

**Esmeralda Cervantes Rendón  
Gabriela Montano Armendáriz**

Coordinadoras

The cover features a vibrant green background with a white grid pattern resembling solar panels. In the center is a glowing green globe. At the bottom, there is a blue wave graphic with two wind turbines on the left side.

# **M**edio **Ambiente y Sociedad**

Potencial de la  
Energía Renovable  
en México

**El Colegio de Chihuahua**

**Esmeralda Cervantes Rendón  
Gabriela Montano Armendáriz**  
Coordinadoras

**M**edio  
Ambiente  
y Sociedad

Potencial de la  
Energía Renovable  
en México

**El Colegio de Chihuahua**

**Medio Ambiente y Sociedad:** Potencial de la Energía Renovable en México.

© El Colegio de Chihuahua  
© Esmeralda Cervantes Rendón  
© Gabriela Montano Armendáriz

El Colegio de Chihuahua  
Calle Partido Díaz #4723  
Colonia Progresista, C. P. 32310  
Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
Teléfono: (656) 6390397

Primera edición versión digital 2018

ISBN: 978-607-8214-52-5

Coordinación editorial y cuidado: Lilitiana Chaparro  
Diseño editorial y portada: Eleuterio Meza

Se autoriza cualquier reproducción total o parcial de esta obra, siempre y cuando sea sin fines de lucro o para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente sin alteración del contenido y dando los créditos autorales.



# MEDIO AMBIENTE Y SOCIEDAD: POTENCIAL DE LA ENERGÍA RENOVABLE EN MÉXICO

Coordinadoras:

Esmeralda Cervantes Rendón y  
Gabriela Montano Armendáriz

CA Ciencias de la Tierra y Sustentabilidad



Centro Regional de Investigación y Desarrollo de Energías Alternativas (CRIDEA)



Supervisión del arbitraje:

Mtra. Gabriela Montano Armendáriz

Lista de árbitros:

Dra. Helena Cabal Cuesta	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España
Dra. Esmeralda Cervantes Rendón	El Colegio de Chihuahua
Dr. Luis Ernesto Cervera Gómez	El Colegio de Chihuahua
Dr. Germán Eduardo Devora Isiordia	Instituto Tecnológico de Sonora
Dr. Luis Fabián Fuentes Cortés	Instituto Tecnológico de Monterrey. Campus Monterrey
Dr. Jonathan Ibarra Bahena	Instituto de Energías Renovables. UNAM
Dr. Antonio Rodríguez Martínez	Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Dra. Sarahí Sánchez León	El Colegio de Chihuahua
Dr. José Ezequiel Santibáñez Aguilar	Instituto Tecnológico de Monterrey. Campus Monterrey

- 9      **Introducción**  
*Esmeralda Cervantes Rendón*
- 12    Parte I Energía renovable a partir de recursos renovables (mareas, aire y sol)**
- 13      **Corrientes de marea en la Laguna de Cuyutlán, Colima: Una alternativa para la generación de energía eléctrica**  
*Ernesto Torres Orozco, Olga Graciela Rodríguez López, Rodolfo Silva Casarín, Marco Antonio Galicia Pérez<sup>2</sup> y Manuel Gerardo Verduzco Zapata*
- 29      **Evaluación del recurso eólico en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez**  
*Rafael Vidal Herrera, Ramón Gómez Vargas, Jorge Iván Carillo Flores, Elías Ramírez Espinosa y Alfredo Campos Trujillo*
- 43      **Propuesta de un Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (SADRE) para el establecimiento de parques fotovoltaicos: Chihuahua, México**  
*Guillermo Iván Hinojos Mendoza, Dulce María Heredia Corral, Jessica Mariscal Guerra, Luis Ernesto Cervera Gómez, Esmeralda Cervantes Rendón y Adrián Botello Mares*
- 65    Parte II Energía Renovable a partir de la Biomasa**
- 66      **Análisis del potencial de producción de bioenergía y reducción de emisión gases de efecto invernadero a partir de desechos agroindustriales en la Comarca Lagunera**  
*José Alberto Silva González, Inty Omar Hernández De Lira, Lilia Ernestina Montañez Hernández, Antonio Rodríguez Martínez, Miriam P. Luevanos Escareño, y Nagamani Balagurusamy.*
- 83      **Potencial de la biomasa de pencas de agave para la producción de biogás**  
*Gilberto Iñiguez Covarrubias, José de Jesús Bernal Casillas, Walter Ramírez Meda, Lisaura Maldonado Pereira y David B. Hodge.*

- 97 Producción de Higuerrilla como energía alternativa expuesto a tratamiento de desalinización  
*German Eduardo Dévora Isiordia, Luis Carlos Valdez Torres, Rodrigo González Enriquez, Karen Alicia Granillo Moreno, Martín Elizalde Duarte, Jesús Álvarez Sánchez, Adriana Robles Lizárraga y María Elena López Mercado*
- 129 Producción de biodiesel a partir de aceites comestibles usados  
*Rocío Arellano Ramírez, Bertha Campos López, Evelyn Castañeda Villa, María Fernanda Valle Vargas*

### **153 Parte III Construcción Sustentable**

- 154 Loseta Térmica Hidrofóbica  
*Jorge Miguel Saldaña Acosta, Emilia Zapata Moreira y Ramiro Martínez Alvarado*

### **165 Parte IV Energía Renovable y Sociedad**

- 166 La participación comunitaria, elemento esencial para la implementación de energías renovables  
*Celina Alvarado Gamiño*
- 184 La educación ambiental y las energías renovables en la adaptación al cambio climático en la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji  
*Sonia Hernández González, Erick Hidalgo Martínez, y Blanca Estela Gutiérrez-Barba*



## Introducción

*Esmeralda Cervantes Rendón<sup>1</sup>*

El problema energético se debe visualizar desde un enfoque ambiental y social, ya que el consumo de energía para suplir necesidades y lograr el avance tecnológico e industrial en el que nos encontramos, ha generado el sacrificio del sistema ecológico que se conocía hasta el momento debido al Cambio Climático generado por las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas directamente a la generación de energía en base a combustibles fósiles.

