



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Factibilidad de producir bioenergía a partir de nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) en el municipio de Rosales, Chihuahua, México

Feasibility of producing bioenergy from nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) in the municipality of Rosales, Chihuahua, México

López-Fuentes, K.P., Olivas-García, J.M.*, Guerrero-Morales, S., Hernández-Salas, J., Carrillo-Soltero, M.E., Luján-Álvarez, C.

Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma de Chihuahua. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Cd. Delicias, Chihuahua, Méx. C.P 33000

p328572@uach.mx; jolivas@uach.mx*; sguerrer@uach.mx; jhernans@uach.mx; mcarrillo@uach.mx; clujan12@hotmail.com

Innovación tecnológica: Generación de energía eléctrica sustentable.

Área de aplicación industrial: Producción de bioenergía, Agricultura sustentable en zonas semiáridas, Suministro de energía eléctrica sustentable a pequeñas empresas.

Recibido: 06 abril 2020

Aceptado: 20 junio 2022

Abstract

Nopal (*Opuntia* spp.) is a plant used in Mexico before the arrival of Europeans to America. It is currently part of the crops used to produce energy; however, there is not enough information to decide whether it is possible to produce biomass from it and establish an industrial plant for biofuel production in the municipality of Rosales, Chihuahua. The objectives of this study are: 1) to analyze the technical and financial feasibility of planting nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in marginal soils of medium to low quality, with little water availability, and, 2) to evaluate, through a market study, the acceptance of bioenergy in the local market, and to identify the interest of potential investors, to determine the optimal size of the industry and its economic and financial feasibility. Following the methodology for project evaluation, it was determined that the nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. is a viable crop in the municipality of Rosales, since the climatic and soil conditions of the municipality coincide with the needs of nopal. In addition, the financial analysis yielded positive values for planting nopal in 15 ha, and the installation and operation of

the electrical energy production industry from nopal biomass, with three biodigesters of 100 m³ each. The market study showed that there is an interest of the producers of the municipality in investing in this project, and a good acceptance of local shops and dairy producers for the consumption of electricity that will be generated. It was concluded that the project is technically and economically feasible.

Keywords: Clean energies, bioenergy production, semi-arid areas, technical and economic feasibility.

Resumen

El nopal (*Opuntia* spp.) es una planta que se utiliza en México desde antes de la llegada de los europeos a América. Actualmente forma parte de los cultivos que se utilizan para producir energía; sin embargo, no se cuenta con suficiente información para decidir si es posible producir biomasa y establecer una planta industrial para la producción de biocombustibles en el municipio de Rosales, Chihuahua. Los objetivos del presente estudio son: 1) analizar la factibilidad técnica y financiera de la plantación de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en suelos marginales de media a baja calidad, con poca disponibilidad de agua, y, 2) evaluar, mediante un estudio de mercado, la aceptación de la bioenergía en el mercado local y el interés de posibles inversionistas, para determinar el tamaño óptimo de la industria y su factibilidad económica y financiera. Siguiendo la metodología para la evaluación de proyectos, se determinó que el nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. es un cultivo viable en el municipio de Rosales, ya que las condiciones climatológicas y edafológicas del municipio coinciden con las necesidades del mismo. Asimismo, el análisis financiero arrojó valores positivos para la plantación de nopal en 15 ha y la instalación y operación de la industria productora de energía eléctrica a partir de la biomasa de nopal, con 3 biodigestores de 100 m³ cada uno. El estudio de mercado mostró que existe interés de los productores del municipio en invertir en el proyecto, e igualmente una buena aceptación de los comercios locales y establos lecheros para el consumo de la energía eléctrica que se genere. Se concluye que el proyecto es técnicamente y económicamente factible.

Palabras clave: Energías limpias, producción de bioenergía, zonas semiáridas, factibilidad técnica y económica.

1. Introducción

Álvarez Maciel (2009) menciona que los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina biomasa. Además, indica que aquellos que se producen por cultivos energéticos, es decir, vegetales con alto contenido energético y de rápido crecimiento, presentan la ventaja de que absorben grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), pero una de sus posibles

desventajas es el uso de tierras destinadas a la industria agroalimentaria que pudieran presentar mayores niveles de rentabilidad.

El nopal (*Opuntia* spp.) tiene las propiedades necesarias para producir biocombustibles, lo cual pudiera contribuir a la generación de energías limpias (Aké Madera, 2017). Sin embargo, se carece de estudios que muestren a nuevos inversionistas que la plantación de nopal, y la instalación de una planta industrial para la producción de biocombustibles con

base en esta cactácea, sean viables técnica y económicamente en el municipio de Rosales, Chihuahua.

El presente trabajo es motivado en gran parte por los resultados obtenidos en las plantas procesadoras de biomasa de nopal ubicadas en Michoacán, Aguascalientes y México, las cuales se enfocan en diferentes productos del proceso. Mientras que la planta ubicada en Michoacán produce biogás para automóviles (Aké Madera, 2017), la planta en Aguascalientes produce electricidad para la cementera Cruz Azul. En el presente estudio se evaluó la posibilidad de replicar dichos procesos, mediante la plantación de la especie de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., que es la que se utiliza en ambos casos, dadas las posibles diferencias en las condiciones edafoclimáticas que presenta el municipio de Rosales con respecto a las localidades antes mencionadas. Adicionalmente, Maki-Díaz *et al.* (2015) reportan que la citada especie de nopal igualmente es utilizada para la producción de verdura con gran éxito en varios estados de México.

