



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA

**ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA
RESIDUAL DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN
SAN JOSÉ DE LOS LAURELES, TLAYACAPAN, MORELOS**

T E S I N A
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL
DE RESIDUOS

P R E S E N T A:
AMB. MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA

DIRECTOR: DR. ALEXIS JOAVANY RODRÍGUEZ SOLÍS
CODIRECTORA: DRA. MAURA TÉLLEZ TÉLLEZ

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

EL PRESENTE TRABAJO SE REALIZÓ DURANTE EL PERIODO FEBRERO 2018-FEBRERO 2019 EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA, DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, BAJO LA DIRECCIÓN DEL DR. ALEXIS J. RODRÍGUEZ SOLÍS Y LA DRA. MAURA TÉLLEZ TÉLLEZ.

EL ESTUDIANTE MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA RECIBIO EL APOYO DEL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT), PARA LA REALIZACIÓN DE SUS ESTUDIOS DE ESPECIALIDAD. NO. DE BECA 890007.

DICTAMEN

DEDICATORIA

A TODOS AQUELLOS QUE ME HAN ENSEÑADO QUE OTRA REALIDAD ES POSIBLE Y CON ELLO ME HAN INSPIRADO A BUSCAR ALTERNATIVAS QUE CONTRIBUYAN A CONSTRUIR EL MUNDO QUE QUEREMOS.

AGRADECIMIENTOS

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT) POR LA BECA OTORGADA PARA LLEVAR A CABO ESTE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, AL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA (CEIB), EN ESPECIAL AL GRUPO ACADÉMICO QUE CONFORMA LA ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS POR SU CÁLIDO ACOMPAÑAMIENTO.

RESUMEN

La presente investigación trata de coadyuvar a la sustentabilidad en una comunidad rural, San José de los Laureles, del Municipio de Tlayacapan en el estado de Morelos, específicamente mediante el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola producida en podas de nopal *Opuntia ficus-indica*, para esto se planteó el objetivo de analizar la factibilidad de aprovechamiento de estos residuos para la obtención de biogás. Se cuantificó la biomasa residual generada del proceso de poda y se realizaron estimaciones del potencial de generación de biogás, en función de datos reportados previamente para la digestión anaerobia de estos residuos. Los datos generados en el presente trabajo indican que es factible producir biogás en volumen suficiente para satisfacer las necesidades energéticas domésticas de la comunidad, e incluso generar excedentes que pueden ser utilizados para otras actividades o para su comercialización. Además, es posible mejorar los procesos de digestión e insumos del cultivo, propiciando ventajas económicas y ambientales en beneficio de la comunidad.

PALABRAS CLAVE: Biogás, biomasa de nopal, digestión anaerobia, residuos agroindustriales.

ABSTRACT

This research seeks to contribute to sustainability in a rural community, San José de los Laureles, municipality of Tlayacapan in the state of Morelos, specifically through the use of residual agricultural biomass produced from prickly pear *Opuntia ficus-indica* pruning, for reach this the objective of analyzing the feasibility of using this waste to obtain biogas was proposed. The residual biomass generated from the pruning process was quantified and estimates of the biogas generation potential were made, based on data previously reported for the anaerobic digestion of these residues. The data generated in this work indicate that it is feasible to produce biogas in sufficient volume to satisfy the domestic energy needs of the community, and even generate surpluses that can be used for other activities or for commercialization. In addition, it is possible to improve the processes of digestion and inputs of the crop, promoting economic and environmental advantages for the benefit of the community.

KEYWORDS: Biogas, prickly pear biomass, anaerobic digestion, agroindustrial waste.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
I. MARCO REFERENCIAL	2
I.1. Problemática ambiental ligada a la agricultura intensiva	2
I.2. Biomasa residual agrícola.....	3
I.3. Biodigestión anaeróbica con base en biomasa residual	4
I.4. Procesos de la biodigestión anaeróbica	5
I.5. Estado del arte en cuanto a la producción de biogás con nopal.....	6
I.6. Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>).....	12
I.7. El cultivo del nopal <i>Opuntia ficus-indica</i>	13
I.8. Importancia de la evaluación de la factibilidad de proyectos de desarrollo sustentable.....	15
I.9. Marco legal	16
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	18
II.1. Planteamiento del problema.....	18
II.2. Justificación	20
III. OBJETIVOS.....	21
III.1. Objetivo general	21
III.2. Objetivos específicos.....	21
IV. PROPUESTA A IMPLEMENTAR (MATERIALES Y MÉTODOS).....	22
IV.1. Objeto de estudio	22
IV.2. Delimitación del objeto de estudio.....	22

IV.3. Tipo y alcance de la investigación.....	24
IV.4. Método de la investigación	25
IV.5. Paradigma o enfoque de la investigación	25
IV.6. Determinación de la muestra y el tipo y selección de muestreo.....	25
IV.7. Técnica para la obtención de datos	26
IV.8. Técnica para el manejo de datos.....	27
IV.9. Supuesto.....	28
V. PRINCIPALES HALLAZGOS (RESULTADOS Y DISCUSIÓN).....	29
V.1.2 Estimación de la BRN generada en la hectárea específica	30
V.2 Estimación de la generación de biogás con base en BRN	30
V.3 Equivalencia económica del biogás a otras fuentes de energía.....	33
V.4. Procesos de cultivo e insumos con potencial a optimizarse con la implementación del aprovechamiento de la BRN para la producción de biogás	35
VI. CONCLUSIÓN	37
VII. PERSPECTIVAS	38

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla I. Características generales del biogás	6
Tabla II. Equivalencia del biogás que pudiera generarse de BRN en contraste de fuentes de energía más usadas en la región.....	33
Tabla III: Equivalencia económica del biogás (CH ₄ -70%) que pudiera generarse de BRN a fuentes de energía usadas en SJL.....	34
Grafica I Promedios de Kg/ha generados en las parcelas muestreadas.....	29
Grafica II Producción teórica de biogás m ³ que puede generarse con la BRN muestreada según autores.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Planta piloto y despachador de biogás para automóviles en Zitácuaro, Michoacán.....	10
Figura I-2. Planta piloto con residuos en Milpa Alta.....	10
Figura I-3. Residuos de poda	11
Figura I-4. Diagrama de la codigestión para la generación de energía en una vivienda.....	12
Figura I-5. Mal manejo de residuos de agroquímicos	155
Figura IV-1. Localización del municipio de Tlayacapan	222
Figura IV-2. Ubicación del Área Natural Protegida Corredor Biológico Chichinautzin en Morelos, México.	233
Figura IV-6: Nopal en horno de secado	27
Figura V-1. Pesaje de BRN en parcela muestreada.....	29
Figura V-2: Pesaje de MS de BRN en balanza analítica.....	31
Figura V-3. Estiércol vacuno utilizado como abono del nopal.....	33
Figura V-4. Nopal procedente de podas.....	35
Figura V-5. Encostalado y acarreo de estiércol.....	36
Figura V-6. Recolección de leña.....	36
Figura VII-1: Cultivo de nopal en el Chichinautzin.....	48

INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental como resultado de las actividades agrícolas hace necesaria la implementación de sistemas de producción que impacten en menor escala al planeta. Una alternativa es el aprovechamiento de la biomasa residual generada en diversos procesos de cultivo, a través de estrategias como la obtención de abonos orgánicos, la producción de biocombustibles, la generación de piensos para la alimentación de animales, etcétera. Estudios han determinado que *Opuntia ficus-indica* es una especie de la que es posible obtener energía, mayormente en forma de biogás, mediante el proceso de biodigestión anaeróbica; sin embargo, en el estado de Morelos el aprovechamiento de los residuos de este cultivo con la finalidad de generar combustibles alternativos es mínimo. Para lograr el desarrollo de un proyecto encaminado a la generación de biogás a partir de la biomasa residual del cultivo de nopal, es necesario realizar en primera instancia un análisis de factibilidad, por lo que en esta investigación se planteó el objetivo de realizar una estimación del potencial de generación de biogás, así como de sus limitaciones y alcances socioeconómicos. Para llevarlo a cabo se realizó una cuantificación de la biomasa residual generada en los procesos de cultivo, y se efectuaron estimaciones con base en datos reportados. Este trabajo se desarrolló en San José de Los Laureles, Tlayacapan, Morelos, comunidad indígena que se encuentra dentro del área correspondiente al “Corredor Biológico El Chichinautzin”, área de protección de flora y fauna.

I. MARCO REFERENCIAL

I.1. Problemática ambiental ligada a la agricultura intensiva

En 1960, como resultado de la Revolución Verde, la industrialización agropecuaria se intensificó y se caracterizó por la utilización de semillas híbridas y animales seleccionados para obtener un alto rendimiento en la producción, utilizando maquinaria cada vez más pesada y con una tendencia a los monocultivos, así como a la exportación de productos agropecuarios, lo que generó un consumo enorme de agua, disminución de la mano de obra requerida y, sobre todo, un alto consumo de insumos como insecticidas, fungicidas, herbicidas y fertilizantes químicos sintéticos (producidos por industrias petroquímicas) (Sámano Rentería, 2013). Como resultado de lo anterior, actualmente la agricultura contribuye con 25-30% de las emisiones de gases efecto invernadero, representando fuertes impactos sobre los recursos naturales, lo que causa graves implicaciones en el ambiente y en la salud humana. Por si fuera poco, la Revolución Verde falló también en asegurar la producción de alimentos, pues se sabe que en diversos cultivos las tasas de rendimiento alcanzaron un punto decreciente (Altieri & Nicholls, 2012).

Como alternativa ante estas problemáticas surge la necesidad de retomar el diseño e implementación de sistemas agroecológicos en los que se mantenga el diálogo y la combinación entre los saberes tradicionales originarios y modernos, a fin de lograr una agricultura resiliente, socialmente justa y que mantenga la producción. Para su implementación, al menos en el medio rural, es necesaria la participación principalmente de los productores originarios, lo que hace posible que les resulte factible (Toledo & Barrera-Bassols, 2008; Sámano Rentería, 2013; FAO, 2011).