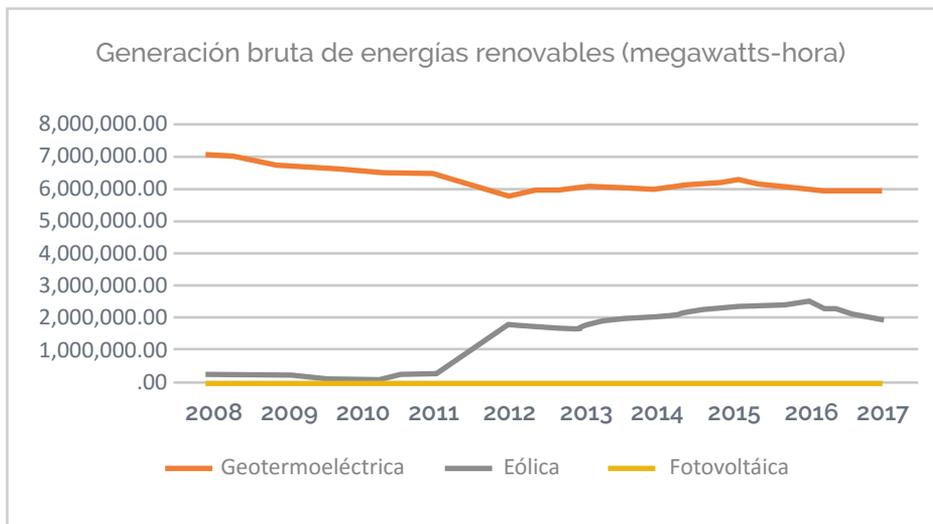
En México se adquirió el compromiso para la disminución de gases de efecto invernadero por medio de la creación de la Ley de Cambio Climático, la Reforma Energética y la Ley de Transición Energética, así como se estableció la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios que como parte de su estrategia se plantea como meta que para el año 2018 el porcentaje de generación con energía limpia sea del 25%, en el 2024 el 35% y en el 2050 del orden del 50%. En esta primera meta, de acuerdo con la Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031, para el año 2016 se logró alcanzar el 28.8%, ya que de los 73,510 MW generados de la capacidad instalada en el país correspondió a tecnologías limpias (21,179 MW).<sup>2</sup>

Debido a ello, se ha observado un incremento en la inversión en tecnologías renovables como es el caso de la eólica, geotérmica y a partir del 2012 en la solar fotovoltaica. Para el 2017, al considerar la generación bruta por estas tres energías renovables, se obtuvo un total de 7,99,859.58 mega watts-hora, de este total, la fotovoltaica solo representó el 0.14%, mientras que la geotérmica fue el 74.88% y la eólica el 24.98%, a pesar de ello la fotovoltaica se incrementó de una generación bruta en el 2012 de 2,076.424 a 10,887.855 mega watts-hora en el 2017, presentando un incremento considerable, al igual que la eólica (figura 1).

1 Profesora Investigadora del Centro Regional de Investigación y Desarrollo de Energías Alternativas de El Colegio de Chihuahua, Líder del CA Ciencias de la Tierra y Sustentabilidad. [ecervantes@colech.edu.mx](mailto:ecervantes@colech.edu.mx)

2 SENER (2017). Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031. Recuperado en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/325642/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2017-2031.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/325642/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2017-2031.pdf)

Figura 1. Generación bruta de las energías renovables fotovoltaica, geotérmica y eólica en México.



**Fuente:** Sistema de Información Energética con información de CFE, incluye Extinta Lyfc <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>.

Por otro lado, la inversión no solamente ha sido en la generación de energías limpias, sino también en la investigación y desarrollo de tecnología, en el 2018 la SENER ejerció un presupuesto de 1,119,854.00 de miles de pesos mexicanos para la investigación y desarrollo,<sup>3</sup> así como ha elaborado convenios para el desarrollo de proyectos de investigación por convocatorias conjuntas con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), con proyectos sobre el desarrollo de tecnologías para el uso de energías renovables y la identificación del potencial que tiene el país con este tipo de tecnologías.

Y es donde surge la idea de este libro, con el fin de conjuntar algunos de los trabajos realizados en los centros de investigación, universidades autónomas y tecnológicas de México, en base a diferentes reuniones de trabajo, para recopilar una serie de análisis de potencial de energía de fuentes renovables, que van desde la eólica, mareomotriz, solar, biomasa y biocombustibles, así como la importancia de la consideración de la sociedad

3 Sistema de Información Energética. Investigación y Desarrollo Tecnológico. Institutos de Investigación del Sector Energía. Presupuesto ejercido en Investigación y Desarrollo. Consultado en: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=A1C02>.



y la educación ambiental para la aplicación de proyectos de energías renovables en México, dividiéndolo en cuatro grandes partes:

**Parte I.** Energía renovable a partir de recursos naturales: Se evalúan la generación de energía a partir de mareas, el aire y el sol.