Cushman *et al.* (2015) resaltan que, debido al cambio climático, cada vez es más necesario identificar especies que tengan la capacidad para desarrollarse con menor cantidad de agua y que tengan una alta eficiencia en el uso de agua. Así, sugieren que los géneros *Agave* y *Opuntia*, tienen gran potencial para producir biomasa en condiciones donde el agua es uno de los principales factores limitantes, y por lo tanto representan una importante opción. Al respecto, Do Nacimiento Santos *et al.* (2016), coinciden indicando que el género *Opuntia*, debido a su alta eficiencia en el uso de agua, tiene gran potencial para producir biomasa en climas y suelos desfavorables para la mayoría de las especies.

La producción de biocombustibles se basa en la digestión anaerobia, la cual, de acuerdo con

Lorenzo Acosta y Obaya Abreu (2005), es una fermentación microbiana que se desarrolla sin la presencia de oxígeno, con la cual se genera una mezcla de gases conocida como biogás y está formada principalmente por metano y dióxido de carbono, además de una suspensión acuosa o lodo que contiene a microorganismos que llevan a cabo la degradación de la materia orgánica. Para ello, es posible utilizar biomasa de diversos organismos. Los mismos autores mencionan que, aunque al inicio de las investigaciones para producir biocombustibles a partir de materia orgánica se partía de la trituración de materiales, para lograr los lodos a utilizar en la digestión convencional, este proceso resulta costoso por los grandes volúmenes de reactores, de agua y energía necesaria para el proceso. Por ello, actualmente se parte de sustratos sólidos con concentraciones elevadas de sólidos totales, mediante los cuales se genera biogás con costos más razonables.

Actualmente la producción de biocombustibles basado en la biomasa presenta grandes beneficios sociales, económicos y ambientales, siendo importante explorar el cultivo de especies que tengan potencial para ello, y así asegurar el abastecimiento de materia prima sin poner en riesgo las poblaciones naturales. Asimismo, contribuye a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (Masera-Cerutti *et al.*, 2006). Sin embargo, las desventajas de las energías renovables son las siguientes: la inversión inicial es alta, la disponibilidad de biomasa en el tiempo puede obstruir la producción continua, y se requieren ciertas condiciones geográficas para su producción (Observatorio de Inteligencia del Sector Energético [OISE], 2018).

Arvizu Fernández (2015) resalta el hecho de que el nopal, por tener la capacidad de producir altos niveles de biomasa en suelos de mediana a baja calidad y climas desérticos,

donde se dispone de limitadas cantidades de agua y nutrientes, representa una buena alternativa para la producción de biogás. Adicionalmente, indica que se registran producciones de hasta $600 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ bajo condiciones de riego. Aké Madera (2017) coincide con lo anterior, ya que reporta que en Zítacuaro, Michoacán, en un sistema de plantación con riego, es posible obtener entre 600 y $800 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ realizando dos cortes por año. Sin embargo, es importante indicar que el mismo autor igualmente reporta que el promedio nacional es de $130 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Por su parte Homer *et al.* (2020) reportan que, en las regiones áridas y semiáridas del norte de Chile, en cultivos de nopal *Opuntia ficus-indica*, cuyo principal propósito es producir fruto, es posible obtener alrededor de 30 toneladas de biomasa de desperdicios por año, lo cual es posible generar $13.4 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de biogás.

Los niveles de producción alcanzados en cultivo de temporal potencialmente generan ingresos de \$150 000 pesos anuales por hectárea, mientras que, bajo riego, bien pueden ser \$300 000 por hectárea (Aké Madera, 2017).

Con base en lo anterior, Arvizu Fernández (2015) realizó una estimación del potencial energético del nopal y la factibilidad de utilizarlo como insumo para la producción de energía eléctrica, y concluye que esto depende básicamente de dos aspectos: 1) que se logre una producción de biomasa de 300 toneladas $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y 2) del volumen de biogás generado por tonelada de nopal, el cual, posteriormente será convertido en energía eléctrica. Encontró que sí es posible alcanzar el nivel de producción de biomasa por hectárea por año, y que, mediante el proceso de conversión del biogás a electricidad, se esperan alrededor de $50 \text{ MWh ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual es comparable a los niveles obtenidos en plantas industriales comerciales

en Europa con base en otros cultivos tales como el maíz y la cebada. Sin embargo, concluye, es importante continuar con investigaciones que generen información para determinar la factibilidad técnica y económica de la tecnología.

Por otra parte, Homer y Varnero (2019) mencionan que, en Chile, las necesidades promedio de una familia rural son de $3.61 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ de biogás, lo cual es posible obtenerlo de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de cladodios secos, que se pueden producir en 0.4 ha de plantación, ya que 3 kg de cladodios secos producen alrededor de 1 m^3 de biogás. Al respecto, Sánchez Godoy (2012) encontró que mediante el uso de cladodios de *O. ficus-indica*, es posible obtener en promedio 342 L de biogás por kilogramo de sólidos totales.

