica* ya que cuentan con índices de yodo de 141.26, 113.49, 114.95 y 116.65 respectivamente. Por su parte Armendáriz *et al.* (2015). mencionan para biodiesel producido a partir de *R. communis* un IY de 85, valores similares a los de *B. odorata*, *C. ficifolia*, *E. sativa* y *S. molle* (Cuadro 12).

Para la industria del biodiesel, según la norma europea EN-14214 menciona que un aceite a mayor IY menor será el número de cetano en el biodiesel, lo que se verá

reflejado en una baja calidad de combustión (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Con esto, especies como *A. farnesiana*, *Brassica sp.*, *H. annuus*, *L. nepetifolia* y *X. strumarium* al contar con un IY bajos ($< 30 \text{ g}_2 \text{ 100g}^{-1}$) podrían tener una buena calidad de combustión si sus aceites se hicieran biodiesel.

6.4.5 Índice de peróxidos

Los peróxidos son conocidos como los compuestos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas y aceites (Gómez, 2010), por lo que aquellos valores cercanos a 0 muestran que los aceites de las especies estudiadas tienen un nivel de rancidez bajos, es decir, que se oxidan lentamente, lo que provocaría que éstos conserven por más tiempo su calidad, dándoles una ventaja para su posible destinación para diferentes usos. Dado que un alto índice de peróxido indica proceso de oxidación en marcha, por lo que aceites de la mayoría de las especies estudiadas presentaron un IP menor a 1, lo que indica que no están oxidados, por lo cual se podrían utilizar para biodiesel.

6.5 Espectrometría FTIR

Se determinó el espectro de los estándares de los ácidos grasos Palmítico, Oleico, Linoleico y Linolenico (Figura 37). Donde se observa que, el Palmítico expresa en la huella dactilar siete picos ubicados en la región $1187\text{-}1319 \text{ cm}^{-1}$, que lo diferencian de los otros ácidos grasos los cuales no presentaron esos picos característicos; el pico 147 es más grande que en los otros ácidos grasos. Por su parte en el pico ubicado en la región 2913 cm^{-1} el cual es el característico del grupo funcional CH_2 que es parte de la estructura hidrocarbonada de los ácidos grasos, muestra una diferencia notoria a los picos de los otros ácidos grasos en la misma región. Estos ácidos grasos presentan una vibración en la región 1700 cm^{-1} la cual es correspondiente al grupo $\text{C}=\text{O}$. para el grupo del metil éster con enlace ($\text{O}-\text{CH}_3$) la vibración correspondiente estuvo en la región

1438 cm^{-1} . En la región 1031 se encuentra la banda característica del triglicérido ($-\text{O}-\text{CH}_2-$). De esta manera se conformó el patrón de pureza de los estándares y permitió comprarlos con las muestras de aceites de las especies estudiadas.

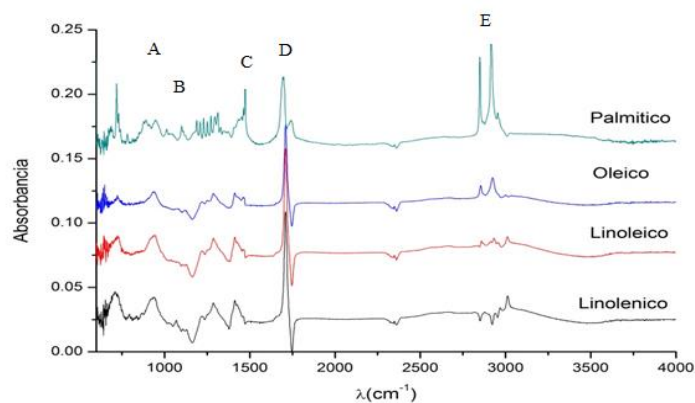


Figura 37. Espectro de infrarrojo de los ácidos grasos utilizados.

