

Capítulo III Adaptación de higuera (*Ricinus communis* L.) Bajo condiciones de invernadero

Chapter III Higuera (*Ricinus communis* L.) Plants adaptation under greenhouse conditions

JUÁREZ-MENDOZA, Lucila^{1†*}, MARTÍNEZ-MEDINA, Alma Leidy¹, DÍAZ-ARRIAGA, Francisco Ramón¹ y VÁZQUEZ-LEÓN, Lucio Abel²

¹Tecnológico Nacional de México/I.T. Tehuacán

²Universidad del Papaloapan

ID 1^{er} Autor: *Lucila, Juárez-Mendoza* / **ORC ID:** 0000-0002-7823-7951

ID 1^{er} Coautor: *Alma Leidy, Martínez-Medina* / **ORC ID:** 0000-0003-1604-131X

ID 2^{do} Coautor: *Francisco Ramón. Díaz-Arriaga* / **ORC ID:** 0000-0002-2576-2074

ID 3^{er} Coautor: *Lucio Abel, Vázquez-León* / **ORC ID:** 0000-0003-3979-308X

DOI: 10.35429/H.2019.4.39.49

L. Juárez, A. Martínez, F. Díaz y L. Vázquez

d_ib_lucilajm@ittehuacan.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, P. Díaz, L. Cruz. (Dir.) La ciencia y las mujeres en Mexico. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Queretaro, 2019.

Resumen

Las plantas de higuierilla (*Ricinus communis* L.), también conocidas como plantas de ricino, son cultivos energéticos no comestibles, y todas las partes de la planta pueden usarse para la producción múltiple de biocombustibles. Las plantas de higuierilla poseen un enorme potencial de adaptación a diversos hábitats, incluidos los sitios problemáticos, debido a su plasticidad, sin embargo, en la región central de México los cultivos disponibles son silvestres. La tecnología de invernadero se está convirtiendo en una solución cada vez más indispensable y viable para los métodos modernos de producción de cultivos. El presente capítulo destaca el trabajo realizado sobre diferentes aspectos de la adaptación de las plantas de higuierilla bajo condiciones de invernadero. Se evaluó el crecimiento y el rendimiento de producción de cuatro variedades (Guanajuato Oíl, RC-40, K855 y Criolla) de plantas de higuierilla en invernadero con ventilación natural, impulsada por la diferencia de presión. Se cultivaron 40 plantas en un área de 70 m². El *tezontle* (en náhuatl, *tezt* significa piedra y *zontli* significa cabello) se usó como sustrato, que es una piedra volcánica nativa. La formulación nutricional de Steiner se utilizó para proporcionar los elementos necesarios en el desarrollo de la planta. Se utilizó el método de riego por goteo para todas las plantas. Se aplicó el análisis de varianza unidireccional (1W-ANOVA) y la prueba de rango de Tukey para el análisis de datos. Se obtuvieron resultados favorables y óptimos en el crecimiento y el rendimiento de producción de al menos una variedad de plantas de higuierilla.

Planta de higuierilla, Alternativas de bioenergía, Producción en invernadero, Crecimiento de plantas, Rendimiento de producción

Abstract

Higuierilla plants (*Ricinus communis* L.), also called castor plants, are non-edible energy crop, and all parts of the plant can be used for multiple biofuel production. Higuierilla plants possess an enormous adaptive potential in diverse habitats including problematic sites due to their plasticity, however in México central region the available crops are wild. Greenhouse technology is becoming an increasingly indispensable and a viable solution for modern methods of crop production. Present chapter highlights the work carried out on different aspects of higuierilla plants adaptation under greenhouse conditions. Was evaluated the growth and production yield of four varieties (Guanajuato Oíl, RC-40, K855 and Criolla) of higuierilla plants into naturally ventilated greenhouse, driven by pressure difference. 40 plants were cultivated in an area of 70 m². The *tezontle* (in Nahuatl, *tezt* means stone and *zontli* means hair) was used as substrate, which is a native volcanic stone. Steiner's nutritional formulation was used to provide the necessary elements for the development of the plant. Drip irrigation method for all the plants was used. The one-way analysis of variance (1W-ANOVA) and Tukey's range test were applied. Favorable and optimal results were obtained in the growth and production yield of at least one variety of Higuierilla plants.