I.2. Biomasa residual agrícola

Uno de los principios agroecológicos que puede contribuir a resolver las problemáticas que se agravan con el modelo de agricultura industrializada es el reciclaje de biomasa, con miras a optimizar la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes a través del tiempo (Altieri & Nicholls, 2012). Biomasa se denomina al conjunto heterogéneo de materia de origen orgánico (vegetal, animal o de microorganismos), tiene múltiples utilidades, pues constituye la base de las redes tróficas y es materia prima para un gran número de industrias. Actualmente las actividades agrícolas, forestales, ganaderas y las zonas urbanas son las que generan mayor cantidad de biomasa residual. Sin embargo, pese a que la reutilización de la biomasa es atractiva, también es limitada, ya que generalmente la importancia del tratamiento de estos materiales se ha dado por el aspecto ambiental (Romero, 2010; Velázquez, 2011).

La biomasa residual puede ser usada como abono al realizar un proceso de compostaje, mejorando las propiedades del suelo (Román, Martínez, & Pantoja, 2013), además, al darle un manejo adecuado se evita que ésta pueda convertirse en un vector de plagas (Altieri, 1999). Por otro lado, la biomasa se utiliza como fuente de energía mediante combustión, pero también se puede utilizar como materia prima para la generación de energías alternativas, mediante procesos de transformación físicos, químicos y biológicos, para la obtención de biocombustibles líquidos y gaseosos, tales como biodiesel, bioetanol y biogás (Velázquez, 2011).

Una gran cantidad de biomasa residual con posibilidad de aprovechamiento energético proviene de la agricultura, especialmente en procedimientos de poda, renovación de plantaciones o restos de cosecha. Actualmente en la mayoría de los modelos agrícolas convencionales, estos residuos no son valorizados y el manejo que se les da representa altos costos y riesgos ambientales (Velázquez, 2011). El aprovechamiento de la biomasa residual, aparte de ser una fuente de energía alternativa, brinda una opción viable ante la fuerte controversia entre enfocar el campo a la producción de agrocombustibles o de alimentos (Suárez, 2015).

I.3. Biodigestión anaeróbica con base en biomasa residual

Desde la antigüedad existe evidencia de que la biodigestión anaeróbica ha sido conocida y utilizada en diferentes procesos, por ejemplo, en la obtención de etanol o el curtido de cuero. En cuanto al biogás se sabe que aproximadamente en el año 50 a.C., en regiones de Mesopotamia se usaba en el calentamiento de baños. En 1776, Volta determinó que existía una relación entre la materia orgánica y el gas producido. A inicios del siglo XIX, Dalton y Davy determinaron que este gas combustible era metano. En 1884 Louis Pasteur y su discípulo Gayón produjeron 100 L de biogás a partir de estiércol de caballo colectado de las calles de París, y pronosticaban que esta tecnología tenía la capacidad de iluminar la ciudad. Alemania fue el primer país que estableció el mercado del biogás, al introducirlo a las redes públicas en 1923. La popularidad del biogás continuó en aumento, hasta que de los años 50's a los 80's entraron en auge los combustibles fósiles, provocando una drástica caída del precio e interés por el biogás (Deublein & Steinhauser, 2008; Guevara, 1996).

Actualmente la digestión anaeróbica ha recobrado su importancia y representa una alternativa como fuente de energía a partir de recursos renovables, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Campos-Montiel, y otros, 2017). Su uso es frecuente en países como Dinamarca, Suecia, España, Francia, Alemania, India y China; sin embargo, en otros países donde incluso existe una mayor cantidad de biomasa disponible, ésta se emplea en la generación de energía calórica mediante incineración o simplemente no se utiliza. La falta de información y de incentivos, entre otras, son las causas de esta situación (Martínez-Arce, 2013). En México, los proyectos de recuperación de biogás se han centrado en plantas tratadoras de agua y en rellenos sanitarios, siendo el Bordo Poniente, en la Ciudad de México, el proyecto con mayor amplitud. En el país, las principales líneas de investigación en esta área se han enfocado en el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos y la biomasa residual del cultivo del nopal, la caña y el bambú (Huacuz, 2013).

I.4. Procesos de la biodigestión anaeróbica

Como se menciona anteriormente, existe la posibilidad de aprovechar la biomasa residual generada en diversas actividades humanas para la obtención de productos con valor agregado. La degradación de estos materiales puede llevarse a cabo mediante digestión aeróbica o anaeróbica; en la primera, la materia orgánica se encuentra al descubierto y por ende con una aireación constante, de tal forma que las células se oxidan. La producción del biogás se realiza en procesos de digestión anaeróbica en los que mediante una serie de complejas reacciones bioquímicas en ausencia de oxígeno, se genera una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), más trazas de otros gases como el vapor de agua, sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N_2), entre otros (los cuales se sugiere separar para obtener un biogás más puro y aumentar el poder calórico). Las proporciones varían dependiendo de la composición de la materia en degradación, cuando el metano representa 45% o más el gas es inflamable. Este biogás puede ser capturado en contenedores y posteriormente utilizado para generar energía calórica y/o eléctrica. La biodigestión anaeróbica es una tecnología que posee grandes ventajas, ya que logra sanear residuos, convertirlos en abono y fertilizante orgánico, y a la par generar energía (FAO, 2011; Rivas, Faith, & Guillén, 2010).

En la digestión anaeróbica los microorganismos, principalmente bacterias y arqueas, juegan un papel fundamental para la obtención de biogás, por lo que es necesario optimizar el desarrollo de las comunidades de estos microorganismos; para lograrlo es necesario considerar algunos factores. La relación carbono-nitrógeno debe ser aproximadamente de 30:1 respectivamente; de ser mayor la proporción de nitrógeno se forma amonio, que puede llegar a ser tóxico para los microorganismos metanogénicos, por esta razón se recomiendan las mezclas de sustratos para obtener un balance. La temperatura y el pH también son factores determinantes; se recomienda un pH de 6 y no mantener temperaturas bajas, siendo 35°C una temperatura óptima, ya que de lo contrario podría reducir las poblaciones microbianas, en la tabla I. se muestran características generales del

biogás. También es importante el diseño del biodigestor, dado que durante estos procesos parte de la biomasa se transforma en gas, por lo que el volumen del abono generado será menor a cuando eran materias primas (Díaz García, 2016; Deublein & Steinhauser, 2008; Guevara, 1996).

Los estudios realizados dividen el proceso de descomposición anaeróbica de biomasa en:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

Los principales componentes de un digestor anaeróbico son: un contenedor de la biomasa a digerir con entrada de biomasa y salida del digestato (abono orgánico en formas sólida y líquida) y un contenedor de gas con accesorios para salida de biogás (FAO, 2011).

Tabla I. Características generales del biogás

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein & Steinhauser (2008).

I.5. Estado del arte en cuanto a la producción de biogás con nopal

Se han realizado algunos estudios que concluyen la viabilidad de usar nopal en procesos de obtención de energía, pues dicho recurso representa una fuente

renovable de gran potencial, con capacidad de brindar biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser utilizados en la producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte, además de abonos y fertilizantes. No obstante, la generación de biocombustibles a partir de la biomasa de nopal es de carácter experimental (Méndez-Gallegos, Rössel, Amante-Orozco, Gómez-González, & García-Herrera, 2010).

Al revisar investigaciones al respecto, se muestra que la biodigestión anaeróbica para la obtención de biogás, es la tecnología que presenta mayores ventajas, las cuales radican principalmente en el potencial energético del biogás, los bajos costos y facilidad de operación de los biodigestores, la obtención de abonos y fertilizantes orgánicos, así como la abundancia de biomasa, que es capaz de producir el cultivo, siendo preferente usar los residuos provenientes de podas y renovaciones de las plantaciones para no entrar en conflictos sociales por la controversia de si es mejor producir energía o alimentos. A continuación se mencionan los resultados de algunos de estas investigaciones.

Arrenguin, Ramos, Carapia & Lezama (2016) realizaron un estudio con el objetivo de encontrar una manera óptima para la obtención de biogás y tener una aproximación de la cantidad que se puede producir a partir de biomasa del nopal a nivel laboratorio, así como identificar los factores que intervienen en el proceso. Evaluaron la producción de biogás con residuos de nopal mezclados con diferentes excrementos a diferentes temperaturas, obteniendo como resultado una cantidad significativa de biogás en todas las muestras, pero la mayor producción de se dio en la proporción 3:1 de nopal/estiércol de borrego a una temperatura de 30°C, manteniendo un pH de neutro a ligeramente ácido. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Uribe, Varnero & Benavides años antes (1992).

Bolivar (2017) realizó un estudio de investigación en el cual hizo un análisis socioambiental, técnico y económico para evaluar la factibilidad de usar nopal y estiércol como sustratos en proyectos de inversión para plantas de biogás a pequeña escala. El análisis socioambiental dio como resultado que las mayores

fortalezas de estos proyectos son: la capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la disponibilidad de obtener un abono más higienizado y la generación de mano de obra. De los resultados del análisis técnico se supo que los estiércoles por sí solos tienen potenciales muy bajos para la producción de biogás; sin embargo, al utilizar el nopal en la codigestión la producción mejora, siendo 30% nopal y 70% estiércol la mezcla óptima, generando biogás con 63% de metano. En cuanto al análisis económico se concluyó que, considerando los variables precios del mercado, las plantas de biogás a pequeña escala son viables económicamente, siempre y cuando la energía y el abono producidos sean usados para el autoconsumo.

Sánchez-Godoy (2012) realizó una investigación con el objetivo de evaluar el potencial del cultivo de nopal para la obtención de bioetanol no celulósico y biogás. Para lograr esto, diseñó procesos a escala industrial que permitieran la transformación de los cladodios en ambos productos, y determinó sus balances energéticos. Por último, estimó el potencial de producción de ambos combustibles en un área semiárida apta para el cultivo de nopal y no para otros. Según los cálculos realizados, existe el potencial para la obtención de ambos biocombustibles en procesos industriales e incluso generar excedentes energéticos. Además se obtuvieron mejores resultados en cuanto a la producción de biogás (con un 52.5% de metano), debido a una mayor generación de energía, así como a la dependencia de una menor superficie cultivada y menores costos; lo que sugiere que el empleo del cultivo del nopal para la producción de biogás es más factible que en la obtención de bioetanol.