A) $-\text{O}-\text{CH}_2-$, B) $-\text{O}-\text{CH}_2-$, C) $\text{C}=\text{O}_g$, D) $\text{O}-\text{CH}_3$, E) CH_2

De acuerdo al espectro de los ácidos grasos que se muestra en el Cuadro 13, el resultado de los espectros de los aceites de las especies estudiadas, fueron los más parecidos al ácido graso de interés. Donde claramente se aprecia que los ácidos grasos Oleico y Palmítico son los más comunes en la mayoría de las especies. En el caso de *C.foetidissima*, *A.undulata* y *J.dioica* presentaron a los ácidos linoleico y linoleico, los cuales son ácidos grasos importantes en la dieta ya que el cuerpo no los sintetiza, lo que les da un mayor valor para su posible uso como aceites comestibles (Koolman J, 2004)

Cuadro 13. Principales ácidos grasos presentes en los aceites de las especies estudiadas.

| Especie | Oleico | Linoleico | Linolénico | Palmítico |
|--------------------------------|--------|-----------|------------|-----------|
| <i>Acacia farnesiana</i> | | | X | |
| <i>Argemone mexicana</i> | X | | | |
| <i>Apodanthera undulata</i> | | | X | |
| <i>Agave sp.</i> | | | | X |
| <i>Bidens odorata</i> | X | | | |
| <i>Brassica sp.</i> | | | | X |
| <i>Cucurbita ficifolia</i> | X | | | |
| <i>Cucurbita foetidissima</i> | X | X | X | |
| <i>Datura ferox</i> | | | | X |
| <i>Datura inoxia</i> | | | | |
| <i>Eruca sativa</i> | X | | | X |
| <i>Helianthus annuus</i> | X | | | X |
| <i>Jatropha dioica</i> | | X | | |
| <i>Leonotis nepetifolia</i> | X | | | |
| <i>Larrea tridentata</i> | | | | X |
| <i>Prosopis glandulosa</i> | X | | | |
| <i>Proboscidea louisianica</i> | | | | X |
| <i>Xanthium strumarium</i> | | | | X |

7 CONCLUSIONES

Las especies estudiadas tienen características agroproductivas que las diferencian entre sí, esto por el tipo de planta, densidad y distribución, principalmente.

Agave sp presentó el mayor rendimiento de semillas, sin embargo, su bajo contenido de aceite y su largo periodo de madurez vuelven a esta planta poco atractiva para producción de aceite.

En cuanto a la caracterización morfológica de las semillas, *Cucurbita ficifolia* presentó las semillas más largas y más anchas, en tanto que las de *Jatropha dioca* fueron las de mayor espesor, lo que finalmente les confirió el ser las semillas con mayor peso.

Las semillas con mayores porcentajes de aceite correspondieron a las especies *Apodanthera undulata* (31.4), *Brassica* sp (30.3), *Cucurbita ficifolia* (34.1), *Cucurbita foetidissima* (33.9), *Jatropha dioca* (32.9) y *Proboscidea louisianica* (33.6), lo que las hace atractivas para la producción comercial de aceite.

Debido a la variabilidad presente en las características físicas y químicas de los aceites, fue posible identificar usos en la industria alimenticia, farmacéutica y cosmetológica, además de la bioenergética.

Los aceites de *Apodanthera undulata*, *Cucurbita foetidissima* y *Jatropha dioca* contienen ácido linoleico o linolénico o ambos, los cuales son comestibles y con un alto potencial antioxidante, nutracéutico y funcional, y son importantes en la dieta humana porque el cuerpo humano no los sintetiza. Por otra parte, los ácidos grasos oleico y palmítico están presentes en la mayoría de los aceites.