Higuierilla plants, Bioenergy alternatives, Greenhouse production, Plant growth, Production yield

1. Introducción

El uso de biocombustibles resulta una de las principales propuestas impulsadas para la disminución del impacto ambiental generados por los combustibles fósiles durante los últimos años. A nivel internacional la producción de biocombustibles en la última década presentó un incremento que va de los 18,000 millones de litros producidos en el 2000, a 129,000 millones de litros producidos en 2011. El uso de biocombustibles para la generación de energía sólo abarca el 5% del total producido por las energías renovables a nivel mundial (Castiblanco y Etter, 2013). Dentro de los principales biocombustibles producidos a nivel mundial se encuentran el bioetanol, biodiesel, biometano y biohidrógeno (Acosta y Chaparro-Giraldo, 2009).

México es uno de los países que poco a poco ha logrado incursionar en el mercado de los energéticos debido a sus condiciones climáticas y localización geográfica. En 2013, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) identificó los cultivos potenciales para la producción de biodiesel entre los que destaca la higuierilla (*Ricinus communis* L.), con el propósito de generar las bases que permitan su introducción como componente de volumen de gasolina (SAGARPA, 2009).

Dadas las características de la planta, la higuera resulta tener potencial para su producción y uso como materia prima en la obtención de biocombustibles en la región de Tehuacán, Puebla, México, la cual cuenta con la riqueza natural necesaria para la producción de esta planta, cuya presencia se ha observado de manera silvestre (Rico-Ponce *et al.*, 2011). Sin embargo, la producción de higuera para la obtención de biocombustibles no puede estar limitada a regiones geográficas y condiciones climáticas, deben también considerarse las tecnologías necesarias que permitan su producción en distintas zonas agroclimáticas.

En las últimas décadas, se han introducido soluciones viables tecnológicas e innovadoras, como la agricultura de invernadero a gran escala, que mejoran tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos. Un invernadero es una estructura agrícola que puede extender la temporada de producción al proporcionar condiciones controladas de microclima interior apropiadas para el cultivo de varios tipos de cultivos (Ghani *et al.*, 2019; Ghoulem *et al.*, 2019). Por lo tanto, el uso de invernaderos brindaría la oportunidad de controlar el cultivo de higuera para su aprovechamiento como fuente de biocombustible.

En comparación con la agricultura de campo abierto, un invernadero puede proporcionar un alto grado de control climático y proteger los cultivos del interior de los cambios desfavorables en las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar, etc. Por lo tanto, el cultivo en invernadero requiere tener en cuenta estos factores concurrentes, parámetros que finalmente permiten equilibrar el retorno del rendimiento y los costos operativos y de capital relacionados (Ghani *et al.*, 2019; Ghoulem *et al.*, 2019).

En el presente trabajo, se realizó el estudio de adaptación de 4 variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) bajo condiciones de invernadero, con el fin de proponer una estrategia general para el aprovechamiento de este recurso bioenergético y con ello no limitar su producción a través de especímenes silvestres. Además, en el presente capítulo se expone la importancia del cambio climático y el reto que adquiere el sector bioenergético para buscar estrategias que permitan minimizar el impacto ambiental de las actividades que requieren combustibles para su desarrollo. Posteriormente se detallan algunos reportes que dejan evidencia de la viabilidad del uso de la higuera como cultivo bioenergético. Finalmente se presenta la estrategia experimental abordada por el equipo de investigación y se discuten los resultados obtenidos durante el estudio de adaptación de higuera bajo condiciones de invernadero.

2. Cambio climático y el reto en el sector bioenergético

Dentro de las problemáticas más importantes en la última década a nivel mundial desde la perspectiva social, ambiental y económica, destaca la contaminación ambiental y su relación con el cambio climático. De acuerdo con la *ECODES* (Fundación ecología y desarrollo) el cambio climático es uno de los problemas ambientales más graves al que se enfrenta la humanidad.

El calentamiento global es un problema que amenaza a los ecosistemas mundiales, comprometiendo el desarrollo sostenible y el bienestar de la humanidad. Los estudios científicos muestran que el planeta se enfrentará a desastres humanos y naturales irreversibles si la concentración atmosférica de CO₂ continúa por encima de 350 partes por millón. En el último informe publicado el 8 de octubre de 2018 en Incheon, Corea del Sur, el Grupo *Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, por sus siglas en inglés) argumenta que el incremento en la temperatura de la tierra, de 1.5 °C, se verá reflejado en un aumento en tormentas, incendios forestales, sequías, olas de calor e inundaciones en todo el mundo. Además, se informó que podrían alcanzarse en 11 años una elevación de la temperatura de 2 °C si no se reducen las emisiones de CO₂ (IPCC, 2018).