En cuanto a aspectos relacionados con los costos de producción de energía a partir de nopal, Varnero & Homer (2017) indican que los costos de inversión en un biodigestor para la producción de biogás a partir de nopal para una familia promedio en el medio rural, es de alrededor de 50 dólares norteamericanos, y se recuperan en alrededor de 9 a 18 meses al ahorrar en costos de combustible. Para estos cálculos se asume que 0.45 kg de nopal equivalen a 1 m^3 de biogás. Por lo tanto, un cálculo teórico de 3.61 m^3 por día equivaldría a 1.63 kg de gas diario, con un valor aproximado de 2.98 dólares norteamericanos por día, o 1 078 dólares por año.

Con base en los antecedentes, se consideró necesario evaluar la factibilidad técnica y la rentabilidad financiera de la instalación de una empresa para la producción de bioenergía. Este proyecto, mediante la metodología de evaluación de proyectos de Baca-Urbina (2013), busca obtener bases sólidas para crear una cadena de valor agregado en el municipio de Rosales, comenzando con la plantación de nopal, hasta

la instalación de una industria para la producción de bioenergía.

Esta cadena de producción podría significar una gran oportunidad para los ejidatarios que cuentan con grandes extensiones de terrenos con suelos marginales de media o baja calidad, y limitada disponibilidad de agua para riego. Esto, tomando en cuenta que el municipio posee un gran territorio catalogado como semiárido, que no se utiliza actualmente para producción agrícola.

Por lo tanto, es importante promover cultivos como el nopal que requieran menor cantidad de insumos para su producción, que sean rentables para los productores, se adapten a las condiciones climáticas del municipio, y, para propósitos de esta investigación, sean potencialmente utilizables para la producción de bioenergía.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la factibilidad agroclimática y financiera de la producción de bioenergía a partir del nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en el municipio de Rosales, Chihuahua.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en el municipio de Rosales, Chihuahua, ubicado entre los paralelos 27° 52' y 28° 37' de Latitud Norte; y los meridianos 105° 29' y 106° 06' de Longitud Oeste; con una altitud entre 1 000 y 2 400 msnm. El municipio está ubicado sobre el cauce del Río San Pedro. Sólo el 1% del territorio está poblado, y el 13.4% se utiliza para la agricultura (INEGI, 2009).

Se utilizó el modelo de evaluación de proyectos de Baca-Urbina (2013), donde se plantea el análisis en 5 fases:

2.1. Análisis de mercado

Para evaluar el mercado potencial de la energía eléctrica producida a base de nopal, y

dadas las condiciones rurales del municipio, se tomaron como base dos sectores del municipio: el ganadero lechero, y el comercial. Para la aplicación del cuestionario en el sector ganadero se establecieron requisitos mínimos que debería cumplir el establecimiento. En primer lugar, contar con al menos 25 vacas en edad productiva, y tener sistema de ordeña eléctrico-mecánico. De acuerdo a la información proporcionada por la Secretaría de Agricultura y Ganadería del municipio de Rosales, el municipio cuenta con 34 establos que cumplen los requisitos antes mencionados.

Asimismo, en cuanto al análisis de mercado en los locales comerciales, con información de la Secretaría de Economía del municipio, se determinó una población total de 70 locales, incluyendo principalmente lo que se identifica como tienditas de abarrotes, vinos y licores, carnicerías, y otros establecimientos dedicados a diferentes giros comerciales. El cuestionario utilizado incluye ocho preguntas enfocadas a identificar el consumo promedio de energía y el interés de los entrevistados en invertir en el sistema de producción de energía.

Finalmente, para determinar el tamaño de muestra se utilizó un muestro aleatorio simple con un error de muestreo de 10%, y un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (Scheaffer, Mendenhall & Ott, 1990).

2.2. Análisis técnico

Uno de los indicadores que se analizó es la temperatura, ya que como mencionan Budowski (1965), Sage & Kubien (2007) y Yepes & Silveira (2011), es uno de los principales factores ambientales que influyen en la posibilidad de supervivencia de las especies vegetales. Se analizaron las temperaturas registradas en los últimos 11 años en la estación climatológica más cercana a la cabecera municipal de Rosales, que

corresponde a la Presa Francisco I. Madero del municipio de Rosales [28.15° de Latitud Norte y 105.617° de Longitud Oeste (INEGI, 2020)], y que está a cargo de la Comisión Nacional del Agua. Esto, para contrastarlas con las necesidades de la especie *O. ficus-indica* (L.) Mill., y determinar si las temperaturas son adecuadas para la plantación. Enseguida, se revisaron las características edafológicas de los suelos y se contrastaron con las necesidades de la especie de interés.

2.3. Estudio económico

Se determinaron los costos de instalación y operación del proyecto. Los costos de operaciones incluyen los gastos por administración, ventas y producción.

2.4. Evaluación económica

Se determinaron los costos totales y la inversión inicial necesaria, los cuales se obtuvieron del estudio de ingeniería. Posteriormente, se determinó la depreciación y amortización de la inversión inicial. A la par, se calculó el capital de trabajo.

2.5. Análisis financiero

En esta etapa se evaluó el punto de equilibrio para determinar la producción mínima de energía para igualar los gastos. Dentro de esta evaluación se utilizó el Valor Actual Neto (VAN o VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la Relación Beneficio/Costo (B/C).