8 LITERATURA CITADA

- Aguillón, J., Islas, J., Martínez, A, y Riegelhaupt, E. 2010. Energías alternativas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México. Academia Mexicana de Ciencias, primera edición, México. 41-50.
- American Society for Testing Materials. 2008. <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D6751-08.htm>. 01/01/ 2016
- Ariharan, V. N., Gopu, S.T., Meena, V.N, y Prased, P.N. 2014. Studies on *Argemone mexicana* oil for its usage as biodiesel. International Journal of Pharma and biosciences. 5:528-532.
- Armendáriz, J., La Puerta, M., Zavala, F., García-Zambrano, E. y Del Carmen, M. 2015. Evaluation of eleven genotypes of castor oil plant (*Ricinus communis* L.) Industrial Crops and Products. 77:484–490.
- Bailey, E. 1984. Aceites y grasas industriales Editorial Reverté, S.A ISBN-84-291-7901-1. España. 740 p.
- Benjumea, P., Agudelo, J, y Ríos, A. 2009. Biodiesel: producción, calidad y caracterización. ISBN 958-714-347-8. 141 pp.
- Benjumea, P., Agudelo, J.R. y Agudelo, A. .F. 2011. Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on engine performance, combustion characteristics, and emissions. Energy Fuels. 25:77–85.
- Bioenergy Research Center 2005. DOE genomics: GTL systems biology for energy and environment. Report No. DOE/SC-0104.
- Charcas S., H., J.L. Flores F., J. Fortanelli M., J.A. Reyes A., M. Fernández R., E. Mellink B., L.E. Lugo B., H. García E. 1988. Propuesta teórico metodológica para el desarrollo de las actividades del CREZAS-CP. Colegio de Postgraduados. Salinas de Hgo., SLP. 64 p.
- Universidad Autónoma de Chapingo 2011. Carta. Actualización de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México, a escala regional. Departamento de suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo.
- CONABIO 2015a. <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees.html>.
- CONABIO 2015b. Malezas de México.
<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2014. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del área natural protegida de competencia de la

Federación con la categoría de Reserva de la Biosfera “Desierto Semiárido de Zacatecas”, ubicada en el estado de Zacatecas, 303 páginas, incluyendo 10 anexos.

Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (CORPODIB). 2003. Programa estratégico para la producción de biodiesel - combustible vegetal a partir de aceites vegetales: evaluación de las variedades más promisorias para la producción de aceite vegetal y su potencial implementación en Colombia.
<http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Capitulo%202.pdf>. Consultado 24 junio 2016.

Cruz, R., B. A., Pérez-Vázquez, A., García P., E., Gallardo L., F. y Marcos S., R. 2015. Análisis químico morfológico comparativo de accesiones de *Jatropha curcas* L. del estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(3):589-601.

Correl, D. y Johnston, M. 1970. *Manual of the vascular plants of Texas*. Texas Research Foundation. Renner, Texas.

Cuellar-Sánchez, A., Carrillo-González, R., Delgado-Alvarado, A. y González-Chávez, M. 2016. Propiedades Agroproductivas de *Ricinus communis* L. y Caracterización Fisicoquímica del aceite. *Agroproductividad*: (9) 3:73-78.

Da Silva, F., Barbosa de Lima, A., Ramos da Costa., Bezerra Filho. C. y Bezerra Grilo. M. 2013. *Alternative Energies Advanced Structured Materials* 34, DOI: 10.1007/978-3-642-40680-5_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 47-68.

Danlami, J., Arsad, A y Zaini, M. 2015. Characterization and process optimization of castor oil (*Ricinus communis* L.) extracted by the soxhlet method using polar and non-polar solvents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 47, February 2015, Pages 99–104.

Díaz, F. 2010. "Usos y propiedades de los aceites vegetales ozonizados. La experiencia cubana". *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41:1-12.

Díaz- Ramírez. M., Nogue. F., Royo, J. y Rezeau A. 2013. G. Ferreira (ed.), *Alternative Energies, Advanced Structured Materials* 34, DOI: 10.1007/978-3-642-40680-5_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 27- 45.