Los efectos de no plantear alternativas a la reducción de las emisiones de CO₂ serían perceptibles en todos los ecosistemas, así como en comunidades y economías humanas. Los efectos más notables incluirían tormentas de alta intensidad, olas de calor peligrosas, aumento en el nivel del mar, y la perturbación a gran escala de las infraestructuras y los patrones migratorios de las diferentes especies en el mundo. Por ello en el informe especial del IPCC se describen alternativas para limitar el calentamiento global, a través, de la reducción del 50% del uso de combustibles fósiles en menos de 15 años y eliminar su uso casi por completo en 30 años.

Esto significa que ningún hogar, negocio o industria tendrá calefacción por gas o petróleo; ningún vehículo se desplazará con diésel o gasolina; todas las centrales eléctricas de carbón y gas se clausurarán; la industria petroquímica tendrá que convertirse en industria química verde; y la industria pesada como la producción de acero y aluminio tendrá que utilizar fuentes de energía sin carbono o tecnología de captura de emisiones de CO₂ que almacenará de forma permanente. Además, se considera que entre 1 y 7 millones de km² de tierra tendrán que convertirse para empezar a plantar cultivos que se utilicen como fuente de bioenergía (IPCC, 2018).

El uso de los biocombustibles surge a finales del siglo XIX y nace a la par del uso de los hidrocarburos como fuente de energía. Al inicio surgieron las ideas de usar aceites vegetales como combustible para motores de combustión interna. Uno de los primeros, en 1895, fue el Dr. Rudolf Diesel quien desarrolló el primer motor diésel, cuyo prototipo ya estaba previsto que funcionara con aceites vegetales, como por ejemplo el aceite de maní. Años más tarde, Henry Ford hizo el primer diseño de su automóvil modelo T en 1908, en el que esperaba utilizar el etanol como combustible. Sin embargo, los elevados precios del maíz (de donde se obtenía el biocombustible) junto con los altos costos de almacenamiento y las dificultades en el transporte, hicieron hacer a un lado proyecto y en ese momento el petróleo irrumpió en el mercado siendo más barato, más eficiente y más disponible. Debemos entender por biocombustibles a aquellos combustibles que se obtienen a partir de biomasa, es decir, a cualquier combustible obtenido a partir de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos. En la actualidad los biocombustibles representan la alternativa que ayudaría a combatir el cambio climático y sus efectos (Salinas-Callejas y Gasca-Quezada, 2009).

En la actualidad los biocombustibles más usados y desarrollados son el etanol y el biodiesel. En el caso del etanol, también llamado etanol de biomasa, es un alcohol producido a partir de la fermentación de azúcares como el maíz, la caña de azúcar, remolacha, cebada, entre otros cultivos energéticos. Por otra parte, el biodiesel es un combustible alternativo similar al diésel convencional o "fósil", el cual se obtiene a partir del procesamiento de aceites vegetales obtenidos de plantas oleaginosas como la soya, colza, girasol, cártamo, palma de aceite, y la higuera (Salinas-Callejas y Gasca-Quezada, 2009; Berman *et al.*, 2011; Naik *et al.*, 2018). El proceso utilizado para convertir estos aceites en biodiesel se llama transesterificación. El biodiesel también se puede describir como "carbono neutral". Esto significa que el combustible no produce una producción neta de carbono en forma de CO₂ (Naik *et al.*, 2018)

3. Higuera (*Ricinus communis* L.) como cultivo bioenergético

La planta de higuera (*Ricinus communis* L.) es un miembro de la familia de las espuelas (Euphorbiaceae) que se encuentra en los países tropicales (Naik *et al.*, 2018). Este cultivo oleaginoso no comestible es de los más prometedores, debido a su alta producción y rendimiento anual de semillas, y que además puede cultivarse en tierras marginales y en un clima semiárido (Berman *et al.*, 2011). India es el mayor productor de semillas de higuera con una producción global total de 1.85 millones de toneladas anuales, que representa aproximadamente el 80% de la producción mundial total (Naik *et al.*, 2018). Sin embargo, las semillas de higuera son venenosas para los humanos y los animales, ya que contienen la proteína tóxica ricina, aunque están ausentes del propio aceite (Berman *et al.*, 2011).

La higuera es un cultivo considerado energético y con un sobresaliente potencial, debido a que todas las partes de la planta se pueden utilizar para la producción múltiple de biocombustibles. La semilla de higuera es una rica fuente de aceite que se utiliza en más de 10 industrias diferentes, además de la producción de biodiesel. Después de extraer el aceite de la semilla, más del 50% de la biomasa se deja en forma de torta desengrasada como desecho industrial. Las otras partes de la planta son tallo y hojas que son biomasa lignocelulósica y pueden usarse para la producción de biocombustibles. Dado que la biomasa lignocelulósica es muy difícil de hidrolizar por acción enzimática, requiere un pretratamiento eficiente para hacerla susceptible a la acción enzimática. Se han informado varios métodos en la literatura para el pretratamiento y la degradación de la biomasa para reducir los azúcares y la posterior producción de biocombustibles a partir de higuera (Naik *et al.*, 2018).