3. Resultados y discusión

3.1. Viabilidad agroclimática de la plantación de nopal

Para el cultivo del nopal se prefieren suelos con buena fertilidad natural; sin embargo, varias especies son capaces de prosperar en suelos de calidad media, de origen ígneo o calcáreo, con textura franca, franco arcillo-arenoso, arena franca, o franco arenoso, con una profundidad no menor a 30 cm y con pH entre 6.5 y 8.5. La temperatura anual media

ideal es entre 16 y 28 °C, y la precipitación pluvial anual media de 50 a 1 800 mm. El rango altitudinal se encuentra entre los 800 y 1 800 msnm, y de preferencia en áreas con exposición al sol durante todo el día (Luna Vázquez, 2011, Díaz Franco *et al.*, 2014).

Homer *et al.* (2020) reportan que en Chile puede ser plantado en suelos de diferente textura, desde arenosos hasta arcillosos y pedregosos; sin embargo, se recomienda principalmente para suelos de textura suave y pedregosos. Indican además que prefiere suelos con profundidad de 20 a 40 cm, con buen drenaje y permeabilidad. En cuanto a las temperaturas, sugieren que durante el día preferentemente no sea superior a los 20 °C y de 15 °C durante la noche, para favorecer la tasa fotosintética.

El municipio de Rosales se encuentra sobre el cauce del Río San Pedro, y la temperatura media anual es de 20 °C. La precipitación anual es de 200 a 500 mm, con un clima seco semiárido. Los suelos predominantes son: Calcisol (29.9%), Leptosol (28.5%) y Kastañozem (13.2%) con textura arenosa o franco arenoso en su mayoría, según datos reportados por INEGI (2009). Así, con base en el contraste de la información recabada, los suelos presentes en el municipio si tienen potencial de ser utilizados para el cultivo del nopal. Sin embargo, a la fecha no existen plantaciones comerciales de este cultivo, y el *O. ficus-indica* no existe de manera natural en la región, por lo cual es recomendable realizar pruebas de campo que respalden la posibilidad del cultivo.

Por otra parte, las temperaturas en el municipio de Rosales, con base en los registros de la estación climatológica de la CNA en la Presa Francisco I. Madero, de febrero del 2007 a septiembre del 2018, muestran una media de 20 °C, lo cual igualmente es reportado por INEGI (2009). Por lo tanto, se encuentra dentro del rango

indicado para la especie de nopal seleccionada. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que ocasionalmente se presentan extremos de temperaturas. Por ejemplo, en febrero del 2011 se presentó una fuerte helada, con una temperatura mínima de $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual se presenta cada 30 años en promedio.

Con base en lo anterior, y la información presentada en la Tabla 1, se considera que la plantación de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. es factible desde el punto de vista

edafológico y climático. Sin embargo, pudiera ser necesario que se implementen estrategias para proteger al cultivo de las temperaturas mínimas extremas de la región, ya que ocasionalmente pudiera ser inferior a la que soporta el nopal. Para ello, pudiera cubrirse el cultivo con micro-túneles de polietileno durante los meses con presencia de heladas extremas. Sin embargo, esto debiera analizarse desde el punto de vista técnico y financiero, ya que la frecuencia de estos fenómenos es muy baja (aproximadamente cada 30 años).

Tabla 1. Comparación de necesidades edafológicas y climáticas requeridas por el nopal (*Opuntia ficus-indica*), y las existentes en el Municipio de Rosales, Chihuahua.

Variable	Necesidades del nopal (Luna Vázquez, 2011, Díaz Franco et al., 2014)	Características en Rosales, Chih. (INEGI, 2009)
Edafológicas		
Textura	Arenosa y arena-arcillosa	Arenoso y franco arenoso
Profundidad del suelo	Mínimo 30 cm	20 - 35 cm
pH	6.5 - 8.5	7.5 - 8.5
Climáticas		
Temperatura mínima extrema	- 3 $^{\circ}\text{C}$	-14 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura máxima extrema	36 $^{\circ}\text{C}$	41 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura media	16 - 28 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$

3.2. Análisis de mercado de bioenergía a partir del nopal en el municipio de Rosales, Chihuahua

Con base en el método de muestreo, se obtuvo información de un total de 43 establecimientos, 10 establos lecheros y 33 establecimientos comerciales, lo cual arroja un error de muestreo de 10%, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

La variable principal del presente estudio es la producción necesaria de energía eléctrica para abastecer la demanda de los ganaderos lecheros y los propietarios de comercios locales. Al respecto, se estimó que el consumo medio mensual de energía eléctrica

en la población en estudio es de 1 348.19 kW por negocio. Con ello, y partiendo del porcentaje de interés en invertir en una empresa que se dedique a la producción de bioenergía, que es de 51%, y en cambiar de proveedor de energía eléctrica, que corresponde a 70%, y, con base en una población de 80 negocios (70 establecimientos comerciales y 10 establos lecheros), se identificó que por lo menos el 50% de la población estudiada estaría interesada en consumir esta energía eléctrica, con un consumo mensual total aproximado de 47 186.65 kW.