Del Gatto, A., Grazia Melilli, M., Antonino Raccuia,S., Pieri, S., Mangoni, L., Pacifico, D., Signor, M., Duca, D., Foppa Pedretti, E. y Mengarell, C. 2015. A comparative study of oilseed crops (*Brassica napus* L. subsp. *oleifera* and *Brassica carinata* A. Braun) in the biodiesel production chain and their adaptability to different Italian areas. *Industrial Crops and Products* 75, Part A, 30 November 2015, Pages 98–107.

Demirbas, A. 2008. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer, London. ISBN 978-1-84628-995-8.

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. México. 385 p.
- Escamilla-Treviño, L. 2012. Potential of Plants from the Genus *Agave* as Bioenergy Crops. *Bioenerg. Res.* 5:1–9 DOI 10.1007/s12155-011-9159-x.
- Escuela de Ingenierías Industriales 2015. Departamento de Química orgánica, <http://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-02.php>.
- Escobar, J.C., Lora, E.S., Venturini, O.J., Yañez, E.E., Castillo, E.F. y Almazán, O. 2009. Environment, technology and food security *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13, 1275–1287.
- Estrada, C. e Islas, J. 2010. Energías alternativas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México. Academia Mexicana de Ciencias, primera edición, México.
- Espinosa, F. y Saukhán, J. 1997. Manual de malezas del Valle de México. Claves, descripciones e ilustraciones. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica.
- FAO-UNESCO-ISRIC. 1988. Mapa de Suelos Dominantes, Escala 1: 4000000. 1a. aproximación. Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca-Colegio de Postgraduados. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. D. F., México.
- Ferrusquía-Villafranca, I. 1993. Geology of Mexico: Biological diversity of Mexico, origins and distributions. RAMAMOORTHY, T.P.; BYE, R.; LOT, A.; FA, J. (eds.). Oxford University Press, Oxford. pp. 3-107.
- Flores, H. 2011. Las zonas áridas y semiáridas de México, las menos exploradas. *Boletín UNAM DGCS-763*.
- FAO 2008. Forests and energy key issues. FAO. Forestry Paper 154.
- FAO 2012. Grasas y ácidos grasos en nutrición humana, consulta de expertos. Estudio FAO. Alimentación y nutrición ISBN 978-92-5-3067336.
- Ffolliott, P.F., y J. L. Thames. 1983. Manual sobre taxonomía de *Prosopis* en México, Perú y Chile. FAO, Roma. Versión electrónica. (<http://www.fao.org/docrep/006/Q2580S/Q2580S00.htm>).
- Fuentes, J. L. 2006. Iniciación a la botánica. ISBN 84-7114-986-9. Barcelona España 230 p.
- García-Herrera, J., Méndez-Gallegos, S. y Talavera-Magaña, D. 2010. El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista salud y nutrición*, edición especial No 5. ISSN 1870-0160.