Por lo tanto, existe suficiente evidencia científica de que las plantas de higuera, y principalmente sus semillas, se pueden usar como materia prima alternativa a la industria del biodiesel, en especial cuando se mezclan con diésel convencional (Berman *et al.*, 2011; Naik *et al.*, 2018). Sin embargo, el nivel máximo de mezcla se limita al 10% debido a los altos niveles de ácido ricinoleico (Berman *et al.*, 2011).

En México, el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) es la organización que ha realizado numerosos estudios en cuanto al cultivo de higuierilla (*Ricinus communis* L.) y que forman parte de una cobertura nacional llamada “Estudio de Insumos para la Obtención de Biocombustibles en México” que tiene como objetivo principal generar y adaptar tecnologías de producción, entre las que destaca la planta de higuierilla, para la obtención de insumos rentables de alta calidad para la producción de biocombustibles (biodiesel y etanol) en las regiones agroclimáticas del país (Zamarripa *et al.*, 2009).

Existen diversas organizaciones campesinas interesadas en la producción de biodiesel a partir de la higuierilla, el reto es que sin importar la zona geográfica en la que se requiera su obtención, su cultivo pueda realizarse con los máximos índices de producción. Resulta de inmensa importancia realizar un estudio sobre el desarrollo de la higuierilla (*Ricinus communis* L.) bajo la tecnología de producción en invernaderos, lo que permitiría, además, evitar los cruces de variedades de esta planta y mejorar la producción de la semilla para la obtención de biodiesel. Pero sobre todo generar los conocimientos suficientes para que regiones geográficas con diferentes condiciones agroecológicas puedan ser productoras de la planta de higuierilla para su uso en la industria de biocombustibles. A continuación, se presenta la estrategia experimental y se discuten los resultados obtenidos.

4. Materiales y métodos

El trabajo se llevó a cabo en el invernadero del Instituto Tecnológico de Tehuacán (ITT) ubicado en la ciudad de Tehuacán, en el estado de Puebla. El invernadero en el que se estableció la producción de higuierilla es de tipo cenital, presenta las medidas de 10 m de largo, 7 m de ancho y una altura de 5 m. Dando una superficie de siembra de 70 m². De acuerdo con el área útil de siembra del invernadero, se introdujeron un total de 40 plantas/ 70 m², separadas las plantas entre sí por 1 m. La separación en los pasillos fue de 1 m, colocando una planta por bolsa.

Para realizar el proceso de nutrición de la planta, se implementó el sistema de riego por goteo que se encuentra conectado a un depósito con una capacidad de 1100 L, lo cual permitió suministrar la solución nutritiva. En cuanto a los requerimientos nutricionales se consideró lo establecido por Cabrales *et al.*, (2011) quienes reportaron que la mayor cantidad de los nutrientes requeridos por la planta se da en la primera fase de crecimiento hasta el inicio de la floración, en donde el N, P y K son los principales elementos para el éxito de la siembra. Por lo que, al inicio de la siembra hasta los primeros 20-30 días se aplicaron los requerimientos necesarios para la planta utilizando un promotor de sistema radicular ROOTEX.