**Parte II.** Energía renovable a partir de biomasa: Se divide entre el análisis de posibles fuentes de biomasa, así como la generación de biocombustibles.

**Parte III.** Construcción sustentable: Se identifica material de construcción que genere un ahorro de energía para el mantenimiento de una temperatura estable dentro de las edificaciones, así como el acoplamiento de sistemas de Generación Distribuida en Edificaciones

**Parte IV.** Energía renovable y sociedad: en esta parte se revisa la importancia de considerar a la sociedad en los proyectos de aplicación de energía renovable, así como la educación ambiental para una mayor concientización y mejor apropiación tanto en el ahorro energético como en el cambio a energías renovables.

Finalmente, las coordinadoras del libro agradecen al Programa de Investigación Nacional de Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Red Temática CONACYT de Sustentabilidad Energética, Medio Ambiente y Sociedad (Red SUMAS) No. de Proyecto CONACYT 281101 de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, por el apoyo recibido para poder llevar a cabo las sesiones de trabajo entre los autores de este libro, así como, a los árbitros de los capítulos que con sus comentarios enriquecieron cada uno de los trabajos aceptado.



**PARTE I**

**ENERGÍA RENOVABLE A PARTIR DE RECURSOS  
NATURALES (MAREAS, AIRE Y SOL)**





# Corrientes de marea en la Laguna de Cuyutlán, Colima: Una alternativa para la generación de energía eléctrica

*Ernesto Torres Orozco,<sup>1</sup> Olga Graciela Rodríguez López,<sup>1</sup> Rodolfo Silva Casarín,<sup>2</sup>  
Marco Antonio Galicia Pérez<sup>2</sup> y Manuel Gerardo Verduzco Zapata<sup>1</sup>*

## Resumen

El presente estudio fue realizado en una porción de la laguna de Cuyutlán. Se trata de un cuerpo de agua costero, el más grande del estado de Colima, integrado por cuatro Vasos los cuales son referidos como Vaso I, II, III y IV. Se encuentra separada del Océano Pacífico por una barra de arena y una zona de manglar. Su profundidad oscila entre 0.50 y 2.0 m, pero en los sitios de intercomunicación entre vasos varía de 4 a 6 m. Con el propósito de conocer si la laguna presenta condiciones hidrodinámicas susceptibles de ser aprovechadas para la generación de energía eléctrica, se llevaron a cabo una serie de mediciones de velocidad de la corriente entre los Vasos II y III. Estas fueron realizadas en secciones transversales al flujo durante diferentes etapas de la marea, así como también se efectuó un levantamiento batimétrico. Este sitio fue elegido debido a su proximidad con el Canal de Tepalcates (1500 m de longitud), el cual representa una importante comunicación con el mar. Los resultados muestran que la velocidad de corriente asociada a los flujos de marea fluctúa entre 0.20 m/s y 2.70 m/s. La mínima ocurre en condiciones de pleamar con marea muerta y la máxima durante bajar

1 Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima. Km. 20, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad. C.P. 28850. Manzanillo, Colima, México. ertorres@gmail.com.

2 Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México. Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510.



en marea viva y temporada de lluvia. Por lo tanto, estas magnitudes de velocidad son comparadas con los requerimientos técnicos de generadores comerciales, para explorar la posibilidad de su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.

## Introducción

En México se cuenta con instrumentos legales que estimulan, tanto la investigación como el desarrollo de tecnologías para la generación de energía alternativa a los combustibles fósiles. En la actualidad es muy pequeño el porcentaje (<5%) de generación eléctrica por fuentes renovables destinada a servicio público y la energía oceánica aún no es aprovechada. Actualmente se cuenta con Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE), los cuales son una iniciativa de la Secretaría de Energía (2015) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del Fondo de Sustentabilidad Energética, alineada a estas necesidades. Uno de estos proyectos nacionales es el CEMIE Océano, dedicado al desarrollo de técnicas y tecnologías de punta para la extracción de la energía del océano, su conversión y distribución.

Un ejemplo de fuente renovable son las mareas astronómicas, derivado de fuerzas gravitacionales de atracción entre la Luna, Tierra y el Sol principalmente, que tal como menciona Boon (2009) impulsa oscilaciones en el agua y a su vez genera corrientes. El impulso de la marea en el mar cambia al inundar lagunas costeras, desembocaduras de río, ensenadas o bahías y la velocidad del flujo se modifica en respuesta al contorno y la batimetría del área inundada. Estrechamientos en la zona favorecen que la velocidad de corriente incremente. Cuando la marea de sicigia sucede, su amplitud de onda es máxima y la velocidad de corriente aumenta, mientras que en marea de cuadratura ocurre lo contrario.

En las costas mexicanas se pueden encontrar sitios donde ocurren intercambios de agua entre el mar y un cuerpo costero. Si bien algunos de ellos son someros con flujo de baja velocidad, evaluar el contenido energético con procedimientos de selección adecuados posibilita su aprovechamiento (Iglesias *et al.*, 2012). Gooch (2009) propone una metodología para localizar y evaluar sitios potenciales y considerar los resultados válidos donde sistemas de conversión energética por corriente de marea puedan ser instalados, en este método se debe obtener un registro de velocidad de corriente por cuando menos tres meses y puede ser aplicado para cualquier escala energética, con velocidad alta o

baja. Para aplicar este procedimiento es necesario contar con la información batimétrica, registro de nivel de agua y velocidad de corriente en el sitio, así como medición de corriente en secciones transversales del área de interés.