Quintanar y otros (2016), realizaron un trabajo que consistió en el diseño conceptual de una planta de digestión anaeróbica para la producción de biogás a partir de residuos de nopal, considerando que éstos representan una fuente abundante de biomasa que puede ser utilizada. El dimensionamiento de la planta se realizó con el programa Biodigestor-Pro versión 3.5; los criterios usados fueron los siguientes: características del sitio, de la biomasa a tratar, tipo y configuración

del tratamiento, cantidad y calidad del biogás producido, y con base en esto lograron diseñar y dimensionar teóricamente un sistema a escala real para producir biogás con un contenido de 75.9% de gas metano a una temperatura de operación de 35°C.

Díaz García (2016) realizó un estudio con el objetivo de identificar la mayor cantidad de microorganismos presentes en una muestra procedente de un biodigestor de nopal. Se identificaron únicamente microorganismos del dominio de los procariontes; no se identificaron arqueas. Asimismo, 205 secuencias de ADN fueron asignadas al *Phylum Firmicutes*, grupo de bacterias caracterizadas por la degradación de la materia verde para la producción de dióxido de carbono.

En el año 2010, en Camébaro, municipio de Zitácuaro, Michoacán, se construyó y puso en operación una planta piloto (Figura I-1) de un biodigestor con un volumen de 100 m³ para la producción de biogás, el cual tiene la capacidad de recibir 8 ton de biomasa al día que se produce en un cultivo establecido en el mismo sitio. Inicialmente se tenía la intención de producir energía para su autoconsumo, pero al estar produciendo 800 m³ de biogás al día, se suministra parte del excedente a tortillerías de la localidad. Además, en el año 2016 lograron comprimir el gas y utilizarlo como sustituto de combustible en automóviles adaptados (Aké-Madera, 2017; Aké-Madera, 2015).

Por otro lado, un estudio determinó que los residuos de podas pueden rendir aproximadamente 10 ton de materia seca por hectárea en un año, los cuales pueden proveer de materia prima a los biodigestores; se menciona la importancia de usar los cladodios recién cortados y picados para mejorar la producción de biogás y fertilizante (Varnero & Homer, 2018).



Figura I-1. Planta piloto y despachador de biogás para automóviles en Zitácuaro, Michoacán. Fuente: Aké-Madera (2017).

Otro caso se encuentra en Milpa Alta, Ciudad de México (Figura I-2), donde gracias al hábito de separación de residuos (la mayor parte residuos de nopal), fue posible la operatividad de la planta piloto de biogás más grande de América Latina. El biogás obtenido es transformado en energía eléctrica, y actualmente abastece energía a un mercado y a un centro de acopio: la energía equivalente al suministro de 100 casas. Éstos son ejemplos de cómo lograr la autosustentabilidad energética (Pacheco, 2017).



**Figura I-2. Planta piloto con residuos en Milpa Alta
Fuente: Pacheco (2017).**

En suma, según las investigaciones mencionadas anteriormente, para que se lleve a cabo exitosamente la producción de biogás, con un aproximado de 70% de metano, se recomienda realizar una codigestión, es decir, adicionar estiércoles, ya

que los cladodios del nopal por sí solos no son un buen material metanogénico. Sin embargo, en el caso de Michoacán se obtuvo una producción incluso con excedentes utilizando solamente nopal (Aké-Madera, 2017). Además, es preferible usar las pencas recién cortadas (figura I-3) y picadas para eficientizar la producción de biogás (Varnero & Homer, 2018; Bolívar, 2017; Arreguin , Ramos , Carapia, & Lezama, 2016; Sánchez Godoy, 2012; Uribe , Varnero, & Benavides, 1992).

La implementación de esta tecnología en comunidades rurales es ideal, ya que permite activar la economía de microempresas, propiciar la autonomía energética en viviendas y formar una conciencia ambiental que contribuya al saneamiento de fluentes residuales y a la disminución de la degradación ambiental (figura I-4) (Matos-Mendoza, Ramírez-Peña, & Caballero-Batista, 2017; Bolívar, 2017; Aké-Madera, 2015; Guevara, 1996).

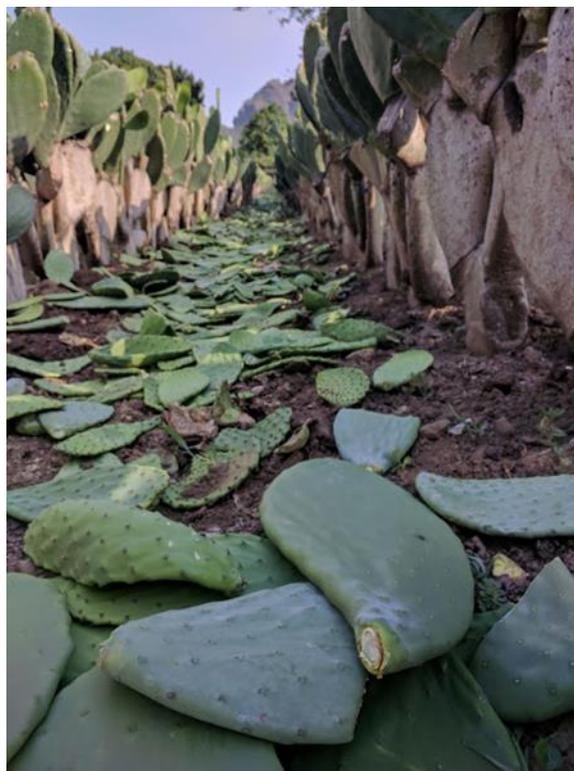


Figura I-3. Residuos de poda. Fuente: Elaboración propia.

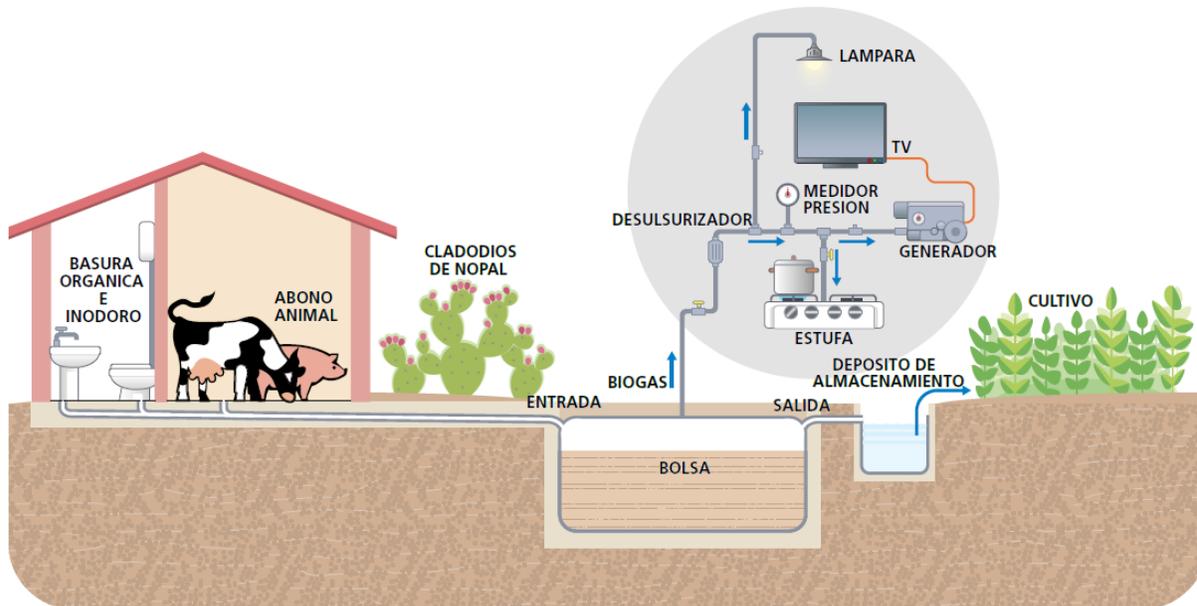


Figura I-4. Diagrama de la codigestión para la generación de energía en una vivienda.
Fuente: Varnero & Homer (2018).

I.6. Nopal (*Opuntia ficus-indica*)

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una especie perteneciente a la familia *Cactaceae* de gran importancia económica en el mundo. Particularmente en México la producción de nopal como verdura alcanza el primer lugar (74%) a nivel global (Maki-Díaz, Peña-Valdivia, García-Nava, & Arévalo-Galarza, 2015; Reyes-Agüero, Aguirre-Rivera, & Hernández, 2005), éste se cultiva principalmente para alimento humano por sus cladodios y por sus frutos, pero también como forraje para los animales (Kiesling & Metzging, 2018; Reyes-Agüero, Aguirre-Rivera, & Hernández, 2005).

Opuntia ficus-indica cuenta con una larga historia de uso y manejo desde tiempos prehistóricos en nuestro país. Es el resultado de la selección artificial y el cultivo realizado desde hace aproximadamente 8,000 años hasta la actualidad en un complejo proceso de domesticación. México, se ha identificado como centro de origen y uno de los principales centros de diversificación; sin embargo, *Opuntia ficus-indica* actualmente se ha vuelto una especie cosmopolita (Ochoa & Barbera, 2018; Kiesling & Metzging, 2018; Griffth, 2004).

Así mismo, y como consecuencia de esta larga interacción humano-planta, el nopal también juega un papel canónico en la cultura del mexicano, siendo parte de uno de los símbolos más representativos desde la fundación de la gran Tenochtitlán hasta la actualidad, de tal suerte que constituye una parte de la identidad de esta nación (Vela, 2018; Caso, 2015). Además, es importante mencionar que desde esos tiempos, ya se conocía como una planta multipropósito, la cual se consumía como alimento, medicamento, fuente de pigmentos y en el proceso de fabricación de *nocheztli* o colorante extraído de la grana cochinilla (*Dactilopius coccus*), como bebida y usos de tipo ceremonial (Ochoa & Barbera, 2018; Anaya-Pérez, 2003).