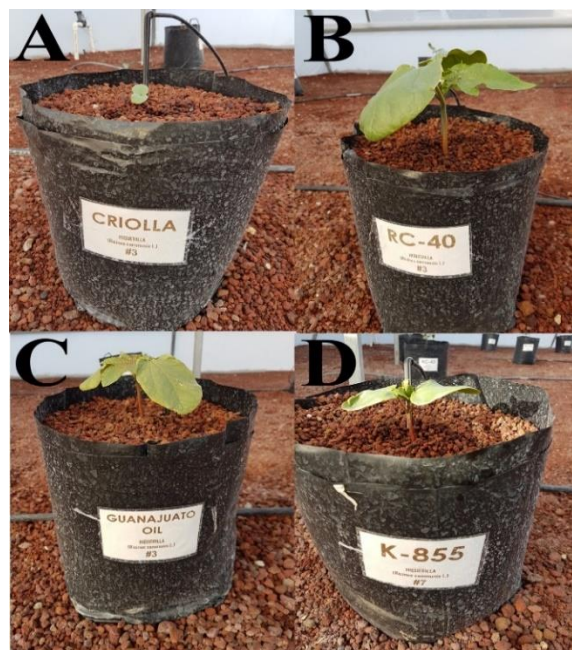
El sustrato utilizado para la siembra de la planta de higuierilla (*Ricinus communis* L.) fue el tezontle rojo, ya que con este sustrato cumple con los requerimientos edáficos de la planta, como son la textura franco-arenosa y el buen drenaje. Bajo esos criterios, el tezontle rojo fue cernido con una malla de 7 mm. Por ser una planta de alta resistencia, la siembra de las semillas se realizó directamente sobre el sustrato. Previamente el sustrato se humedeció y se le aplicó una solución enraizadora, posteriormente se colocó una semilla por cada contenedor a una profundidad de 5 a 7 cm que se cubrió con el mismo sustrato, y finalmente se realizó un riego ligero con agua. Durante los primeros días de siembra la planta se mantuvo con un riego constante en el contenedor de 160 a 190 mL/día, así como en la superficie de la nave hasta los primeros 25 días, para posteriormente ir disminuyendo y llegar a 80-100 mL/día, ya que la planta prospera en climas cálidos y secos con precipitación de 700 a 1200 mm anuales y con baja humedad relativa (Rico-Ponce *et al.*, 2011).

La siembra se realizó con cuatro variedades diferentes de higuierilla (*Ricinus communis* L.): Criolla (Figura 4.1A), RC-40 (Figura 4.1B), K-855 (Figura 4.1C) y Guanajuato Ofl (Figura 4.1D), las cuales fueron proporcionadas y donadas por la organización campesina Meztly olin A.C. Las variedades de higuierilla fueron sembradas bajo las mismas condiciones, lo que permitió evaluar su crecimiento para posteriormente valorar su adaptación bajo las condiciones de invernadero. En la Figura 3.1 se observan las cuatro variedades sembradas y en proceso de crecimiento. Cada una de estas variedades presenta características específicas en cuanto a su desarrollo, por lo tanto, se dio seguimiento a los días necesarios para su germinación a partir de su siembra, al tamaño alcanzado en los primeros 195 días de desarrollo y a la producción de semillas durante 195 días de desarrollo (contados a partir de que emergieron las plantas). Específicamente en cuanto a la producción de semillas, se hizo el conteo del número de semillas obtenidas por cada variedad y se registró la cantidad en gramos.

Durante el proceso de crecimiento se realizaron podas de saneamiento a las plantas de higuerrilla, las hojas dañadas fueron removidas de manera manual con ayuda de tijeras, con ello se benefició la aireación de la planta para evitar algún microambiente que fuera aprovechado por hongos o cualquier otra enfermedad o plaga. La cosecha se realizó manualmente cortando el racimo seco con ayuda de tijeras. Durante el corte y la cosecha se observaron frutos secos, por lo menos el 85% de los frutos del cultivo ya se encontraban bajo esas condiciones. Un método que se utilizó y permitió obtener mayor cantidad de frutos secos, fue la colocación de bolsas de papel (Figura 3.2), la cual permitió la respiración de la planta y a su vez disminuyó la pérdida de la semilla, ya que el fruto tiende a liberarlas.

Finalmente, el análisis de varianza unidireccional (1W-ANOVA) y la prueba de rango de Tukey se realizaron para el análisis estadístico de los resultados experimentales, con el fin de determinar las diferencias entre las variedades de higuerrilla evaluadas, con respecto a los días de germinación, la tasa de crecimiento y la producción de semillas (en número y cantidad en gramos). Para llevar a cabo estos análisis estadísticos, se utilizó el software Minitab 16.

Figura 3.1 Plantas de higuerrilla (*Ricinus communis L.*) sembradas en invernadero del TecNM/ITTehuacán. Variedades evaluadas: Criolla (A), RC-40 (B), K-855 (C) y Guanajuato Oil (D)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2 Planta de higuerrilla (*Ricinus communis L.*) con cubierta de papel para la obtención de fruto seco



Fuente: Elaboración propia

5. Resultados y discusión

Se realizó la evaluación de cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) bajo condiciones de invernadero (Figura 3.1), en las que se consideraron las variables de los días de germinación, el crecimiento de la planta (en cm), el número de semillas obtenidas por cada planta y variedad, así como la cantidad en gramos obtenida de cada una de ellas.