- García- Mendoza, A. 2002. Distribution of the genus *Agave* (Agavaceae) and its endemic species in México. *Cactus and Succulent journal* No. 74, pp. 177-187.
- Ghosh, T. y Preal, M. 2011. Energy Resources and Systems. *Bioenergy*, pp. 327-418.
- Giascopini, M. 2008. Efecto de los ácidos grasos trans sobre las lipoproteínas del plasma. *AVFT*. V 27 n1. Caracas.
- González, M., López, R.; Camacho R. y , Cano, M 2012. "*Acacia farnesiana* (L.) Willd. (Fabaceae: Leguminosae), una especie exótica con potencial invasivo en los bosques secos de la isla de Providencia (Colombia)". *Biota Colombiana*, núm. Sin mes, pp. 232-246.
- Gómez, E. 2010. Informe No. 4 “índice de peróxido”, Universidad Agraria de la Selva, Perú <http://documents.mx/documents/informe-n04-indice-de-peroxido.html>.
- Ibrahim, B. y A-Nacer, Z. 2014. Analysis of fruits of *Schinus molle* extractions and efficacy in inhibition of growth the fungi in laboratory. *International Journal of Chem tech Research*, 6, issue 5. pp. 2799-2806.
- IEA. 2009. Transport Energy and Co2: moving toward sustainability. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1997. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmpuia_prctica_para_el_cultivo_de_girasol.pdf.
- Cohen, I., Sifuentes-Ibarra, E y Román-López, A. 2014. Modelos de predicción de rendimiento de canola en función del contenido de humedad disponible en el suelo. *Revista. Fitotecnia*. México. Vol. 37 (1): 49 – 58.
- Jiménez, L., León, M., Herrera, R., García, G., Cadenas J., y López, C. 1999 Toxicidad aguda oral del *Xantum strumarium* L. Instituto Superior de ciencias Médicas “Carlos Finlay” Camaguey. *Rev. Cubana Plantmed* V.4 N.1. Ciudad de la Habana Ene-abr. ISSN- 1028-4796.
- Koolman, J. 2004. *Bioquímica Texto y Atlas* 3ª edición. Editorial Panamericana. ISBN 84-7903-724-5.
- Lafargue-Pérez, F., Barrera-Vaillant, N., Assuncao-Nascimento, J., Díaz-Vázquez, M y Rodríguez-Martínez, C. 2012. Caracterización fisicoquímica del aceite vegetal de *Jatropha curcas* L. *Tecnología Química*. pp. 162-165.
- Loredo, S. 2012. Perfil de ácidos grasos en *Lupines uncinatus* S. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. 155 p.

- López-Ibarra, J y Mendoza-Moreno, S. 2000. Cuantificación de taninos condensados de corteza y madera en la especie sangre de grado *Jatropha dioica*. Revista Chapingo serie Zonas áridas. (1) 1: 1-6.
- Luna, M; García, E. 1989. "Recopilación del conocimiento empírico de papas arvenses (*Solanum* L.) Del Altiplano Potosino-Zacatecano.". Acta Botánica Mexicana, núm. Diciembre-Sin mes, pp. 1-13.
- Luna-Cavazos, M., Romero-Manzanares, E y García, E. 2007. Distribución geográfica y ecológica de papas silvestres (*Solanum* L.) del Altiplano Potosino-Zacatecano. Revista Chapingo. Serie Horticultura. 13 (1): 35-41.
- Machado, R., Suarez, J., y Alfonso, M. 2012. Caracterización morfológica y agroproductiva de procedencias de *Ricinus communis* L. para la producción de aceite. Pastos y Forrajes, Matanzas. (35) 4 :381-392.
- Martínez-Valencia, B.B., Zamarripa-Colmenero, A., Solís-Bonilla, J.L., López-Ángel, L.J. 2011. Calidad fisicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México. Folleto Técnico Num.24. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas. México. 63 p.
- Martínez, N., Figueroa, A., Zúñiga, C., Almaguer, G.; Hernández-Ceruelos, A., Vázquez-Alvarado, P. 2014. "Análisis fitoquímico de *Jatropha dioica* y determinación de su efecto antioxidante y quimioprotector sobre el potencial genotóxico de ciclofosfamida, daunorrubicina y metilmetanosulfonato evaluado mediante el ensayo cometa". Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas. pp. 437-457.
- Martínez-Sánchez, J., Espinosa-Paz, N., Fernández-González, I., Martínez-Valencia, B. B., De la Cruz-Morales, F. R., Cadena-Iñiguez, P. 2015. Evaluación fisicoquímica del aceite de variedades criollas de *Arachis hypogaea* L. Revista Agroproductividad. 8(8):12-18.
- Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Díaz, R.; Guerrero, G y Cocotti, L. 2011. La Bioenergía en México "Situación actual y perspectivas". Cuaderno temático No 4. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. 44 p.
- Mazzani, E. 2007. El tártago: la planta, su importancia y usos. CENIAP Hoy. No. 14. http://www.cadenahortofruticola.org/admin/bibli/576tartago_importancia_usos.pdf. Consultado 27 mayo 2016.
- Méndez, J., Santos, A. y Nájera, J. 2007. Características dimensionales y modelos para estimar producción de vaina en *Prosopis glandulosa* var. Torr., en una región de Mexicali, B.C. México. Revista Chapingo serie Zonas Áridas 6:55-66.