Actualmente, como legado histórico de su aprovechamiento y consecuencia de una cultura en movimiento, se han conservado y adaptado nuevos usos como son: el forrajeo de animales, elaboración de cosméticos, cercas vivas y para beneficios de tipo agroecosistémicos como: control de erosión, retención de suelo, fijación de carbono, entre otros (Mondragón & Chessa, 2018; Anaya-Pérez, 2003).

I.7. El cultivo del nopal *Opuntia ficus-indica*

A partir de los años 80's, en México, el cultivo de nopal se considera formalmente como hortaliza debido a la alta producción en Milpa Alta, Ciudad de México con una superficie de 4,250 ha y Tlalnepantla en el estado de Morelos con una superficie de 3,256.00 ha, donde a nivel nacional, actualmente se sostiene el primer y segundo lugar respectivamente. En Morelos hay una producción de 341,642.00 ton, con un rendimiento promedio de 105 ton/ha y el valor de la producción representó más de 400 millones de pesos (Mondragón & Méndez, 2018; Rangel, Ramírez, & Ozuna, 2013).

Morelos que presenta terrenos muy accidentados y un régimen de temporal marcado parece tener las condiciones climáticas aptas para la producción de nopal, ya que este cultivo tiene varias ventajas adaptativas, por ejemplo: sobrevivir

en ambientes áridos y semiáridos, resistir largos periodos de sequías o a disponibilidad de agua restringida durante todo el año y tolerar altas temperaturas (Inglese, Liguori , & Barrera, 2018; Rangel, Ramírez, & Ozuna, 2013; Quezada, 2007). Sin embargo, el cultivo no está exento a las consecuencias del actual modelo de producción, el cual se caracteriza por el empleo de agroquímicos sintéticos, lo que aunado a otros factores de manejo del cultivo, genera un círculo vicioso en el que el sistema tiende a un desbalance ecológico. Así, entre más frecuente sea el empleo de dichos productos, es mayor la demanda de éstos y, como consecuencia, las plagas aumentan al generar resistencia y no tener depredadores naturales (Altieri, 1999). Por lo anterior, aun cuando el cultivo y la región presentan varias ventajas, no están exentos a tener problemáticas en cuanto a las plagas. Las principales plagas que afectan a los cultivos en el estado de Morelos son: picudo (*Metamasius spinolae* Gyllenhal), cochinilla silvestre (*Dactylopius opuntiae* Cockerell), mancha negra (*Pseudocercospora opuntiae*), mancha (*Phoma* sp. y *Macrophomina* sp.) y gusano (*Pyralidae*) (Rangel, Ramírez, & Ozuna, 2013; Quezada, 2007).

Este cultivo está predominantemente en seis municipios, entre los cuales se encuentra Tlayacapan, en donde ocupa una superficie aproximada de 400 ha, que representa cerca del 12% de la superficie total ocupada para el cultivo del nopal en el estado (Rangel, Ramírez, & Ozuna, 2013; Quezada, 2007).

I.8. Importancia de la evaluación de la factibilidad de proyectos de desarrollo sustentable

El desarrollo sustentable se define como “aquel desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer las opciones de las necesidades futuras”. Para tratar de lograrlo se debe tener una visión multi y transdisciplinaria que englobe ámbitos ambientales, económicos y sociales (López Ricalde, López-Hernández, & Ancona Peniche, 2005).

Es sabido que el cultivo del nopal representa diversos impactos negativos al ambiente por lo que es necesario desarrollar nuevos modelos de cultivo así como del tratamiento de los residuos generados en este (figura I-5), la



Figura I-5. Mal manejo de residuos de agroquímicos

Fuente: Elaboración propia.

implementación de biodigestores representa ventajas ambientales; sin embargo, es sumamente importante realizar una evaluación de la factibilidad socioeconómica para vislumbrar el éxito o la inviabilidad del planteamiento (Tepella, 2007).

Existen estudios en los que se aborda la factibilidad del uso nopal para la generación de biogás (Bolívar, 2017; Arreguin , Ramos , Carapia, & Lezama, 2016; Méndez-Gallegos, Rössel, Amante-Orozco, Gómez-González, & García-Herrera, 2010; Romero, 2010; Sánchez Godoy, 2012; Uribe , Varnero, & Benavides, 1992) y algunos otros en los que se contempla la utilización de la biomasa residual (Varnero & Homer, 2018; Quintanar, y otros, 2016), aunque no de una manera extensa. Entre los indicadores que se evalúan para conocer la factibilidad destacan:

el número de jornales, los consumibles (combustible, agroquímicos y abonos orgánicos), rendimientos (productos), inversión de capital, ahorros generados, financiamientos y o subsidios, capacitaciones, el respaldo institucional, impacto ambiental, entre otros. Lo anterior, permite a los productores y tomadores de decisiones, evaluar en forma clara y objetiva, las principales debilidades de los sistemas de producción, así como propuestas de proyectos productivos con base en las potencialidades y limitantes en sus prácticas de manejo; y así, orientar los esfuerzos y recursos económicos para atenderlos. Es por ello que parece necesario ajustar los indicadores a las condiciones y necesidades de cada región. Así, el papel de las instituciones encargadas de promover el desarrollo rural será fundamental al invertir en esquemas continuos de capacitación y asistencia técnica en la parte tecnológica, organizativa y de mercado (Kú, Pool, Mendoza, & Aguirre, 2013).

I.9. Marco legal

Este proyecto puede analizarse desde varias perspectivas debido a que está interrelacionado con diversos ámbitos. Por un lado, dado a que se trabajará con biomasa residual agrícola, se tiene que considerar la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en la cual se clasifica en el artículo 19 fracción III, a los residuos agrícolas (entre otros) como de manejo especial, a quienes esta ley define como “aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos” (DOF, 2018). Así mismo, por la tendencia normativa de considerar los residuos de manejo especial como fuente de materias primas para diferentes procesos, como los energéticos, se creó la NOM-161-SEMARNAT-2011, en la cual se establecen los criterios para su clasificación y determinación de quienes están sujetos a plan de manejo (DOF, 2013).

Este proyecto atendería además el cumplimiento del artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el cual habla del derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar (DOF, 2017); a su vez, al estar relacionado con la generación de energía, se atiende la Ley de Transición Energética, específicamente al artículo 2, fracción IX, en donde se promueve el aprovechamiento energético de los recursos renovables y de los residuos (DOF, 2015) y, también, a la Ley General de Cambio Climático, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de generación de fuentes de energía limpia (DOF, 2015).

Recientemente, debido a la creciente consideración de los residuos de manejo especial como fuente de materias primas para procesos de manufactura o de aprovechamiento energético y con la finalidad de impulsar la formulación de planes de manejo adecuados, se desarrolló y publicó la NOM-161-SEMARNAT-2011 (SEMARNAT 2013), la cual establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo.

Finalmente es importante considerar que esta investigación puede coadyuvar al principal propósito de la preservación de la biodiversidad en la decretada área natural protegida “Corredor biológico El Chichinautzin”, mayormente por estar dentro de la zona núcleo ‘Cerro de las Mariposas’, por lo que obedece a lo establecido en la LEGEPA (entre otras normativas) (DOF, 1988).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

II.1. Planteamiento del problema

El acelerado deterioro ambiental es consecuencia del modelo económico que, desde el siglo XV, fundamenta el desarrollo en torno al uso extensivo de la tecnología y al aumento de las ganancias, generando procesos de destrucción ecológica y degradación ambiental los cuales son considerados “externalidades” del sistema, donde la naturaleza es vista como el almacén de materias primas desterrada de la esfera de la producción por la racionalidad económica (Leff, 2002).

Un ejemplo de este proceso es la agricultura moderna, la cual se ha vuelto extensiva en miras de satisfacer las necesidades del incremento desmedido de la población, pero sobretodo de las dinámicas de globalización que buscan homogenizar las formas de producción dependientes a combustibles fósiles. Dotan de los mismos recursos a toda la humanidad y destruyen la diversidad que se mantiene en una producción agrícola diferenciada, sin ahondar en las contradicciones sociales, donde unos consumen hasta el exceso e incluso llegando al desperdicio, mientras otros mueren de hambre.

Así, dicha agricultura tecnificada con alta dependencia de combustibles fósiles, ha modificado los ecosistemas a través de la tala desmedida, uso excesivo del agua, modificaciones genéticas, distribución desigual de la tierra, etcétera. Lo que por consecuencia ha generado que la agricultura sea responsable de aproximadamente el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero, modificando tendencias climáticas y comprometiendo la capacidad del mundo para producir alimento en el futuro (Altieri & Nicholls, 2012), formándose así un círculo vicioso.

En la comunidad de San José de los Laureles, la cual forma parte del corredor biológico “El Chichinautzin”, así como también en varias localidades de la región noroeste del estado de Morelos, uno de los principales cultivos es el

nopal. Éste abarca una superficie considerable que va en aumento; sin embargo, aun cuando las características adaptativas de este cultivo representan varias ventajas para su permanencia y reproducción, no se encuentra exento de un manejo basado en el uso de una amplia gama de agroquímicos sintéticos, muchos de ellos catalogados de alta toxicidad, aspecto que impacta económica, social y ambientalmente (Rangel, Ramírez, & Ozuna, 2013).

Dado lo anterior, es de suma importancia el desarrollo e implementación de estrategias alternativas. Y, una de las acciones que puede contribuir a este objetivo es el reciclaje de biomasa residual, el cual optimiza la descomposición de materia orgánica y el ciclo de nutrientes, representando diversas ventajas ecológicas, por ejemplo: minimización a la dependencia de fertilizantes químicos sintéticos (Altieri & Nicholls, 2012) y por el contrario la obtención de abonos orgánicos; además, mediante la adopción de tecnologías agroindustriales, es posible obtener biogás de la materia orgánica residual, el cual puede transformarse en energía calórica o eléctrica, atendiendo de esta forma las problemáticas que constituyen la manera convencional de obtención y distribución de energía; así mismo, se evita la fuerte controversia entre producir agrocombustibles o alimentos (Aké-Madera, 2015; Suárez, 2015).