En la Tabla 3.1 se observa el análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de la duración entre la siembra directa y la germinación de la planta. El resultado obtenido nos indica que existieron diferencias en los días necesarios para la germinación. Las variedades que necesitaron menos tiempo de germinación fueron la RC-40, la K-855 y la Guanajuato Oil (Tabla 3.2). En la Tabla 3.2 se observa que la variedad criolla fue significativamente diferente al resto de las variedades evaluadas, en cuanto al período de germinación. Se ha reportado que en cultivos a campo abierto la semilla de higuera tarda de 8 a 12 días para germinar, según la variedad de la que se trate (González-Ávila *et al.*, 2011). Por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente trabajo (Tabla 3.2) superan el intervalo de días de germinación de plantas de higuera cultivados a campo abierto. Las opciones viables para obtener rápidamente la planta bajo condiciones de invernadero serían las variedades la RC-40, la K-855 y la Guanajuato Oil; las cuales tardan de 24 a 26 días para germinar (Tabla 3.2).

Tabla 3.1 Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de germinación de semillas de cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	533.875	3	177.958	16.60	0.000	2.866
Dentro de los grupos	385.900	36	10.719	H1 Alguna media es diferente $\alpha = 0.05$		
Total	919.775	39				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2 Días para la germinación de semillas de cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) cultivadas bajo condiciones de invernadero

Variedad de higuera	Días de germinación	Agrupación
<i>Criolla</i>	33.10	A
<i>K-855</i>	25.50	B
<i>Guanajuato Oil</i>	24.40	B
<i>RC-40</i>	24.30	B

Las medias ($n = 10$) de los resultados experimentales que no comparten letras son significativamente diferentes ($p > 0.05$) con la prueba de Tukey

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 3.3 se muestra el ANOVA para comparar el crecimiento de las cuatro variedades de higuera, dando como resultado diferencias en el crecimiento de las plantas, a pesar de que todas las plantas se desarrollaron bajo las mismas condiciones. Las variedades que presentaron mayor crecimiento en los 5-6 meses de siembra fueron la RC-40 y la K-855 (Tabla 3.4). En la Tabla 3.4 se observa que la variedad RC-40 presenta el mayor crecimiento significativo que el resto de las variedades.

La Tabla 3.5 muestra el ANOVA del número de semillas obtenidas de las cuatro variedades sembradas de higuera. Las variedades Criolla y K-855 produjeron mayor cantidad de semillas que las otras variedades (Tabla 3.6).

La Tabla 3.7 presenta el ANOVA de los resultados de producción de semillas en gramos de las distintas variedades. De acuerdo con este análisis estadístico, existe diferencia en la cantidad de semillas producidas por cada una de las variedades. Las variedades K-855 y RC-40 presentaron la mayor cantidad en gramos de semillas (Tabla 3.8), a pesar de que la variedad RC-40 presentó el menor número de semillas, junto con la variedad Guanajuato-Oil (Tabla 3.6).

Tabla 3.3 Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de crecimiento de cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	45522.6	3	15174.200	26.985	0.000	2.866
Dentro de los grupos	20243.4	36	562.317	H1 Alguna media es diferente $\alpha = 0.05$		
Total	65766	39				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4 Crecimiento de cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) cultivadas bajo condiciones de invernadero

Variedad de higuera	Altura de la planta (cm) a 195 días a partir de la germinación	Agrupación
RC-40	152.60	A
K-855	102.60	B
Guanajuato Oil	74.30	BC
Criolla	66.50	C

Las medias ($n = 10$) de los resultados experimentales que no comparten letras son significativamente diferentes ($p > 0.05$) con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.5 Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales del número de semillas producidas por cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	40396.10	3.00	13465.37	16.99	0.00	2.87
Dentro de los grupos	28537.40	36.00	792.71	H1 Alguna media es diferente $\alpha = 0.05$		
Total	68933.50	39.00				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6 Número de semillas producidas por cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) cultivadas bajo condiciones de invernadero

Variedad de higuera	Número de semillas producidas por planta durante 195 días	Agrupación
Criolla	151.60	A
K-855	121.50	A
Guanajuato Oil	81.10	B
RC-40	72.80	B

Las medias ($n = 10$) de los resultados experimentales que no comparten letras son significativamente diferentes ($p > 0.05$) con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.7 Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de la cantidad producida de semillas por cuatro variedades de higuera (*Ricinus communis* L.)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10184.89	3.00	3394.96	24.71	0.00	2.87
Dentro de los grupos	4946.48	36.00	137.40	H1 Alguna media es diferente $\alpha = 0.05$		
Total	15131.37	39.00				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8 Cantidad producida de semillas por cuatro variedades de higuierilla (*Ricinus communis* L.) cultivadas bajo condiciones de invernadero.