- Moerman, D.E. 1986. Medicinal Plants Native of America. Research Reports in Ethnobotany, Contribution 2, University of Michigan Museum of Anthropology Technical Reports, Number 19. 534 p.
- Montiel-Montoya, J. 2010. Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. *Ra Ximhai, Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*. 6(1):57-62.
- Mostacedo, B., Fredericksen, S. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz, Bolivia.
- NMX-F-408-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de Yodo.
- NMX-F074-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de refracción.
- NMX-F-101-1987. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de acidez.
- NMX-F-154-1987. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de peróxidos.
- NMX-F-174-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de saponificación.
- Ortega, M y Vázquez, L. 1993. Caracterización fisicoquímica del aceite crudo y refinado de la semilla de *Proboscidea parviflora* (uña de gato). Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. *Grasas y Aceites*. pp. 30-34.
- Pérez, C., Hernández, L., Valerio, F., García, G., Caraballo, A., Vázquez, T. y Tovar M. 2006. Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agricultura Tec. Méx* 32. No.3 México Sep/Dic.
- Pinzi, S., L. García, L., J. López Jiménez J., L. de Castro, M.D., G. Dorado, P. Dorado M. 2009. The Ideal Vegetable Oil-based Biodiesel Composition: A Review of Social, Economical and Technical Implications. *Energy & Fuels*. 23: 2325-2341.
- Prehn, M. y Cumana, I. 2010. La Bioenergía en México, estudios de caso, cuaderno temático 1. Red Mexicana de Bioenergía A. C. 32 p.
- Purcella, G. 2008. Do it Yourself Guide to Biodiesel. Ulysses Press, Berkeley. ISBN 1569756244.
- Reveles, F., Rosales, R., Nava, C., Delgado, E., Cuellar, E., Carrete, F. y Ríos, J. 2010. Identificación de especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles líquidos en Durango, México. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas* (1) 1:45-54.
- Rebora, C. y Gómez, A. 2007. Rendimiento de aceite de colza cultivada bajo riego. *FCA Uncuyo* 39:2 101-108.

- Reynoso, R., García, J., López, W. y López, A. 2012. Identificación taxonómica de las especies de agave utilizadas para la elaboración del licor comiteco en Chiapas ISBN: 978-607-425-764-9.
- Rodríguez, H. R. y A. Zamarripa C. 2013. Competitividad de la higuera (*Ricinus communis*) para biocombustible en relación a los cultivos actuales en el Estado de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*.32:306-318.
- Roger-Riva, J., Bernard, E., Grau, B., Puig, R y Rius, A. 2010. Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizadas como carburante en motores diesel. Escuela de Ingeniería de Igualada, Universidad de Cataluña. España. Placa del Rey, 15.08700. Igualada, Barcelona. *Afinidad LXVI* 546 100-106.
- Ruiz, M. y Huesa, J. 1991. La manteca de Karité. *Grasas y Aceites* Vol 42 (2) 151-154.
- Rzedowski, G y Rzedowski, J 1999. *Anacardiaceae*. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 78. Instituto de Ecología-Centro Regional del Bajío. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Rzedowski, G y Rzedowski, J. 2001. Flora fanerogámica del valle de México. 2a ed. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Sánchez, O. 1969. La flora del Valle de México, Editorial Herrero. México D.F.
- SEMARNAT. 2012. Informe de la situación del medioambiente en México. Capítulo 3. Suelos.
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_3.html.
- SAGARPA 2005. Programa de Sanidad vegetal Guanajuato.
<http://www.cesaveg.org.mx/new/fichastecnicas/fichatecnicabidensodorata.pdf>.
- Shubert, R.2009. Future bioenergy and sustainable land use. ISBN 978-3-936191-240.
- Singh, D. 2010. Low cost production of ester from non-edible oil of *Argemone Mexicana*. *Biomass and Bioenergy* 34 545-549.
- Speight, J.G.2002. Handbook of Petroleum Product Analysis. Wiley, New Jersey.
- Stevens, W., Ulloa, C., Pool, A., y Montiel, O. 2001. Flora de Nicaragua. 85. Missouri Botanical Garden Press.
- SENER. 2009 “Balance Nacional de Energía. 2008. Subsecretaría de planeación energética y desarrollo tecnológico.
- Tamayo, J. 1981. Geografía moderna de México. 9 edición, Trillas D.F 382 p.