3.3. Rentabilidad potencial de la producción de nopal y bioenergía a partir de biomasa de nopal

Basándose en los resultados del estudio de mercado, se estima en el municipio un consumo mensual de energía generada por este proceso de 47 186.65 kW, mismos que pueden ser abastecidos con una producción de 4 800 toneladas de biomasa de nopal al año. Por lo tanto, si se proyecta la producción de nopal en 600 toneladas anuales por hectárea, lo cual está dentro de los rangos de producción estimados por varios autores (Luna Vázquez, 2011, Díaz Franco *et al.*, 2014, Arvizu Fernández, 2015 y Aké Madera, 2017), sería necesaria una plantación de 8 hectáreas para lograr abastecer la planta productora de bioenergía. Sin embargo, con

la finalidad de tener mayor seguridad en el abastecimiento de la biomasa, se propone establecer una plantación de 15 hectáreas, y en caso de existir excedentes de energía, incorporarlos a la red de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Los costos de plantación de 15 hectáreas de nopal en el municipio de Rosales son de \$4 113 250 pesos, tomando como referencia una densidad de 40 000 plantas por hectárea, seis jornaleros para dicha plantación y 12 riegos de auxilio para las plantas de aproximadamente 0.85 millares de metros cúbicos de agua por riego. Los costos se desglosan en la Tabla 2, donde se muestra que el costo de plantación es de \$273 550 pesos por hectárea.

Tabla 2. Costos de plantación de nopal en 15 ha en el municipio de Rosales, Chihuahua.

Concepto	Unidad	Costo unitario (M.N.)	Subtotal (M.N.)
Renta de tierra	ha	\$ 11 250	\$ 168 750
Preparación del terreno	Servicio	\$ 700	\$ 10 500
Barbecho	Servicio	\$ 950	\$ 14 250
Rastreo	Servicio	\$ 850	\$ 12 750
Trazo de plantación	Servicio	\$ 500	\$ 7 500
Bordeo	Servicio	\$ 500	\$ 7 500
Planta	40 000 piezas	\$ 220 000	\$ 3 300 000
Mano de obra	6 servicios	\$ 9 000	\$ 135 000
Lixiviados	60 litros	\$ 1 050	\$ 15 750
Composta	10 toneladas	\$ 25 000	\$ 375 000
12 riegos	Servicio	\$ 1 350	\$ 20 250
Mano de obra (regador)	12 riegos	\$ 2 400	\$ 36 000
Total			\$ 4 113 250

Costos de maquinaria y equipo para procesar el nopal. La transformación del nopal en energía eléctrica requiere procesos de recolección, molienda y el uso de equipos específicos, de los cuales se describen los costos en la Tabla 3.

Como se indicó anteriormente, para hacer el análisis de los requerimientos de cada equipo,

el estudio se basó en la producción de 600 toneladas de biomasa por hectárea por año, lo cual, considerando una plantación de 15 ha, da como resultado 9 000 toneladas al año, cosechándose en promedio 24 toneladas diarias de biomasa. En cuanto a la instalación, se requiere comprar equipo con un costo de \$2 154 800.

Tabla 3. Costos de equipo y maquinaria para procesar el nopal.

Concepto	Unidad	Costo unitario (M.N.)	Subtotal (M.N.)
Equipo de recepción			\$ 1 627 400.00
Biodigestor 5 ton	3	\$ 500 000.00	\$ 1.500 000.00
Triturador	1	\$ 60 000.00	\$ 60 000.00
Homogeneizador	1	\$ 5 000.00	\$ 5 000.00
Tarimas de madera	100	\$ 70.00	\$ 7 000.00
Carretes de ixtle	50	\$ 40.00	\$ 2 000.00
Montacargas	1	\$ 8 400.00	\$ 8 400.00
Equipo de Proceso			\$ 444 000.00
Filtro de H ₂ O	1	\$ 70 000.00	\$ 70 000.00
Filtro de CO ₂	1	\$ 154 000.00	\$ 154 000.00
Filtro de impurezas	1	\$ 75 000.00	\$ 75 000.00
Separador	1	\$ 145 000.00	\$ 145 000.00
Equipo de Almacenamiento			\$ 45 000.00
Tanque de Gas estacionario	1	\$ 45 000.00	\$ 45 000.00
Equipo para Venta			\$ 32 500.00
Generador Eléctrico	1	\$ 32 500.00	\$ 32 500.00
Equipo de Oficina			\$ 5 900.00
Escritorio de Oficina	1	\$ 2 500.00	\$ 2 500.00
Sillas de Oficina	1	\$ 900.00	\$ 900.00
Teléfono e Internet	1	\$ 2 500.00	\$ 2 500.00
Total			\$ 2 154 800.00

Con base en los costos antes descritos, para instalar la empresa productora de bioenergía a partir de nopal en el municipio de Rosales, Chihuahua, se requiere una inversión fija de

\$6 310 122 pesos, tomando en cuenta la plantación de la cactácea, y una inversión diferida de \$47 500 pesos. Dichas inversiones se desglosan en la Tabla 4.

Tabla 4. Desglose de inversiones para la producción de bioenergía en el municipio de Rosales, Chihuahua.