Variedad de higuierilla	Cantidad producida de semillas (g) por planta durante 195 días	Agrupación
K-855	61.75	A
RC-40	52.76	A
Guanajuato Oíl	34.26	B
Criolla	20.71	B

Las medias ($n = 10$) de los resultados experimentales que no comparten letras son significativamente diferentes ($p > 0.05$) con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración Propia

Es importante señalar que se han realizado diversos estudios acerca de los procesos de siembra de la higuierilla en campo abierto en México, principalmente encabezados por el INIFAP (González-Ávila *et al.*, 2011; Rico-Ponce *et al.*, 2011; Montes-Hernández *et al.*, 2018), sin embargo, no se ha especificado la cantidad de semillas y los gramos obtenidos en su producción, lo que dificulta la comparación entre los resultados de siembra en campo abierto y lo obtenido en el presente trabajo bajo condiciones de invernadero.

De acuerdo con el proceso realizado y a las derivaciones obtenidas en este trabajo a partir de la producción de la planta de higuierilla (*Ricinus communis* L), se puede mencionar que se obtuvieron diversos e interesantes resultados que pueden favorecer y comprender la siembra de esta planta bajo condiciones de invernadero. Los resultados permitirán a futuros proyectos tomar decisiones sobre la variedad ideal para la siembra de acuerdo con las necesidades de los productores. Pero, sobre todo, se pretende que los resultados sirvan para incentivar la producción de este cultivo energético y en consecuencia emprender acciones que favorezcan la disminución de la crisis ambiental en la que nos encontramos, a partir de la producción de biocombustible de higuierilla, sin importar la zona geográfica en la que se localice su cultivo.

A partir del 2009 se reportó con el uso de biocombustibles una reducción de Gases de Efectos de Invernadero (GEI) del orden de 100,00 millones de toneladas métricas (Sandoval-Guerra, 2019), por lo tanto, la producción de higuierilla bajo condiciones de invernadero se coloca como una opción importante para enfrentar los efectos del cambio climático, pues se asegura un suministro constante de una materia prima con gran potencial para producción de biodiesel.

En la actualidad existen múltiples fuentes alternativas de donde proviene el biodiesel, en particular de tres cultivos: la palma, la soja y la colza, estos tres cultivos proveen el 75% de la oferta mundial de aceite (Vega, 2010). Con los resultados de este trabajo, se pretende posicionar la planta de higuierilla (*Ricinus communis* L.) como una oportunidad de aprovechamiento como materia prima para la producción del biodiesel. El comportamiento del mercado nacional mexicano de importación de aceite de higuierilla durante el período 2011-2015 fue de 2,852 a 3,723 toneladas, que en costos se valoran de los 1.87 hasta 2.78 USD/kg (Montes-Hernández *et al.*, 2018). De este modo, los resultados que se presentan permitirán a los productores facilitar la elección de la variedad de acuerdo con sus necesidades particulares.

6. Conclusiones

Bajo las condiciones de invernadero estudiadas, fue viable el cultivo de las cuatro variedades de higuierilla evaluadas, lo cual permite incrementar las perspectivas de aprovechamiento de este recurso bioenergético. Sin embargo, se presentaron diferentes grados de adaptación de acuerdo con la variedad de la planta. Las variedades de K-855, RC-40 y Guanajuato Oíl requieren de menor cantidad de días para el brote de sus plantas. No obstante, Guanajuato Oíl no supera en crecimiento a las variedades RC-40 y K-855, las cuales presentan la mayor tasa de crecimiento. Mientras que las variedades Criolla y K-855 fueron las que generaron mayor número de semillas, sin embargo, la mayor cantidad en gramos de semillas fue producida por las variedades K-855 y RC-40. Por lo tanto, el cultivo de higuierilla bajo condiciones de invernadero se coloca como una opción para su producción continua y asegurar una fuente renovable de energía.

7. Recomendaciones

Algunas recomendaciones que se pueden hacer de acuerdo con los resultados del trabajo realizado, es contemplar la posibilidad de aumentar la densidad de siembra dentro del invernadero. Al mismo tiempo es importante tener presente cual es el objetivo de la producción de la higuierilla, si el número de semillas a producir, los gramos de semillas por planta obtenidos, o el follaje de la planta; ello permitirá la elección de la variedad ideal para cada caso particular. Además, se debe considerar que los datos podrían ser diferentes en invernaderos automatizados, inclusive podría mejorarse la producción, pues en ellos es posible controlar con mayor exactitud todas las variables involucradas en la producción. El siguiente paso en esta investigación es evaluar el perfil químico del aceite producido por cada variedad evaluada bajo condiciones de invernadero.