Sin embargo, estas alternativas dependen en mayor parte de los actores sociales, es decir, de los manejadores cotidianos de los sistemas agrícolas, ya que es común que exista rechazo social a proyectos de energías alternativas (Trobo, 2013). Por lo que el éxito o fracaso del proyecto depende directamente de la participación y apropiación de los productores locales, lo que hace necesaria una evaluación de la factibilidad, para que en un futuro esta propuesta pueda ser evaluada y, si es el caso, desarrollada (Tepella, 2007).

Planteada esta problemática, en este trabajo de investigación se trata de responder a las siguientes preguntas: ¿Qué cantidad de biomasa residual se generará en el cultivo de nopal bajo las condiciones ambientales y de manejo de esta comunidad? ¿Será esta cantidad suficiente para que sea propicia la obtención

de biogás? ¿Podrá ser factible la implementación de biodigestores para la generación de biogás a partir de residuos de nopal?

II.2. Justificación

Este trabajo se justifica al proponer la cuantificación de biomasa residual susceptible de aprovechamiento en la producción de biogás en la comunidad de San José de los Laureles, lo que podrá ampliar los criterios y perspectivas en cuanto a la susceptibilidad y rentabilidad en la utilización de los residuos del nopal, sentando las bases para el diseño de un biodigestor y posteriormente la producción de biogás que podrá ser utilizada como fuente de energía alternativa, además de abono orgánico y fertilizante, reduciendo la dependencia a agroquímicos sintéticos, beneficiando económicamente a la comunidad, disminuyendo los riesgos a la salud humana y contribuyendo a la conservación del corredor biológico “El Chichinautzin”, dentro del cual se encuentra la comunidad.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

Analizar la factibilidad de aprovechamiento de la biomasa residual de nopal *Opuntia ficus-indica* para la obtención de biogás en San José de los Laureles, Tlayacapan, Morelos.

III.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la biomasa residual generada en el cultivo del nopal.
- Estimar la producción de biogás con base en los residuos del cultivo.
- Plantear ventajas del uso de biogás obtenido de los residuos del cultivo de nopal en San José de los Laureles.

IV. PROPUESTA A IMPLEMENTAR (MATERIALES Y MÉTODOS)

IV.1. Objeto de estudio

El objeto de la presente investigación es la biomasa residual generada del cultivo de nopal que potencialmente pudiera estar sujeta al aprovechamiento para la producción de biogás y abonos orgánicos.

IV.2. Delimitación del objeto de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en el municipio de Tlayacapan (Figura IV-1), cuyo significado de origen náhuatl es: “Sobre la punta de la tierra” (INAFED, 2018), específicamente en la comunidad San José de los Laureles (antes llamada Tlalmimilolpan) la cual está situada dentro del área natural protegida “Corredor biológico El Chichinautzin” (Figura IV-2) donde abarca la zona núcleo “Cerro de las Mariposas” (DOF, 1988).



Figura IV-1. Localización del municipio de Tlayacapan
Fuente: Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tlayacapan, Morelos, 2011.



Figura IV-2. Ubicación del Área Natural Protegida Corredor Biológico Chichinautzin en Morelos, México

Fuente: (Colín-Bahena, Monroy-Martínez, & Rodríguez-Chávez, 2016).

El municipio se localiza al noreste del estado de Morelos, entre los paralelos 18° 54' y 18° 59' de latitud norte; los meridianos 98° 55' y 99° 01' de longitud oeste; cuenta con una altitud entre 1,200 y 2,200 msnm. Colinda con los municipios de Tlalnepantla y Totolapan, Atlatlahucan, Tepoztlán y Yautepec. El clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (96.0%); el rango de temperatura es de 16–24°C y el de precipitación de 800–1 000 mm. Los tipos de suelo dominantes son regosol y andosol; en cuanto al uso de suelo destacan la agricultura y zona urbana, además de estos tres tipos de vegetación: selva baja caducifolia, bosque de encino, y pastizal (INEGI, 2010). De sus suelos cultivados el nopal ocupa el 70% (Colín-Bahena, Monroy-Martínez, & Rodríguez-Chávez, 2016), área en el que se realizó este trabajo de investigación.

Entre las actividades económicas que destacan en la comunidad están: el turismo, la música, la alfarería y sobre todo las actividades agrícolas. Así, a pesar

de las crisis que sufre el campo, los productores han sabido adaptarse y, actualmente el 70% de la población se dedica a dicha actividad. San José de los Laureles (SJL) (una de las 32 localidades del municipio) se encuentra en un alto grado de marginación, tiene una población de 1,370 personas de las cuales el 12% habla el idioma náhuatl (SEDESOL, 2018; CDI, 2010).

Coexisten dos formas de organización: la tradicional y la comunal. La primera se caracteriza por la elección de sus líderes por medio de asambleas, por una resistencia cultural a factores externos y una apropiación de la naturaleza. Por el contrario, en la organización comunal eligen a un presidente reconocido por el gobierno mediante el cual se relacionan con el exterior. En general la comunidad tiene conocimiento de estar en un área decretada como protegida pero no parecen dimensionar las implicaciones. Sin embargo lo anterior, no impide que prevalezca una cosmovisión conservacionista; aunque se logran identificar problemáticas ambientales, principalmente ligados a monocultivos y la extracción de especies (algunas de ellas endémicas) por personas nativas y ajenas de la comunidad (Colín-Bahena, Monroy-Martínez, & Rodríguez-Chávez, 2016; Corrales-Mendoza, 2011).

IV.3. Tipo y alcance de la investigación

Esta investigación es de tipo no experimental-transversal, ya que no incide o modifica la biomasa residual generada, simplemente se registraron y analizaron los datos obtenidos.

Además este trabajo es de tipo exploratorio, ya que a pesar de que existen algunos trabajos ligeramente parecidos, no hay información reportada acerca de la cantidad de biomasa residual generada en el cultivo de nopal en este estado ni en el país. Así, el obtener estos datos nos permitió considerar la factibilidad socioeconómica y estimar el potencial del aprovechamiento de los residuos orgánicos en cuestiones energéticas en la zona.

IV.4. Método de la investigación

Se utilizó un método de investigación exploratorio considerando que no hay estudios sobre la evaluación de factibilidad del aprovechamiento de Biomasa Residual del Nopal (BRN) para la obtención de biogás en este estado ya que los estudios ligeramente parecidos se llevaron a cabo bajo condiciones ambientales muy diferentes. El método de investigación exploratorio se define como aquél que “se realiza cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Este método ayuda a familiarizarse con fenómenos desconocidos, obtener información para realizar una investigación más completa de un contexto particular, investigar nuevos problemas, identificar conceptos o variables promisorias, establecer prioridades para investigaciones futuras o sugerir afirmaciones y postulados” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

IV.5. Paradigma o enfoque de la investigación

Esta investigación tiene un enfoque mixto: cuantitativo ya que se determinó el peso de la biomasa residual generada en el cultivo del nopal (ton/ha) y una estimación del biogás que pudiera generarse; y cualitativo por el planteamiento de las ventajas del aprovechamiento de residuos para la obtención de biogás.

IV.6. Determinación de la muestra y el tipo y selección de muestreo

Para determinar la biomasa residual que se genera en una parcela de aproximadamente 1 ha, se realizó un muestreo en los meses de septiembre a noviembre en las parcelas que cumplieran con las características de haber sido podadas recientemente (menos de un mes) y que las plantas fueran mayores a 1 metro de altura, se seleccionaron al azar 14 parcelas.

Así, para obtener el tamaño de muestra (número de parcelas muestreadas) se realizó de acuerdo con la fórmula descrita por Daniel (2014), a partir de una población infinita, ya que se desconoce la superficie total cultivada:

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{d^2}$$

Dónde:

Z es el valor z de la distribución normal coeficiente de confianza

σ es la desviación estándar

d es el intervalo de confianza.

Por cada parcela se realizaron tres repeticiones. El método de muestreo para cada repetición fue siguiendo el método de línea intercepto (Canfiel, 1941), donde en un surco seleccionado al azar, dentro de la parcela, se trazaron líneas de 10 m de longitud sobre las cuales se pesaron los kg de BRN.

IV.7. Técnica para la obtención de datos

Se emplearon los métodos de observación participante así como de entrevistas informales y semiestructuradas descritos por Russell (1995), que consiste en platicar con productores (informantes clave) en la cotidianidad de las labores de la comunidad. Lo anterior con la finalidad de documentar información que nos permitió establecer una cuantificación más cercana a la realidad de biomasa residual y posteriormente evaluar la factibilidad de la producción de biogás con base en BRN. Los datos de interés a obtener fueron las formas de manejo del cultivo (fechas de podas, distribución de las plantas, producción y manejo de la biomasa residual) así como los costos de mano de obra y de los principales consumibles utilizados (agroquímicos, abonos y combustibles).

La cuantificación de biomasa residual generada se realizó mediante una estimación de los muestreos en cultivos recién podados. La medida estándar en la que se reportan los datos es kg/ha en promedio, se realizaron muestreos en 14 parcelas de aproximadamente 1 ha c/u, en cada parcela se tomaron tres muestras al azar de 10 metros de longitud asignados aleatoriamente en surcos con BRN; de

las muestras al azar de 10 m de longitud en cada parcela se obtuvo un promedio y se extrapolaron para calcular la BRN generada por hectárea.

Debido a que esta cuantificación se realizó en un periodo en el que las podas son mínimas (septiembre a noviembre), se hizo una predicción en solo una de las 14 parcelas de la BRN que pudiera generarse para el periodo (febrero a abril) en el que las podas generan mayor biomasa. Para lo cual se eligieron 5 plantas mediante la técnica de 5 de oros dentro de una hectárea: una en cada esquina del cuadrante y una en el centro. Posteriormente se podaron los cladodios según las indicaciones de los productores que realizan la poda y se pesaron. Con estos datos se generó un promedio y de acuerdo a la distribución de las plantas en el cultivo se estimó la generación total de BRN/ha en este periodo.