Inversión fija del proyecto, año 2020		
Concepto	Monto (M.N.)	Participación porcentual (%)
Terreno	\$ 52 523.00	0.83
Materiales para la construcción	\$ 5 549.00	0.09
Preparación de la plantación	\$ 4 103 250.00	64.96
Equipo de recepción	\$ 1 627 400.00	25.77
Equipo de proceso	\$ 444 000.00	7.03
Equipo de almacenamiento	\$ 45 000.00	0.71
Equipo de venta	\$ 32 500.00	0.51
Equipo de oficina	\$ 5 900.00	0.09
Total	\$ 6 316 122.00	100.00
Inversión diferida del plan, año 2020		

Concepto	Monto (M.N.)	Participación porcentual (%)
Elaboración de proyectos y asesoría	\$ 16 000.00	33.68
Gastos de constitución	\$ 14 500.00	30.53
Capacitación	\$ 2 000.00	4.21
Promoción	\$ 15 000.00	31.58
Total	\$ 47 500.00	100.00

Nota: Considerar que no se incluyen los costos potenciales de mantenimiento, los cuales principalmente pudieran derivarse de la corrosión por H₂S.

Se proyecta un precio a la venta de \$1.40 pesos por kW consumido, lo cual, dadas las tarifas actuales de la Comisión Federal de Electricidad, representa un ahorro a partir de

los 500 kW consumidos por hogar. En la Tabla 5 se muestran las proyecciones de producción de energía eléctrica e ingresos anuales a 5 años.

Tabla 5. Proyección de producción de energía eléctrica e ingresos anuales.

Concepto	Año				
	1	2	3	4	5
Producción (kW/año)	1 299 045.23	1 688 758.80	1 739 421.56	1 791 604.21	1 845 352.34
Precio de venta (\$/kW)	\$ 1.40	\$ 1.54	\$ 1.69	\$ 1.86	\$ 2.05
Ingresos (\$/año)	\$ 1818 663.32	\$ 2 600 688.55	\$ 2 946 580.13	\$ 3 338 475.28	\$ 3 782 492.50

Rentabilidad. En la Tabla 6 se muestra la proyección de ingresos y egresos, y a partir de ellos, con base en los indicadores VAN, TIR y B/C (Tabla 7), la rentabilidad de la producción de energía, utilizando como materia prima el nopal. Dadas las reglas de

los indicadores, se muestra que la producción de energía, utilizando como materia prima la biomasa del nopal, es factible financieramente en una proyección de cinco años, y un retorno de la inversión de 4 años.

Tabla 6. Proyección de ingresos y egresos a cinco años para cálculo de indicadores financieros.

Año	Ingresos (M.N.)	Costos (M.N.)	Flujo de efectivo (M.N.)	Tasa (1+t) ⁻ⁿ	Ingresos actualizados (M.N.)	Egresos actualizados (M.N.)
0	-	6 424 682.00	-6424 682.00	1.000	-	6 424 682.00
1	1 818 663.32	732 720.00	1 085 943.32	0.909	1 653 330.29	666 109.09
2	2 600 688.55	769 356.00	1 831 332.55	0.826	2 149 329.38	635 831.40
3	2 946 580.13	807 823.80	2 138 756.33	0.751	2 213 809.26	606 929.98
4	3 338 475.28	848 214.99	2 490 260.29	0.683	2 280 223.54	579 342.25
5	3 850 278.50	890 625.74	2 959 652.76	0.621	2 390 720.02	553 008.51
Tot	14 554 685.78	10 473 422.53	4 081 263.25		1 068 7412.49	9 465 903.24

Nota: t = tasa de interés, n = tiempo en años.

Tabla 7. Rentabilidad de la producción de energía a partir de biomasa de nopal.

VAN	\$ 1 221 509.25
TIR (%)	16.16
RELACIÓN B/C	1.13

Nota: VAN = Valor Actual Neto; TIR = Tasa Interna de Retorno; Relación B/C = Relación Beneficio Costo.

Con base en los análisis anteriores, el VAN es de \$1 221 509.25, el cual es positivo, por lo que el proyecto es rentable. En cuanto a la TIR, es de 16.16%, lo cual significa que se

obtendría 16.16% anual sobre la inversión que se realiza. Por consiguiente, es mayor que la tasa mínima aceptada en función del riesgo asumido del 10%, y se considera rentable. Por otra parte, según las tasas de interés que actualmente se tienen en los bancos nacionales para inversiones a plazos fijos, que es de 3 a 7% anual, y en CETES, alrededor de 4% anual, se observa que la TIR aquí obtenida es mayor, y, por lo tanto, representa una oportunidad de negocio.

Finalmente, la Relación B/C, en su proyección a cinco años, es de 1.13. Con ello, el proyecto se acepta por ser mayor que uno, lo cual significa que, durante la vida económica y vida útil de este proyecto, por cada peso de costo total invertido, se tienen 0.13 pesos de beneficios totales.

Al realizar un comparativo de la relación B/C del presente proyecto, que incluye el cultivo de nopal y la transformación de biomasa en energía, con algunos de los principales cultivos de la región de interés, se encontró que según López *et al.* (2014), la relación B/C para el nogal pecanero es de 1.34. Flores *et al.* (2008) reporta que para la alfalfa es de 1.69, y Espinoza, López y Ruiz (2010) encontraron que para melón es de 1.42. Así, el presente proyecto ofrece un beneficio-costo menor que el nogal pecanero, la alfalfa y el cultivo de melón, pero la producción de nopal se puede conducir en suelos de menor calidad y con menor volumen de agua para riego que los citados cultivos. En consecuencia, aunque la información de referencia encontrada es de años diferentes a los incluidos en el presente estudio, se observa que se obtiene una relación B/C aceptable en el presente proyecto.