La Laguna de Cuyutlán, en el Estado de Colima, posee características que propician en su hidrodinámica respuesta al movimiento del agua en el mar. La interacción que sucede durante el proceso de llenado y vaciado de la Laguna, al circular por los estrechamientos y variaciones de profundidad, generan incremento en la velocidad de corriente de agua. Galicia *et. al.* (2010) estimaron a partir de análisis numéricos una velocidad de 0.10 m/s bajo condiciones de pleamar en gran parte de la Laguna. Mencionan que en los sitios con estrechamiento de sección hidráulica hubo incremento en la velocidad. Uno de estos sitios se localiza entre los vasos II y III, donde la velocidad de la corriente fue de 0.65 m/s, señalando que la circulación en la laguna es producida por la marea y que los estrechamientos más importantes en la Laguna se encuentran a corta distancia de los canales Ventanas y Tepalcates.

En el caso particular del canal Tepalcates, muy cercano a la zona de estudio en la interconexión entre los Vasos II y III, permaneció en continua modificación entre 2009 y 2012. A partir de marzo de 2012 se concluyeron las adecuaciones a este canal el cual quedó de 1500 m de longitud, ancho en superficie de 420 m, ancho de plantilla de 240 m y profundidad de 15 m. Por lo tanto, el volumen de agua que fluye durante el llenado y vaciado de la Laguna ahora debe ser mayor.

### **Área de estudio**

La Laguna de Cuyutlán es el cuerpo de agua costero más grande que tiene el estado de Colima (Fig.1). Es una subcuenca somera formada por cuatro Vasos, nombrados Vaso I, II, III y IV, separada del Océano Pacífico por una barra de arena y zona de manglar. La profundidad media en la Laguna oscila entre 0.50 y 2.00 m, sin embargo, en los sitios de intercomunicación entre vasos varía entre 4.00 a 6.00 m. Tiene tres vías de intercambio de agua con el mar que son: el Canal de Ventanas localizado en su extremo oeste (Vaso I), el conducto situado hacia el norte del Vaso II conocido como "El Túnel", el tercero se encuentra hacia la parte este del Vaso II nombrado Canal Tepalcates.

El área de estudio se ubica en la zona de transición entre los vasos II y III, con coordenadas geográficas de Latitud 18° 59' 49.92" Longitud -104° 13' 37.92" a Latitud

19° 1' 7.68" Longitud 104° 15' 34.16", delimitada por los puentes del ferrocarril (PF) y de la autopista Manzanillo-Colima (PA).

Figura 1. Ubicación geográfica de la Laguna de Cuyutlán, Colima.



**Fuente:** Elaboración propia con mapas de INEGI y Google maps: <http://www.beta.inegi.org.mx/app-mapas/> y <https://www.google.com/maps/@19.0219797,-104.2756292,8606m/data=!3m1!1e3>

## Metodología

La batimetría se midió en secciones transversales al flujo de agua con intervalos de 25 m. con una estación de trabajo móvil, integrada por un sistema GPS diferencial RT20 marca Novatel® OM-20000008 de  $\pm 0.30$  m de precisión en xy, una ecosonda digital marca Ocean® Data modelo Bathy 500MF, con resolución de 0.50 m hasta 100.00 m de profundidad y precisión de 0.01 m instalados en una lancha, el registro de posición geográfica se sincronizó con la medición de profundidad. La estación de referencia base se enlazó con la estación de trabajo móvil por medio de dos radios Modem marca Pacific Crest® de 2-35 W con alcance de 20.00 Km.

Para medir velocidad y dirección de corriente, así como nivel de agua, se usó un corrientímetro fijo Vector marca Nortek As®. Fue anclado en el fondo de la Laguna, de manera que el sensor de presión y el corrientímetro quedaron a 3.30 y 3.10 m de

profundidad respectivamente. El registro de datos se hizo en intervalos de 15 minutos a 4 Hz de frecuencia en sistema de coordenadas ENU durante un año. Cada registro incluye datos de velocidad y dirección de corriente, así como nivel de agua.

Se midió nivel de marea en el área oceánica adyacente a la zona de estudio durante un año con registro en intervalos de 10 minutos, se utilizó un perfilador de corriente AWAC marca Nortek As® anclado en el fondo, a 16.00 m de profundidad, a 1000 m al noroeste de la escollera oeste del Canal Tepalcates.

También se realizaron barridos transversales al flujo de agua en el área de estudio durante bajamar, transición de pleamar a bajamar, de bajamar a pleamar y en pleamar máxima, en fase de marea viva de conjunción (MVC), marea viva de oposición (MVO), y marea muerta de cuarto menguante (MMCM) para obtener información de velocidad de corriente con diferentes condiciones de marea. Para ello se utilizó un perfilador acústico doppler (ADP) marca SonTek® modelo RiverSurveyor, con frecuencia de 3.00 MHz, a bordo de una lancha de 18 ft de eslora y 4 ft de manga con motor fuera de borda de 15 hp. Los perfiles de velocidad se obtuvieron con frecuencia de 1 Hz, la cantidad y el tamaño de celda (capas) cambió en cada perfil según la profundidad en el instante medido. En zonas someras las celdas variaron en tamaño entre 0.06 a 0.10 m, en profundidades mayores la diferencia fue de 0.06 a 0.20 m. Se obtuvo también el perfil hidráulico en cada sección. En cada muestreo se registraron fecha, hora, condiciones de marea y cantidad de secciones realizadas (tabla 1).