IV.8. Técnica para el manejo de datos

Con los valores obtenidos de los pesajes se generó una base de datos en Excel ® y se obtuvo el promedio de la BRN en kg/ha.

Posteriormente se realizaron estimaciones y comparaciones del biogás que potencialmente pudiera generarse en base en la bibliografía reportada. Debido a que autores reportan sus datos con respecto a materia seca, se procedió a realizar un secado de cladodios picados, para esto se utilizó un horno de secado en el que se colocaron muestras de cladodios en a una temperatura de 50° C (figura IV-6), las muestras se pesaron en una balanza analítica hasta que el peso fue constante.



Figura IV-6: Nopal en horno de secado. Fuente: Elaboración propia

Considerando esos datos se calculó la equivalencia otras fuentes de energía usadas en la región, también se realizó una equivalencia económica con algunas de estas. Por último se realizó una aproximación de los gastos generados en el modelo de cultivo actual para identificar procesos o insumos que se pudieran efficientizar con el implemento de la alternativa aquí planteada.

Con todo lo anterior se pretende saber si es viable realizar este tipo de proyectos en la comunidad.

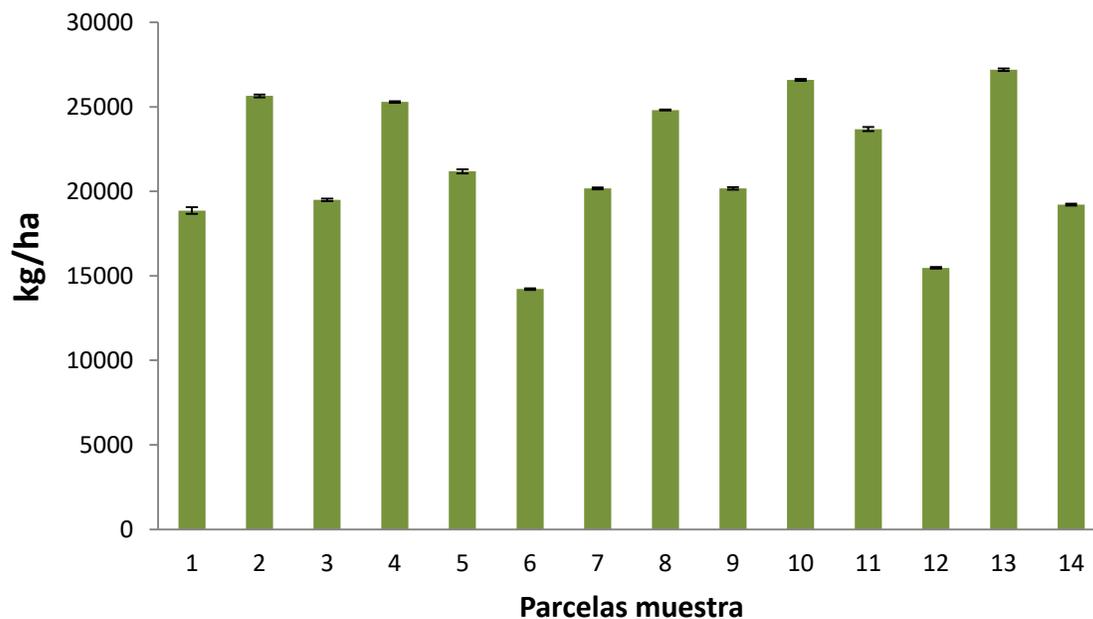
IV.9. Supuesto

- La biomasa residual generada durante podas del cultivo de nopal es suficiente como para generar una cantidad considerable de biogás comparando con datos existentes.
- Económicamente será redituable el aprovechamiento de los residuos del cultivo para la generación de energía en comparación con los precios de mercado actual de otras fuentes de energía.
- Existe la factibilidad de dar manejo a los residuos orgánicos generados en la producción de nopal en la comunidad de San José de los Laureles, de tal manera que se contribuya a la sustentabilidad económica y social al generar productos con valor agregado además de los beneficios ambientales.

V. PRINCIPALES HALLAZGOS (RESULTADOS Y DISCUSIÓN)

V.1 Biomasa residual generada kg/ha

De las estimaciones realizadas con base en 14 parcelas al azar que fueron recientemente podadas, se obtuvo un promedio de 21,579 kg/ha de BRN (figura V-1).



Grafica I: Promedios de Kg/ha generados en las parcelas muestreadas.



Figura V-1: Pesaje de BRN en parcela muestreada. Fuente: Elaboración propia

V.1.2 Estimación de la BRN generada en la hectárea específica

Tomando en cuenta que la temporada del año en la que se realizó el muestreo (septiembre-noviembre) es cuando existe menor producción de residuos, se procedió a realizar una predicción de la BRN que potencialmente se generaría en los meses de febrero a abril, periodo en el que las podas son de mayor magnitud.

De este muestreo se obtuvo un promedio de 7.9 kg de BRN por cada planta podada, con ello se realizó una estimación de la BRN que pudiera generarse en la temporada de mayor poda. Así, siendo que por hectárea hay aproximadamente 11904.76 plantas cultivadas entonces se pudieran generar aproximadamente 94,047.6 kg de BRN susceptibles de aprovechamiento.

Estudios han mostrado que la poda puede rendir aproximadamente 10 ton de MS (materia seca) por hectárea al año (Varnero & Homer, 2018); si sumamos los datos obtenidos de la cuantificación y los de la estimación obtendríamos 6.4 ton de MS, considerando que existen más podas en el transcurso del año y que además se genera BRN en los centros de acopio del nopal verdura, se podría acercarse al dato reportado.

V.2 Estimación de la generación de biogás con base en BRN

De acuerdo a Aké-Madera (2015) y Arvizu (2015), se pueden obtener 40 m³ de biogás/ton de nopal, equivalentes, por lo que de aprovechar los 21,579 kg/ha de BRN que en promedio se generan, hipotéticamente se pudieran generar 863.16 m³ de biogás y si la estimación coincidiera con el promedio generado en los meses de mayor poda, los 94,047.6 kg de BRN pudieran generar 3,761.8 m³ de biogás.

$$m^3 \text{ biogás} = \text{ton BRN} \times 40 \quad \text{Ec.1}$$

Baeza (1995) (citado por Varnero & Homer, 2018), señaló que el potencial del biogás de nopal es equivalente a 0.36 m³/kg MS, por lo que los 1195.4 kg de MS correspondientes a la cuantificación realizada (5.54% de 21,579 kg) pudieran

producir 430.3 m³ de biogás/ha; en cuanto a la predicción de lo generado en la mayor poda, los 5,210.2 kg de MS (5.54 % de 94,047.6) pudieran generar 1875.7 m³ de biogás/ha.

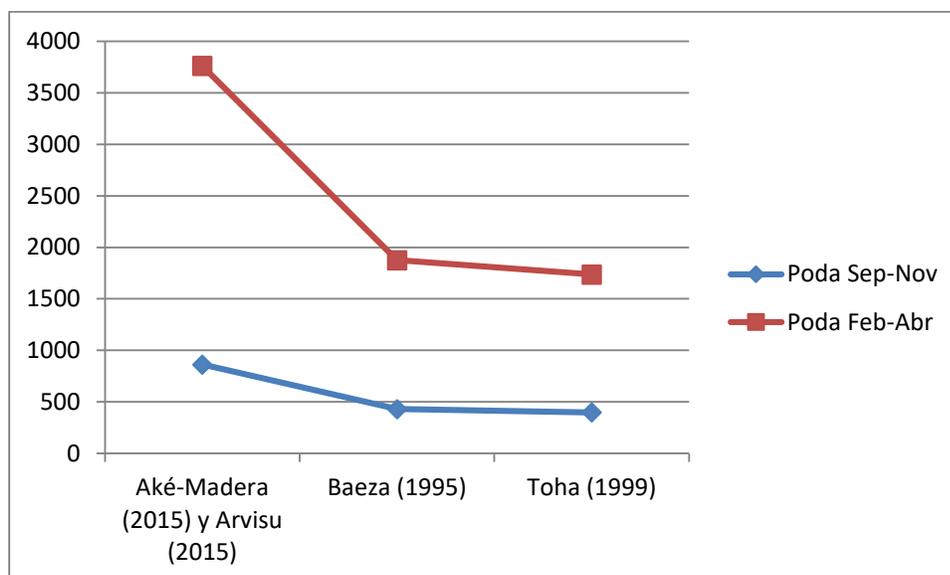
$$m^3 \text{biogás} = \text{kg MS de BRN} \times 0.36 \quad \text{Ec.2}$$

Datos muy similares se obtienen contemplando a Toha (1999) (citado por Varnero & Homer, 2018), quien indicó que 3 kg de cladodios secos producen 1 m³ de biogás, obteniéndose 398.46 m³ de biogás/ha y 1736.74 m³ de biogás/ha en la cuantificación y en la predicción respectivamente. Del proceso de secado de cladodios para realizar las estimaciones con estos últimos autores, la MS resultó ser el 5.4 % del peso inicial (figura V-2).

$$m^3 \text{biogás} = \text{kg MS de BRN} / 0.36 \quad \text{Ec.3}$$



Figura V-2: Pesaje de MS de BRN en balanza analítica. Fuente: Elaboración propia.



Grafica II: Producción teórica de biogás m³ que puede generarse con la BRN muestreada según autores.

Las diferencias pueden deberse a condiciones ambientales en las que se llevaron a cabo los estudios, así como al manejo del cultivo y del biodigestor.

Arreguín, Ramos Carapia & Lezama (2016), mencionan que la incorporación de estiércoles al proceso de biodigestión favorece la fermentación y aumenta el rendimiento, esto es susceptible en la comunidad ya que el estiércol vacuno es uno de los insumos comprados para abonar el nopal. Uribe, Varnero & Benavides (1992), reportan mejoras del proceso al realizar la codigestión de nopal y estiércol vacuno con una proporción de 7.5:2.5 respectivamente.