- Tello, E.S., Rojas, T.R., Macedo, B., y Alegría, M. 2006. Eficiencia del método de cuadrante, sextante y el método de parcela cuadrada en la evaluación cuantitativa de un bosque tropical, Iquitos-Peru. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ciencias Forestales.
- Tosquy-Valle, O, Esqueda-Esquivel, V., Zetina-Lezama, R. y Ascencio-Luciano, G. 2010. Densidad y distancia de siembra en dos variedades de soya de temporal en Veracruz, México. *Agronomía mesoamericana*. 21(1):63-72. 2010. ISSN: 1021-7444.
- Vasconcellos, J., Bemis, J., Berry, J y Weber, C. 1981. New source of fats and oils. *American oil chemist society* ISBN 0935315063. 319-322 p.
- Ventimiglia, L. y Torrens, L. 2014. Colza: efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento. INTA. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_9_de_julio_colza_densidad_de_siembra.pdf.
- Vibrans, H. 1995. *Bidens pilosa* L. Y *Bidens odorata* Cav. (Asteraceae: Heliantheae) en la vegetación Urbana de la Ciudad de México. *Acta Botánica Mexicana*, núm. 32, agosto, 1995, pp. 85 – 89. Instituto de Ecología, A.C. Pátzcuaro, México.
- Villaseñor R. J. y Espinosa G. 1998. Catálogo de malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario. Fondo de Cultura Económica. México D.F.
- Villegas, G., Bolaños, A., Miranda, J y Zenón, A. 2000. Flora nectarífera del estado de Chiapas. ISBN 968-800-455-3.
- <http://www.pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Helianthus+petiolaris>.
- <http://www.mind-surf.net/drogas/toloache.htm>.
- <http://www.uaq.mx/FCN/naturaleza/Acacia%20farnesiana.php>.
- http://plants.usda.gov/plantguide/pdf/cs_hean3.pdf.
- <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/874Acacia%20farnesiana.pdf>.
- <https://buenasiembra.blogspot.mx/2011/05/la-rucula-eruca-sativa-sorprendentes.html>.
- http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/70-zygop2m.pdf.
- <http://www.pfaf.org/user/plant.aspx?LatinName=Helianthus+annuus>.
- <https://raizeiro.wordpress.com/plantas-enteogenas/>
- <http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/monografia.php?l=3&t=Larrea%20ridentata&id=7544>.

http://www.wildflower.org/plants/result.php?id_plant=PRLO.

<http://www.ehu.es/biomoleculas/lipidos>

Zagal, A. 2012. Uso medicinal de la aceitilla (*Bidens pilosa* L.). Medicina Tradicional Mexicana. Facultad de Enfermería. Universidad Autónoma Del Estado de Morelos.

Zamarripa-Colmenero, P., Ruiz-Cruz, P; Solis-Bonilla, J., Martínez-Herrera, J., Olivera-De los Santos, A y Martínez-Valencia, B. 2009. Biocombustibles: perspectivas de producción de biodiesel a partir de *J.curcas* L. en el trópico de México. ISBN 978-607-425-203-3. Folleto técnico 12. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.