Tabla 1. Condición de marea durante la medición de las secciones de corriente con ADP.

Muestreo	Fecha	h inicio	h fin	secciones	Condición	Fase
1	23/02/2013	08:15	12:40	36	bajamar	MVO
2	24/02/2013	12:29	14:40	19	bajamar	MVO
3	02/03/2013	10:07	13:18	34	pleamar	MVO
4	11/05/2013	02:59	06:10	47	bajamar	MVO
5	24/05/2013	18:32	19:17	13	pleamar	MVO
6	25/05/2013	04:18	05:01	19	bajamar	MVO

**Fuente:** Elaboración propia con base a resultados del proyecto.

La información fue analizada bajo dos condiciones de temporada, una de estiaje a partir del 01 de noviembre 2012 hasta el 14 de mayo de 2013, y otra de ciclones a partir del 15 de mayo de 2013 hasta el 17 de septiembre de 2013. En cada temporada se hizo el análisis armónico de los datos de nivel obtenido en el sector Este, así como al obtenido en la Playa Tepalcates, se emplearon las herramientas World Tides en Matlab® conforme al procedimiento descrito por Boon (2004) con lo cual se identificaron las constituyentes armónicas más importantes de la marea astronómica  
Se calculó la potencia cinética de densidad mediante la ecuación:

$$P=\frac{1}{2} \rho(v^3)$$

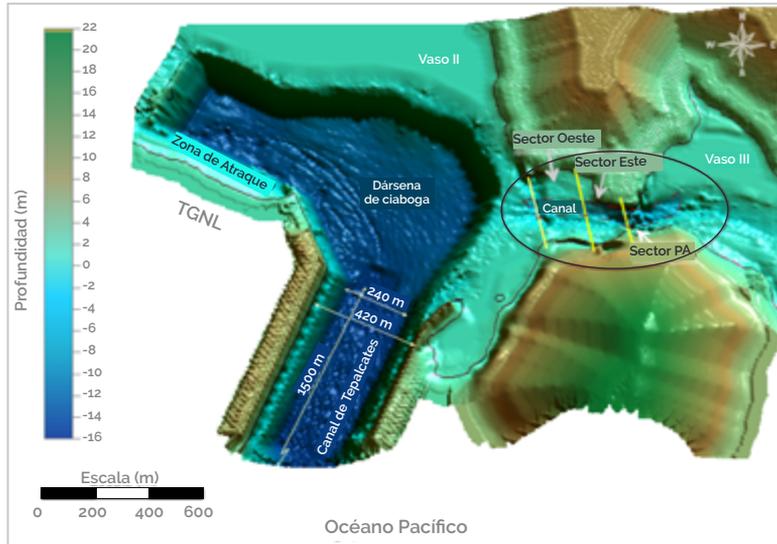
Donde  $P$  es la potencia expresada en kW/m<sup>3</sup>,  $\rho$  es la densidad del agua en kg/m<sup>3</sup> y  $v$  es la velocidad de cada celda en m/s.

## Resultados

### Batimetría:

Como resultado del levantamiento batimétrico se obtuvo la caracterización detallada del área de estudio (Fig. 2) en la cual se encontró que el Canal Tepalcates tiene 1500 m de longitud con una plantilla de fondo de y 240 m de ancho a -15 m. El talud es rocoso con proporción 1:5 y el ancho de canal en superficie es de 420 m. El lecho en la zona de dársena también tiene -15 m. Hacia el este de la zona de dársena se localizan los Sectores Oeste, Este y PA. El Sector Oeste tiene más superficie de agua que las otras dos zonas y su lecho varía entre -3.0 y -4.0 m. En el Sector este la superficie de agua disminuye y el álveo varía entre -2.0 y -3.0 m. En el margen sur de estos sectores, el terreno tiene pendiente suave y sedimento arenoso, la cota máxima promedio en esta parte es de -1.50 m

Figura 2. Batimetría del área de estudio y zonas adyacentes.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

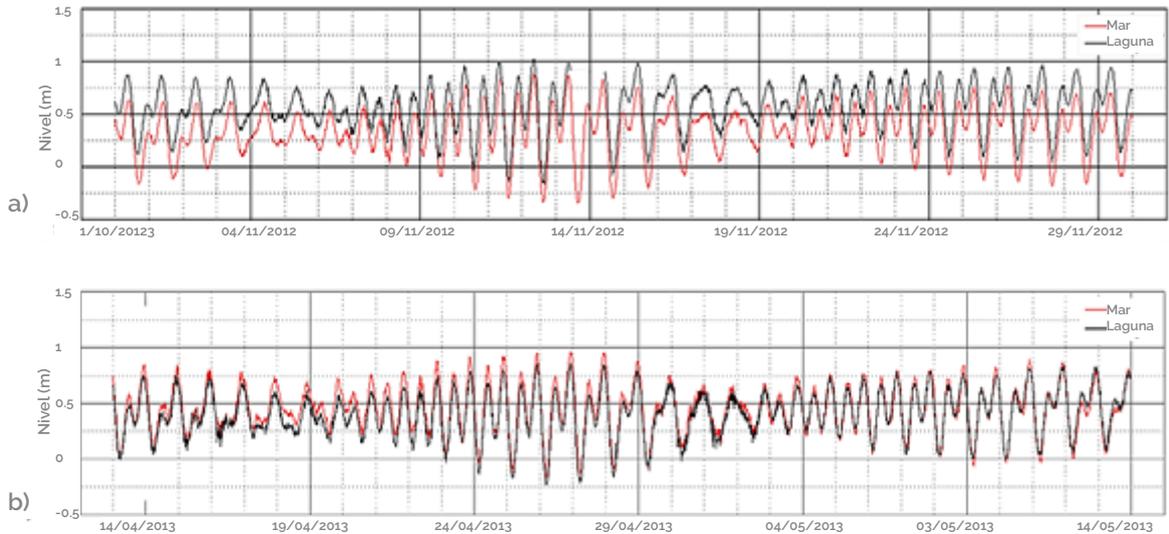
### Nivel de marea en temporada de estiaje y lluvias:

La onda de marea se propagó en la Laguna a través del Canal Tepalcates. En temporada de estiaje la diferencia entre el nivel máximo y mínimo de agua fue mayor durante las fases de marea viva, de 1.07 m. Durante condiciones de marea muerta la diferencia promedio entre nivel máximo y mínimo fue de 0.39 m.

Entre noviembre de 2012 y marzo de 2013 se encontró que la diferencia del nivel de agua entre pleamar y bajamar es mayor con marea viva de conjunción, MVC (1.22 m) que con marea viva de oposición, MVO (0.88 m). Entre abril y agosto la carrera de marea en fase MVC disminuyó (0.97 m), en MVO incrementó (1.22 m). En tanto que durante julio y agosto los máximos y mínimos de nivel de agua en el área de estudio fueron similares en ambas fases de marea muerta, así como en las de marea viva.

El nivel de agua en el Sector Este al inicio de la temporada de estiaje fue de aproximadamente 0.50 m por encima del nivel del mar (Fig. 3a). En el transcurso de la temporada esta diferencia disminuyó gradualmente a 0.10 m (Fig. 3b).

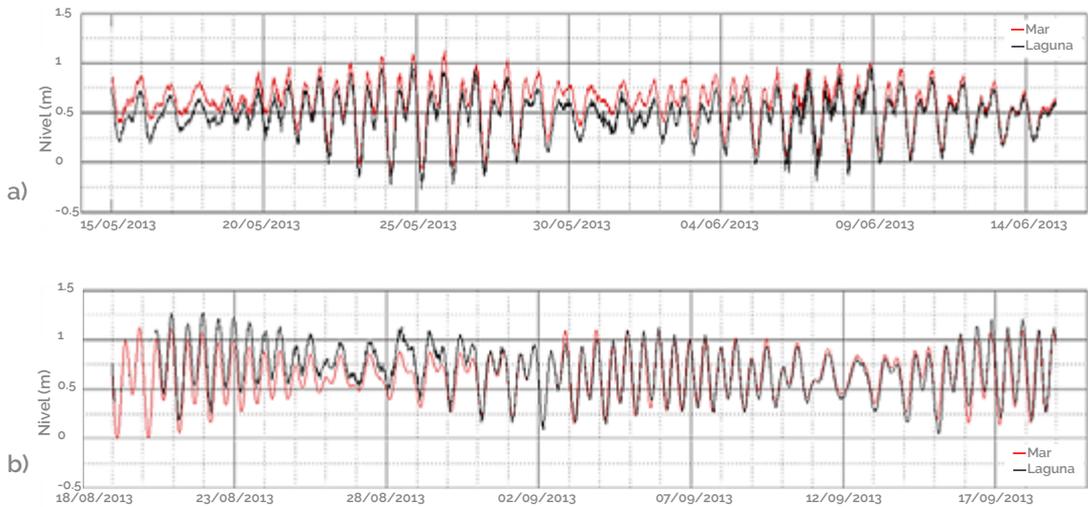
Figura 3. Señal de marea en el Sector Este y frente a Tepalcates al inicio del periodo de estiaje, noviembre de 2012 (a) y al final del periodo, abril-mayo de 2013 (b).



**Fuente:** Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

Durante la temporada de lluvia la diferencia de nivel entre el agua del mar y del área de estudio fue variable (figura 4), en ocasiones positiva otras veces negativa y algunas otras tuvieron igual nivel de agua. Entre mayo y junio (figura 4a), al inicio de la temporada de lluvia los máximos y mínimos de nivel en la laguna se anticiparon en 2.50 horas respecto al mar. En cambio, entre agosto y septiembre (figura 4b) la diferencia de tiempo obtenida entre máximo y mínimo del nivel de agua en la laguna y en el mar fue de 15 min.

Figura 4. Señal de marea en el Sector Este y en el mar frente a Tepalcates, al inicio del periodo de lluvia, mayo-junio de 2013 (a) y al final del periodo de lluvia, agosto-septiembre de 2013 (b).