Llevar a cabo la codigestión del nopal y el estiércol, además de la elevación de la producción de biogás, puede generar un abono más inocuo y asimilable por el cultivo. En la región se utiliza estiércol vacuno para abonar el nopal, antes de ser adicionado al cultivo suele permanecer semanas o incluso meses en el sitio en el que lo descargan los proveedores, generando malos olores que se dispersan por los campos (figura V-3). También se puede aumentar el rendimiento agregando otros materiales, como BR producida en cultivos de la región (principalmente jitomate, pepino y aguacate), residuos de cocina y sanitarios, entre otros.



Figura V-3: Estiércol vacuno utilizado como abono del nopal. Fuente: Elaboración propia.

V.3 Equivalencia económica del biogás a otras fuentes de energía

Tabla II: Equivalencia del biogás que pudiera generarse de BRN en contraste de fuentes de energía más usadas en la región.

Fuentes de energía	Equivalencia	En base a Aké-Madera (2015) y Arvizu (2015)		En base a Baeza (1995)	
		Cuantificación de poda	Predicción de poda	Cuantificación de poda	Predicción de poda
Biogás (70% de CH₄)	1 m ³	863.16	3,761.80	430.3	1875.6
Gas LP	2.3 kg	1985.26	8652.14	989.69	4313.88
Gas natural	0.6 m ³	517.89	2257.08	258.18	1125.36
Gasolina	1.8 L	1553.68	6771.24	774.54	3376.08
Madera	1.5 kg	1294.74	5642.7	645.45	2813.4
Carbón	0.3 kg	258.9	1128.5	129.09	562.68
Electricidad	6.8 kW	5869.48	25580.24	2926.04	12754.08

Equivalencia potencial de fuentes de energía

= equivalencia en biogás x m³ de biogás

Aproximadamente una familia promedio en una zona rural ocupa de 3 a 5 m³ de biogás, considerando su consumo en iluminación, en la cocina y un medio de enfriamiento, (Varnero & Homer, 2018), dicha cantidad se ve superada con lo que pudiera generarse si se sumaran ambas podas considerando a ambos autores, pudiéndose obtener 12.6 m³/día según lo reportado por Aké-Madera & Arvizu (2015) y 6.3 m³/día por Baeza (1995). Los excedentes podrían ser utilizados al incluir el consumo energético de aparatos electrónicos o bien usados en otras actividades productivas o iluminación pública.

Tabla III: Equivalencia económica del biogás (CH₄-70%) que pudiera generarse de BRN a fuentes de energía usadas en SJL.

En base a Aké-Madera (2015) y Arvizu (2015)			
	Gas LP (\$ 17.3/ kg)	Gasolina (\$ 19.8/l)	Electricidad (\$ 0.79/kw)
Cuantificación de poda	34345.1	30762.8	4636.8
Predicción de poda	149682	134070.5	20208.3
total	184027.1	164833.3	24845.1
En base a Baeza (1995)			
	Gas LP (\$ 17.3/ kg)	Gasolina (\$ 19.8/l)	Electricidad (\$ 0.79/kw)
Cuantificación de poda	17121.63	15335.89	2311.57
Predicción de poda	74630.12	66846.38	10075.72
total	91751.75	82182.27	12387.29

$$\text{Equivalencia económica} = \text{\$fuente de energía} \times \text{equivalencia en m}^3 \text{ de biogás}$$

El realizar la comparación de la equivalencia económica con respecto a otras fuentes de energía utilizadas en la comunidad puede ayudar a aclarar el panorama, demostrando la factibilidad económica, y más si se toma en cuenta el aumento de los precios de los combustibles fósiles así como su constante desabasto. El aprovechamiento de la BRN para la obtención de biogás puede representar una alternativa para aminorar y/o eliminar los gastos en otros combustibles, incluso puede ser una fuente de ingresos si se contempla su comercialización, lo que puede

contribuir económicamente cuando los precios del nopal en el mercado disminuyen drásticamente.

Según Varnero & Homer (2018), el costo inicial de la producción de biogás en viviendas rurales es de alrededor de \$1,000 por biodigestor (considerado solo para la producción del biogás requerido en un hogar). El costo es recuperado en 9 a 18 meses a través del ahorro de costos de combustible. La utilización de biodigestores de mayor magnitud para uso comunitario dependerá de la organización entre productores así como de subsidios o financiamientos.

V.4. Procesos de cultivo e insumos con potencial a optimizarse con la implementación del aprovechamiento de la BRN para la producción de biogás

Actualmente la BRN representa gastos económicos, ya que al realizar las podas principalmente se gasta en jornales, posteriormente algunos productores sacan el material de cosecha de los surcos y lo amontonan a un costado del cultivo (Imagen V-3), por otro lado la



Figura V-4: Nopal procedente de podas

Fuente: Elaboración propia

mayoría deja la BRN en surcos para después triturarlos con el paso de un motocultor, en este proceso además de los jornales se gasta combustible y la inversión en el motocultor. Para esta segunda manera de tratar la BRN, se calcula que se realiza en un tiempo de 4 días y con un gasto aproximado de \$ 2,000/ha, considerando que el salario del jornal es de \$250/día y un consumo de gasolina de 10 L/ día. Estimando el aprovechamiento de la BRN para producir biogás se gastaría solo en transportar la biomasa al biodigestor y posteriormente el digestato al cultivo. Al dar un manejo mas adecuado a la BRN se estaría evitando la

proliferación de plagas, lo que probablemente propiciaría una disminución paulatina en el uso de agroquímicos para el control estos organismos.

Por otro lado, si se considerara el proceso de codigestión con estiércol, no se consideraría un gasto extra, debido a que es un insumo que actualmente se compra para abonar el cultivo de nopal; es importante mencionar que al someter los estiércoles al proceso de biodigestión anaeróbica, se obtendría un abono inocuo y con nutrientes biodisponibles para las plantas, lo que probablemente redujera la demanda de grandes cantidades de estiércol, el cual es traído desde Texcoco (Figura V-4).



Figura V-5: Encostalado y acarreo de estiércol

Fuente: Elaboración propia



Figura V-6: Recolección de leña

Fuente: Elaboración propia.

La implementación de biodigestores en SJL puede contribuir a reducir el daño al corredor biológico el Chichinautzin de diferentes maneras, una es al evitar la extracción de leña del bosque; se calcula un consumo de 8 kg por día en una familia promedio, además del tiempo destinado a esta actividad (Figura V-6).

VI. CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos durante esta investigación se puede concluir que el aprovechamiento de la BRN para la obtención de biogás es factible debido a las múltiples ventajas ambientales y socio ambientales observadas en la comunidad, principalmente por la abundancia del material orgánico susceptible de aprovechamiento, siendo incluso factible el uso parcial de dicho material o la comercialización del excedente.

Según los resultados hallados en la cuantificación, en SJLT se pueden generar aproximadamente 1195.4 kg/ha de BRN los cuales según algunos autores pudieran llegar a generar de 398.49 m³ a 863.16 m³ de biogás.

En cuanto a la predicción que se realizó en una parcela específica, se estimó que en la temporada del año en que más se produce BRN, se puede llegar a generar aproximadamente hasta 94,047.6 kg de BRN, equivalentes a 3,761.8 m³ a 1736.74 m³ de biogás/ha, considerando la generación de biogás de nopal según trabajos de investigación. Estos datos afirman que se puede obtener una cantidad de biogás para los hogares y otras actividades, por lo que el aprovechamiento de la BRN en SJL parece factible.

Algunas de las ventajas del aprovechamiento de la BRN para la producción de biogás son la obtención de abonos orgánicos, la posible disminución de las poblaciones de plagas al darle un tratamiento más adecuado a la BRN que fungía como vector y la eliminación de la necesidad de la recolección de leña.

VII. PERSPECTIVAS

Es necesario realizar una cuantificación de la BRN más amplia, en diferentes etapas del año pero centrándose en la de mayor proporción que es de febrero a abril. Para tener una estimación clara del biogás que pudiera generarse en la comunidad, es preciso implementar un biodigestor experimental, debido a las condiciones ambientales específicas del lugar, una vez que exista mayor certeza de este dato se podrá diseñar un biodigestor a mayor escala. Por otro lado queda pendiente la cuantificación de los BRN generada en el centro de acopio (ya que cuando los precios del mercado decaen, los cladodios cosechados se desechan) y en las parcelas en las que se renueva el cultivo en su totalidad cuando este disminuye su producción debido a su longevidad o a la proliferación de organismos considerados plaga.

Aunque los cladodios se mantienen hidratados por meses, sería atractivo establecer procesos de cultivo en los que la disponibilidad de la BRN se encuentre más distribuida, de manera que la carga de biomasa al biodigestor se mantenga constante, y en consecuencia la generación del biogás. Una vez operando un biodigestor sería interesante evaluar la calidad del suelo abonado con el digestato obtenido así como un estudio de incidencia de plagas.



Figura VII-1: Cultivo de nopal en el Chichinautzin
Fuente: Elaboración propia.