8. Agradecimientos

Se hace un amplio agradecimiento a la Organización Campesina Meztly Ollin A.C por brindarnos las variedades de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) Criolla, Guanajuato Oíl, RC-40 y K-855, con las cuales se logró realizar el trabajo presentado. También se agradece entrañablemente al Instituto Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tehuacán por todas las facilidades prestadas en materiales, instalaciones y recursos económicos que permitieron el desarrollo exitoso del presente proyecto de investigación.

9. Referencias

- Acosta, O. y Chaparro-Giraldo, A. (2009). Biocombustibles, seguridad alimentaria y cultivos transgénicos. *Revista de Salud Pública*, **11**, 290-300.
- Berman, P.; Nizri, S. y Wiesman, Z. 2011. Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. *Biomass and Bioenergy* **35**(7):2861-2866.
- Vega, O. (2010). Atlas de la Agroenergía y los biocombustibles en las Américas. IICA, Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles. San José, Costa Rica.
- Cabrales, R.A.; Marrugo, J.L. y Plaza, G.A. (2011). Evaluation of seed yield and oil contents in four materials of *Ricinus communis* L. *Agronomía Colombiana*, **29**(1), 43-48. Recuperado el 14 de agosto de 2019 a partir de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652011000100006&lng=en&tlng=en.
- Castiblanco, C. y Etter, A. (2013). Biofuels as a new energy paradigm: The key points of debate after a decade. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, **10**(SPE70), 69-92.
- Ghani, S.; Bakochristou, F.; ElBialy, E.M.A.A.; Gamaledin, S.M.A.; Rashwan, M.M.; Abdelhalim, A.M. y Ismail, S.M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, **12**(1), 48-70.
- Ghoulem, M.; El Moueddeb, K.; Nehdi, E.; Boukhanouf, R. y Kaiser Calautit, J. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, **183**, 121-150.
- González-Ávila, A.; García-Mariscal, K.D.L.P.; Hernández-García, M.A.; Rico-Ponce, H.R.; Hernández-Martínez, M.; Solís-Bonilla, J.L. y Zamarripa-Colmenero, A. (2011). Guía para cultivar Higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Jalisco. Folleto técnico Núm. 1. SAGARPA. INIFAP. Jalisco, México. Recuperado el 14 agosto de 2019 a partir de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/3447/3523%20higuierilla.pdf?sequence=1>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2018). *Sexto Informe de Evaluación sobre el Calentamiento Global*. Incheon, Corea del Sur.

Montes-Hernández, S.; Camarena-Hernández, M.G.; Hernández-Martínez, M. y Medina-Cazares, T. (2018). Producción de semilla de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Guanajuato. Folleto técnico Núm. 10. SAGARPA. INIFAP. Guanajuato, México. Recuperado el 14 agosto de 2019 a partir de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/4467/4774%20Producci%C3%B3n%20de%20semilla%20de%20higuierilla%20%28Ricinus%20communis%20L.%29%20en%20Guanajuato.pdf?sequence=1>

Naik, S. N., Saxena, D. K., Dole, B. R., & Khare, S. K. (2018). Chapter 21 - Potential and Perspective of Castor Biorefinery. In T. Bhaskar, A. Pandey, S. V. Mohan, D.-J. Lee & S. K. Khanal (Eds.), *Waste Biorefinery* (pp. 623-656): Elsevier.

Rico-Ponce, H.R.; Tapia-Vargas, L.M.; Teniente-Oviedo, R.; González-Ávila, A.; Hernández-Martínez, M.; Solís-Bonilla, J.L. y Zamarripa-Colmenero, A. (2011). Guía para cultivar higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Michoacán. Folleto Técnico Núm. 1. INIFAP. CIRPAC. Michoacán, México. Recuperado el 14 agosto a partir de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/3452/3556%20Guia%20higuierilla%20Apatzingan%20CIRPAC.pdf?sequence=1>

SAGARPA. (2009). Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico. Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México.

Salinas-Callejas, E. y Gasca-Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, **157**, 75-82.

Sandoval-Guerra, M.A. (2019). Evaluación bioeconómica de la producción y consumo de biocombustibles en Guatemala. Tesis de posgrado. Doctorado en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. 167 pp. Recuperado el 14 de agosto a partir de http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2889/1538%20sandoval_m%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zamarripa-Colmenero, A.; Ruíz-Cruz, P.A.; Solís-Bonilla, J.L.; Martínez-Herrera, J.; Olivera de los Santos, A. y Martínez-Valencia, B. (2009). Biocombustibles: perspectivas de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L. en el trópico de México. Folleto Técnico Núm. 12. INIFAP. Chiapas, México. Recuperado el 14 de agosto a partir de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/3428>