**Fuente:** Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

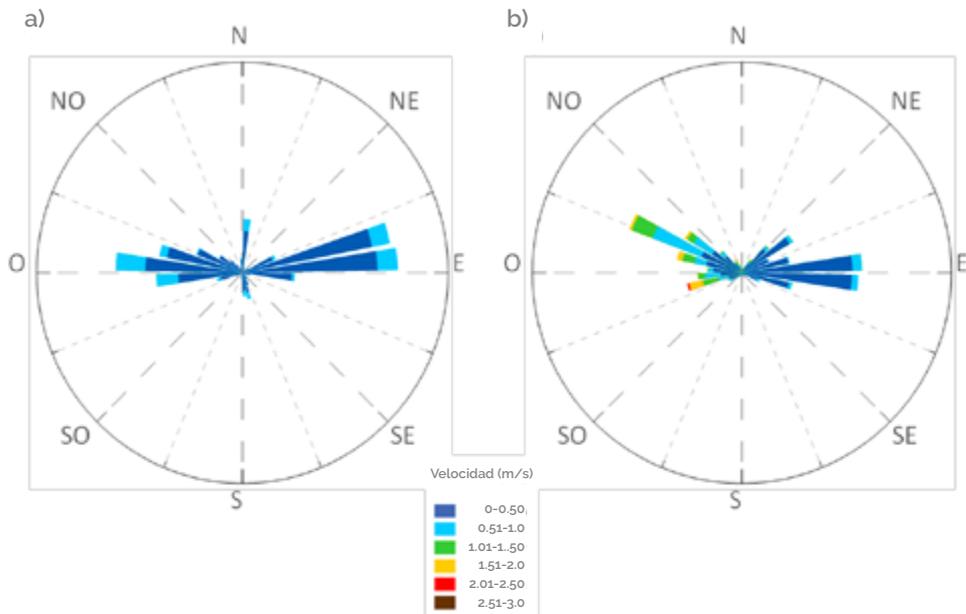
Los resultados del análisis armónico mostraron que las componentes armónicas más importantes tanto en el mar como en la Laguna, en temporadas de estiaje y lluvia fueron: O1, K1, M2 y S2.

#### Corriente de marea:

Los resultados de velocidad y dirección de la corriente medidos con un corrientímetro fijo en el Sector Este revelaron que la magnitud es baja en temporada de estiaje, algunos valores máximos registrados alcanzaron 1.00 m/s. La dirección de la corriente durante inundación fue hacia el este y este-noreste con mayor frecuencia (figura 5a), en tanto que durante el reflujó cambió en dirección opuesta (oeste). En algunos momentos el agua circuló entre norte y sur hacia ambos sentidos.

En temporada de lluvia, la corriente durante inundación se dirigió hacia el este con algunas variaciones entre noreste y este sureste (figura 8b) con magnitud igual a la temporada de estiaje. Durante el reflujó el agua se desplazó principalmente al oeste noroeste con velocidad aproximada de 2.0 m/s, sin embargo, en algunas ocasiones se observó corriente más veloz (2.40 m/s) en dirección oeste suroeste.

Figura 5. Dirección y magnitud de la corriente registrada en el Sector Este durante 2013, en temporada de estiaje (a) y en temporada de lluvia (b).

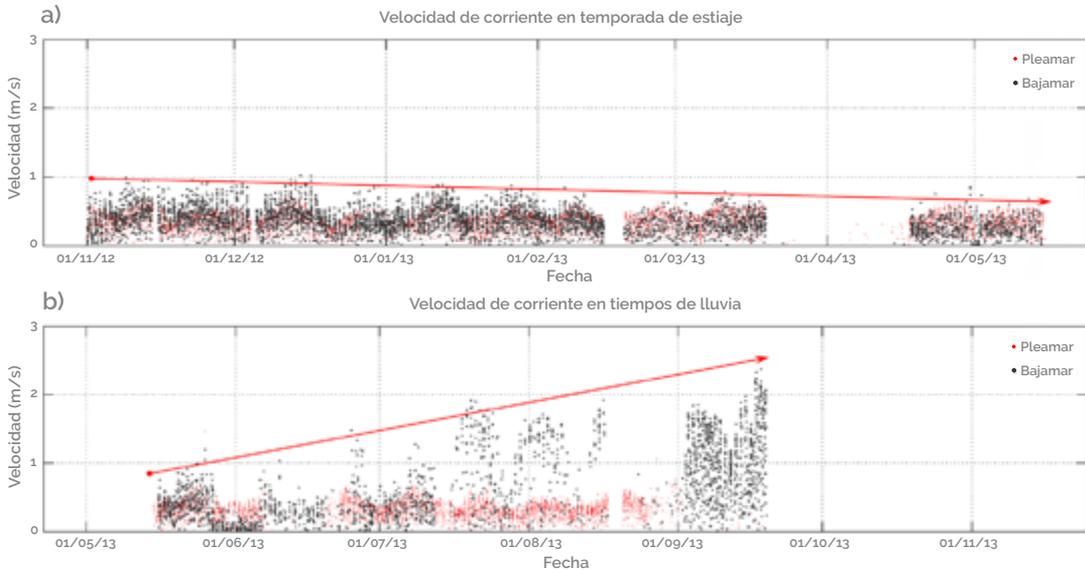


**Fuente:** Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

En temporada de estiaje 2012-2013 la magnitud de la corriente fue menor durante la pleamar (0.32 m/s promedio) que con bajamar (0.79 m/s promedio, figura 6a). Se encontró que la magnitud decayó a partir de marzo de 2013 cuando los máximos de velocidad fueron menor de 1.00 m/s.

Con temporada de lluvia la velocidad de corriente durante vaciado incrementó, durante septiembre se presentaron los valores máximos de velocidad, los cuales variaron entre 1.20 a 2.40 m/s (figura 6b). En condiciones de inundación se conservó la magnitud de velocidad observada en temporada de estiaje.

Figura 6. Velocidad de corriente registrada en el Sector Este durante 2013, temporada de estiaje (a) y época de lluvia (b).



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

### Distribución vertical de la velocidad durante marea muerta y marea viva:

En condiciones de marea muerta los resultados muestran que la velocidad en superficie para el Sector Oeste (figura 7a), tuvo magnitud de 0.20 m/s. Desde la parte sur hacia el centro del área de estudio el agua se desplazó con baja velocidad. En las capas subsecuentes el área con velocidad cercana a cero incrementó. El área aminoró conforme el Sector Oeste termina e inicia el Sector Este. En la capa superficial del Sector Este la dirección de la corriente fue de noroeste a sureste con velocidad promedio de 0.20 m/s, mientras que en las capas subsecuentes la velocidad disminuyó hasta cero.