Por lo tanto, las principales preocupaciones de la producción de energías limpias, a partir de la biomasa de nopal, son la competencia directa entre la producción de energía y la producción de alimentos, así como la ley que

prohíbe el establecimiento de empresas de producción eléctrica. Sin embargo, en el año 2017 se aprobó la Ley de Transición Energética, la cual en su Reglamento estipula que las empresas se pueden conectar bajo los esquemas de Net Billing (facturación neta), Net Metering (medición neta) y Venta Total (Secretaría de Gobierno [SEGOB], 2017), con lo cual se permitirá dicha producción y venta.

Adicionalmente, se considera que la implementación de la presente propuesta contribuiría a crear empleos y disminuir la migración, lo cual propiciaría la integración familiar en la región. De igual manera, ayudaría a incrementar la actividad económica, mejorar el ambiente mediante la absorción de alrededor de 70 ton de CO₂ por hectárea plantada con nopal, y contribuiría a disminuir la erosión de suelos marginales que actualmente no se utilizan por su mediana calidad agrícola. Por otra parte, la generación de energía a partir del nopal, ayudaría igualmente a disminuir la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Aké Madera, 2017, Masera-Cerutti, 2006).

Por lo tanto, con base en el análisis descrito, el presente trabajo propone el uso de tierras agrícolas que actualmente no son utilizadas, y el establecimiento de una industria productora de energía eléctrica a partir de la biomasa producida en las plantaciones de nopal. Esto, pudiera abastecer a los establecimientos comerciales del área urbana del municipio y a los establos lecheros que utilizan sistemas de ordeña eléctricos.

4. Conclusiones

De acuerdo con las características edafológicas en el municipio de Rosales, Chihuahua, es factible producir biomasa a partir del nopal *Opuntia ficus-indica* en suelos agrícolas marginales. Asimismo, las características climáticas en el municipio son

adecuadas para el cultivo de nopal, considerando únicamente la necesidad de proteger la plantación de probables heladas extremas. Para ello, se recomienda realizar análisis posteriores, y adicionalmente tomar en cuenta que la frecuencia de las heladas extremas es de 30 años en promedio.

Existe mercado potencial para el suministro de energía eléctrica a pequeños establecimientos comerciales y establos lecheros del municipio de Rosales, Chihuahua, considerando precios de venta de 1.40 a 2.05 \$/kw, del año uno al cinco respectivamente. Existe interés de comerciantes y ganaderos lecheros en invertir en la producción de energía eléctrica a partir de biomasa de nopal. Adicionalmente, con las reformas realizadas por la CFE a la Ley de Transición Energética, existe la posibilidad de vender parte de la energía eléctrica producida e incorporarla a la red eléctrica de la misma.

Por otra parte, de acuerdo con el análisis económico y financiero, que arroja indicadores positivos: TIR = 16.16%, VAN = \$1 221 509.25 y Relación B/C = 1.13, la plantación de nopal *Opuntia ficus-indica*, e instalación de una planta productora de energía eléctrica a partir de la biomasa es factible.

5. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para que el primer autor del presente cursara sus estudios de Maestría y condujera la investigación correspondiente.

A los revisores por sus valiosas observaciones y sugerencias para mejorar la calidad del presente.

6. Referencias

- [1] Álvarez Maciel, C. (2009). *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional*. *Economía Informa* (359), 63-89. Recuperado a partir de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
- [2] Aké Madera, M. (2017). *Biogás con nopal para vehículos en sustitución de combustibles fósiles*. NOPALIMEX. Zitacuaro, Michoacan. Recuperado a partir de <http://doccdn.simplesite.com/d/dc/d9/283445307363875292/d6d91cc6-74ed-4b4a-a775-fcc011c9ce4b/Generacin%2Bde%2BBiogs.pdf>
- [3] Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). *Características físicas y químicas de nopal verdura (Opuntia ficus-indica) para exportación y consumo nacional*. *Agrociencia*, 49(1), 31-51. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&tlng=es.
- [4] Cushman, J. C., Davis, S. C., Yang, X. & Borland, A. M. (2015). *Development and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands*. *Journal of Experimental Botany*, (66)14 pp. 4177-4193. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv087>
- [5] Do Nascimento Santos, T., Damilano Dutra, E., Gomes do Prado, A., Bezerra Leite, F. C., De Fátima Rodrigues de Souza, R., Cordeiro dos Santos, D., Moraes de Abreu, C. A., Ardaillon Simões, D., De Moraes, M. A. Jr, & Cezar Menezes, R. S. (2016). *Potential for biofuels from the biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol and biogas production in dry areas*. *Biomass and Bioenergy*, 85, pp 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.005>.