VIII. TRABAJOS CITADOS

- Aké-Madera, M. (2015). *Nopal, fuente excepcional de energía renovable limpia y sustentable. "El oro verde de México" El Santo Grial de las energías renovable.* Zitácuaro, Michoacán, México: SNTE.
- Aké-Madera, M. (2017). *Biogás con nopal para vehículos en sustitución de combustibles fósiles.* Ciudad de México: Cámara de diputados LXIII Legislatura.
- Altieri, M. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable.* Montevideo: nordan comunidad.
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2012). Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Revista de investigación en Agroecología No. 7*, 65-83.
- Anaya-Pérez, M. (2003). Historia del uso de *Opuntia* como forraje en México. En FAO, *El nopal (Opuntia spp.) Como Forraje.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Arreguin , J., Ramos , M., Carapia, I., & Lezama, P. (2016). Obtención de biogás a base de biomasa de nopal a nivel laboratorio (*Opuntia ficus-indica*) variedad Atlixco. *Revista de Sistemas Experimentales*, 37-41.
- Bolívar, H. (2017). *Factibilidad de proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala usando como sustratos purines y chumberas (Opuntia ficus indica (L. Miller)).* Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, Departamento de física aplicada, Badajoz, España.
- Campos-Montiel, R., Razo-Rodríguez, Ó., Almaraz-Buendía, I., Ramírez-Bibriesca, E., Soriano-Robles, R., Salinas-Martínez, J., . . . González-Muñoz, S. (2017). Bioconversión de desperdicios vegetales a biogás a partir de

- microorganismos ruminales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* , 149-155.
- Caso, A. (2015). El águila y el nopal. *Estudios de cultura nahuatl* 50, 355-369.
- CDI. (2010). Catálogo de localidades indígenas. México.
- Colín-Bahena, H., Monroy-Martínez, R., & Rodríguez-Chávez, J. (2016). Las unidades de manejo tradicional, base de la conservación comunitaria. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21 .
- Corrales-Mendoza, M. (2011). *Educación ambiental. El problema de extracción de especies vegetales endémicas*. Tesis de Licenciatura, Universidad Pedagógica Nacional, Ciudad Ayala.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Díaz García, L. (2016). Secuenciación de regiones hipervariables V3 y V6 de microorganismos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.7 Núm.3*, 559-572.
- DOF. (30 de 11 de 1988). DECRETO por el que se declara el área de protección de la Flora y Fauna silvestres, ubicada en los municipios de Huitzilac, Cuernavaca, Tepoztlán, Jiutepec, Tlalnepantla, Yautepec, Tlayacapan y Totolapan, Morelos. Ciudad de México, México.
- DOF. (1 de 2 de 2013). NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. Ciudad de México, México.
- DOF. (24 de 12 de 2015). Decreto por el que se expide la Ley de Transición Energética. Ciudad de México, México.
- DOF. (02 de 04 de 2015). Ley General de Cambio Climático. Ciudad de México, México.

- DOF. (15 de 9 de 2017). Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos. Ciudad de México , México.
- DOF. (19 de 01 de 2018). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos . Ciudad de México, México.
- FAO. (2011). *Manual del biogás*. Santiago, Chile: Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables.
- Griffth, M. (2004). The origins of an important cactus crop, *OpuntiaFicus-Indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*, vol. 91, no. 11, 1915-1921.
- Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobicos rurales. Producción de biogás y sanamiento de efluentes*. Lima Perú : Centro Panamericano de Energía Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Huacuz, J. (2013). Esbozo de las energías renobables en México y el IIE. *Boletin IIE*, 52.
- INAFED. (24 de 07 de 2018). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Obtenido de Estado de Morelos Tlayacapan: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM17morelos/municipios/17026a.html>
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal, Tlayacapan, Morelos 2010*. Obtenido de Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tlayacapan, Morelos, clave geoestadística 17026: <file:///C:/Users/hp/Downloads/17026.pdf>

- Inglese, P., Liguori, G., & Barrera, E. (2018). Ecofisiología y biología reproductiva de los nopales cultivados. En O. d. Áridas, *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 31-44). Roma.
- Kiesling, R., & Metzger, D. (2018). Origen y taxonomía de *Opuntia ficus-indica*. En *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 13-20). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas.
- Kú, V. M., Pool, L., Mendoza, J., & Aguirre, E. (2013). Propuesta metodológica para evaluar proyectos productivos con criterios locales de sustentabilidad en Calakmul, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 9-34.
- Leff, E. (2002). Saber ambiental : sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder. En E. Leff, *Saber ambiental : sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder* (págs. 1-11). México: Siglo XXI.
- López Ricalde, C. D., López-Hernández, E. S., & Ancona Peniche. (2005). Desarrollo sustentable o sostenible: una definición conceptual. *Horizonte Sanitario*.
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., & Arévalo-Galarza, M. L. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional Calderón-Zavala, Guillermo; Anaya-Rosales, Socorro. *Agrociencia*, vol. 49, 31-51.
- Matos-Mendoza, D., Ramírez-Peña, M., & Caballero-Batista, Á. (2017). Biodigestor comunitario: repercusión psicosocial y ambiental en la comunidad Pueblo Nuevo del municipio II Frente. *Santiago 144*, 507-5018.
- Méndez-Gallegos, J., Rössel, D., Amante-Orozco, A., Gómez-González, A., & García-Herrera, J. (2010). El nopal en la producción de biocombustibles. *Revista Salud Pública y Nutrición, Edición Especial No. 5*, 70-84.

- Mondragón , C., & Chessa, I. (2018). Recursos genéticos de nopal (*Opuntia* spp.). En O. d. Áridas, *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 45-52). Roma.
- Mondragón , C., & Méndez, S. (2018). Producción y utilización del nopal como hortaliza o nopalitos. En O. d. Áridas, *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 97-108). Roma.
- Ochoa, M., & Barbera, G. (2018). Historia e importancia agroecológica y económica. En O. d. Áridas, *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 2-12). Roma.
- Pacheco, S. (27 de 05 de 2017). *El primer generador de electricidad a partir de desechos orgánicos en México*. Obtenido de Expansión en alianza con CNN: <https://expansion.mx/empresas/2017/05/26/el-primer-generador-de-electricidad-a-partir-de-desechos-organicos-en-mexico#pid=slide-3>
- Quezada, A. (2007). Diagnóstico de plagas y enfermedades en nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) en Tlalnepantla, Morelos. *Monitor Agrícola*, 5-9.
- Quintanar, E. T., Augspach, C., Beltrán Hernández, R., Jaimes Núñez, E., Vázquez Rodríguez, G., Cornejo Oviedo, F., . . . Lucho Constantino, C. (05 de 01 de 2016). *Padi*. Obtenido de Boletín científico de ciencias básicas e ingenierías : <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/578>
- Rangel, S., Ramírez, S., & Ozuna, F. (2013). *Manejo de picudo de nopal, cochinilla y mancha negra en morelos*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Reyes-Agüero, A., Aguirre-Rivera, R., & Hernández, H. (2005). Notas sistemáticas y una descripción detallada de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, vol. 49, 395-408.

- Rivas , O., Faith , M., & Guillén , R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, Vol. 23, 39-46.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat.*, 331-345.
- Sámano Rentería, M. (2013). La agroecología como una alternativa de seguridad alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.4 Núm.8*, 251-1266.
- Sánchez Godoy, F. (2012). *Potencial del cultivo de la chumbera (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) para la obtención de biocombustibles*. Tesis doctoral, Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de producción vegetal: botánica y protección vegetal , Madrid.
- SEDESOL. (24 de 07 de 2018). *Catálogo de localidades*. Obtenido de Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=170260004>
- Suárez, J. (2015). Producción integrada de alimentos y energía a escala local en Cuba: bases para un desarrollo sostenible. *Pastos y forrajes*, 3-10.
- Tepella, E. (2007). *¿Por qué fracasan los proyectos? La importancia de la evaluación ex ante en el ciclo de vida de los proyectos*. Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Sociales, Instituto de Investigaciones Socioeconómicas,

Programa de Estudios del Trabajo, el Ambiente y la Sociedad. San Juan, Argentina: Serie Documentos de Trabajo del PETAS.

Toledo, V., & Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural. La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Barcelona : Incaria editorial.

Trobo, M. (2013). *Energía eólica y aceptación social: Lecciones para Uruguay y guía para la acción*. Universidad de la República , Facultad de Ciencias Sociales. Uruguay: MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINERÍA.

Troncoso K., C. A. (2007). Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: Case study in rural Mexico. *Energy Policy* , 2799–2810.

Uribe , Varnero, & Benavides. (1992). Biomasa de tuna (*Opuntia ficus-indica*. L. Mill) como acelerador de la digestión anaeróbica de guano de bovino . *Simiente-Sociedad Agronómica de Chile*, 14-18.

Varnero , M. T., & Homer, I. (2018). Producción de biogás. En O. d. Agricultura, *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 191-197). Chile.

Vela, E. (25 de 07 de 2018). *Mitología y simbolismo del nopal*. Obtenido de Arqueología Mexicana: <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/mitologia-y-simbolismo-del-nopal>

Velázquez, B. (2011). La biomasa residual de las plantaciones agrícolas como energía renovable. *Agrónomos*, 18-27.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Centro de Investigación en Biotecnología

"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

CUERNAVACA, MORELOS, 28 DE MAYO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10013029**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **"ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN SAN JOSÉ DE LOS LAURELES, TLAYACAPAN, MORELOS"**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA

DR. ALEXIS JOAVANY RODRÍGUEZ SOLÍS

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Torre de Laboratorios (CeIB),
Tel. (777) 329 7057, ceib@uaem.mx <http://www.uaem.mx/ceib/>

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Centro de Investigación en Biotecnología

"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

CUERNAVACA, MORELOS, 28 DE MAYO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10013029**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESIS TITULADA **"ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN SAN JOSÉ DE LOS LAURELES, TLAYACAPAN, MORELOS"**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA



DRA. MA. LAURA ORTIZ HERNÁNDEZ

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Torre de Laboratorios (CeIB),
Tel. (777) 329 7057, ceib@uaem.mx <http://www.uaem.mx/ceib/>

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Centro de Investigación en Biotecnología

"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

CUERNAVACA, MORELOS, 28 DE MAYO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10013029**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **"ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN SAN JOSÉ DE LOS LAURELES, TLAYACAPAN, MORELOS"**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
**POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA**

DR. EFRAIN TOVAR SÁNCHEZ

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Torre de Laboratorios (CeIB),
Tel. (777) 329 7057, ceib@uaem.mx <http://www.uaem.mx/ceib/>

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

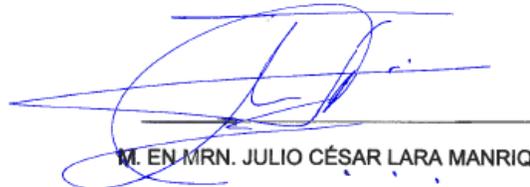
CUERNAVACA, MORELOS, 28 DE MAYO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. MARCO ARTURO MATÍAS MONTOYA** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10013029**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **"ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE NOPAL *Opuntia ficus-indica* PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN SAN JOSÉ DE LOS LAURELES, TLAYACAPAN, MORELOS"**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
**POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA**



M. EN MRN. JULIO CÉSAR LARA MANRIQUE