- [6] Lorenzo Acosta, Y. & Obaya Abreu, M. C. (2005). *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I*. ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar, XXXIX(1), 35-48. Recuperado a partir de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- [7] Masera-Cerutti, O., Aguillón-Martínez, J. E., Arvizu-Fernández, J. L., Fuentes-Gutiérrez, A. F., Ghilardi-Álvarez, A., Riegelhaupt, E. & Díaz Jiménez, R. (2006). *La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable*. México. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa Mexico, S.A. de C.V. Recuperado a partir de <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/libro-blanco-bioenergia-2006.pdf>
- [8] Observatorio de Inteligencia del Sector Energético (OISE). (2018). *Energías renovables*. Recuperado a partir de <http://www.oise.mx/renovables>
- [9] Arvizu Fernández, J.L. 2015. *Producción de biogás con nopal*. Tendencia Tecnológica, Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2015, p. 65-72. Recuperado a partir de <https://www.ineel.mx/boletin022015/tenden01.pdf>
- [10] Homer, I, Varnero, M. T., & Bedregal, C. (2020). *Nopal (Opuntia ficus-indica) energetic potential cultivated in arid and semi-arid zones of Chile: an assessment*. Idesia (Arica), 38(2), 119-127. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000200119>
- [11] Homer, I. and Varnero, M.T. (2019). *Uses of nopal biomass as a source of energy and biofertilizers*. Acta Hort. 1247, 109-116. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1247.15>
- [12] Sánchez Godoy, F. (2012). *Potencial del cultivo de la chumbera (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) para la obtención de biocombustibles*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España. http://oa.upm.es/14773/1/Francisco_Sanchez_Godoy.pdf
- [13] Varnero, M.T. & Homer, I. (2017). *Biogas production*. En: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) and the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear. Rome, p. 187-193. Recuperado a partir de <https://books.google.com.mx/books?id=6LReDwAAQBAJ&pg=PA210&lpg=PA210&dq=nopal+bioenerg%C3%ADa+san+luis+potos%C3%AD&source=bl&ots=6Od86deX7v&sig=ACfU3U2xRDOKmhWSGnCURNP-t5BnF2cZkw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj9lfWNw7HqAhVDXawKHaQIDH0Q6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q=nopal%20bioenerg%C3%ADa%20san%20luis%20potos%C3%AD&f=false>
- [14] Baca-Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos*. México, D. F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Recuperado a partir de <https://www.pinterest.com.mx/pin/58265388909482198/>.
- [15] INEGI (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Rosales, Chihuahua. Clave geoestadística 08055*. MEXICO. Recuperado a partir de http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08055.pdf.
- [16] Scheaffer, R. L., W. Mendenhall and L. Ott. 1990. *Elementary survey sampling*. Fourth edition. Belmont California. Duxbury Press.

[17] Budowski, G. (1965) Distribution of Tropical American Rain Forest Species in the Light of Successional Processes. Turrialba, 15, 40-42. Recuperado a partir de [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1826526](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1826526)

[18] Sage, R.F. & Kubien, D.S. (2007). *The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. Plant Cell and Environment* 30(9):1086-106. Recuperado a partir de https://www.researchgate.net/publication/6176892_The_temperature_response_of_C_3_and_C_4_photosynthesis

[19] Yepes, A. & Silveira Buckeridge, Marcos (2011). *Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (Revisión). Colombia Forestal*, 14(2),213-232. Recuperado a partir de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4239/423939616005>

[20] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2020). *Mapa satelital, imagen y coordenadas GPS de Presa Francisco y Madero, Chihuahua, México*. Recuperado a partir de <https://www.dices.net/america/mexico/movil/mapa.php?nombre=Presa-Francisco-I-Madero&id=25985>.

[21] Luna Vázquez, J. (2011). *Producción invernal de nopal de verdura*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigación del Noreste, Campo Experimental San Luis. Folleto para productores No. 52. San Luis Potosí, Méx. Recuperado a partir de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/879.pdf>.

[22] Díaz Franco, A., Maya Hernández, V., Álvarez Ojeda, M.G. & De la Garza Caballero, M. (2014). *Tecnología para la*

Producción Intensiva de Nopal para Verdura en Tamaulipas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigación del Noreste, Campo Experimental Río Bravo. Río Bravo, Tamaulipas, Méx. Recuperado a partir de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/987.pdf>.

[23] López, R. R.; Palafox, A. R. N.; Medina, S. M.; Ballesteros, F. G. D. y Rivera, M. M. (2014). *Análisis de rentabilidad del cultivo de nogal pecanero en la costa de Hermosillo. Revista Mexicana de Agronegocios*, 34, 872-882. <https://www.redalyc.org/pdf/141/14131514021.pdf>

[24] Flores, J. R.; Torres, J. R.; Vázquez, J. C.; Brito, J. C.; Moreno, M. T. y Quiñones, M. (2008). *Producción, productividad y rentabilidad de alfalfa (Medicago sativa) irrigada por bombeo en La Laguna de 1990 a 2005. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 7(2), 145-150. <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545067003.pdf>

[25] Espinoza Arellano, J de J., & López Robledo, M. G., & Ruiz Torres, J. (2010). *Factibilidad técnica y económica del establecimiento del cultivo del melón con riego por goteo en el municipio de Mapimí, Durango, México*. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, IX82),91-97. [fecha de consulta 14 de enero de 2022]. Recuperado a partir de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545063001>

[26] Secretaría de Gobernación (SEGOB). (2017). *Reglamento de la Ley de Transición Energética*. Diario Oficial de la Federación. 5 de abril de 2017. Recuperado a partir de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5481526&fecha=04%2F05%2F2017.