En condiciones de marea viva y en bajamar la mayor velocidad de la corriente se encausa entre la parte central y la orilla norte del área de estudio. Se observó que a lo largo de la ribera sur (en los tres sectores) la velocidad fluctuó entre 0.1 y 0.5 m/s. En el Sector PA se encontró la máxima velocidad de corriente (2.00 m/s), a una profundidad entre 0.75 y 1.25 m (figura 7b) en la orilla norte, justo donde el terreno es más estrecho,



mientras que en la ribera sur se observó una zona de estancamiento. En este sector se registraron velocidades de 1.50 m/s a una profundidad de 1.75 m. En este Sector se observó que las corrientes más intensas ( $\pm 1.40$  m/s) estuvieron a 0.75 m de profundidad. En cambio, la velocidad de la corriente en el Sector Oeste fue menor que en el Sector Este, entre 0.50 y 0.75 m/s en la parte central y de 0.25 a cero en las orillas.

La corriente durante pleamar en marea viva en el Sector Oeste es 0.20 m/s. Solo en la capa superficial se encontró una porción de área donde la velocidad de corriente se incrementó a cerca de 0.40 m/s (figura 7c). En el Sector Este la velocidad es casi constante e igual a 0.40 m/s.

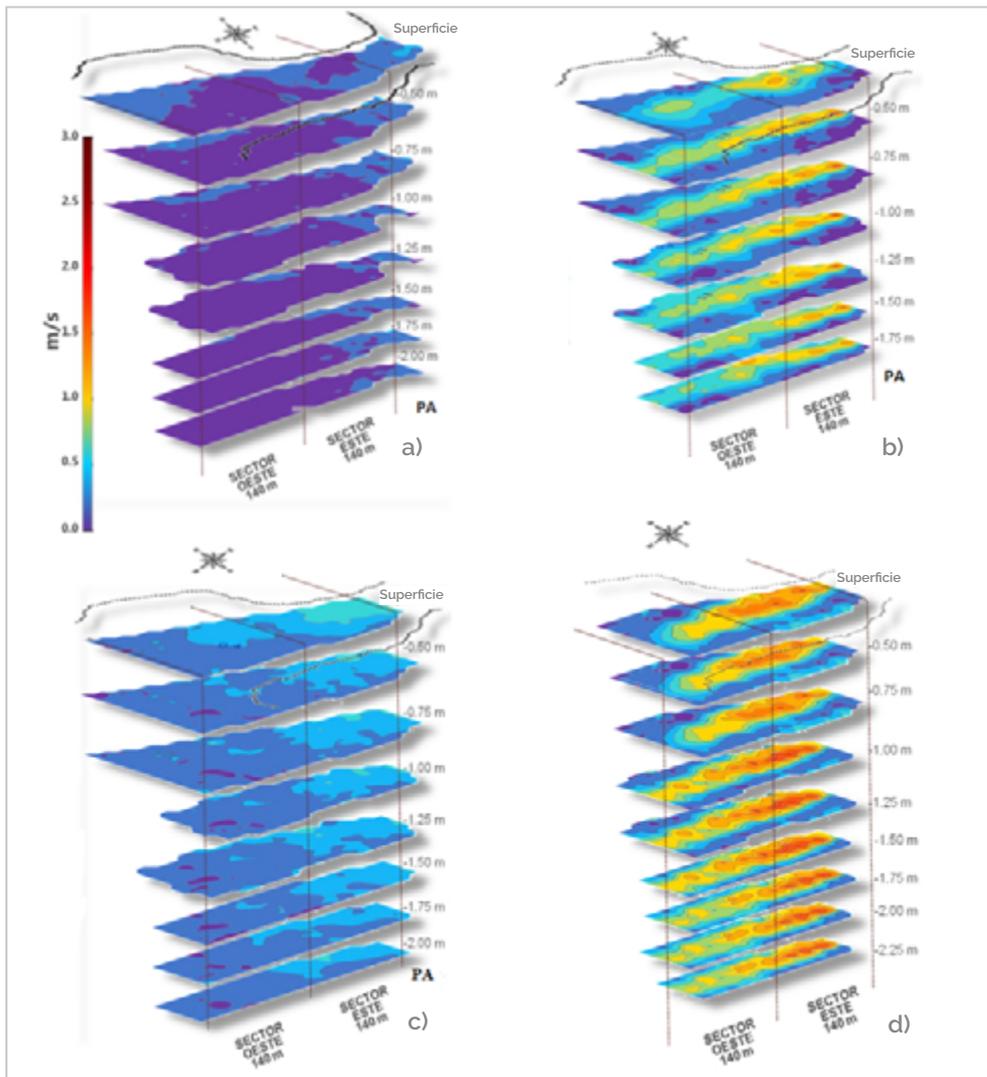
El área con mayor velocidad de la corriente se observa en el Sector Este (figura 7 d), y se presentó en condiciones de bajamar en marea viva. Las mayores velocidades ocurren a una profundidad de 1.00 a 1.50 m con magnitud de 1.60 a 1.80 m/s.

#### **Potencia de densidad:**

Se estimó la potencia cinética de densidad de acuerdo a las capas de mayor velocidad de corriente. Se encontró que durante el flujo de pleamar en la capa superficial (figura 8) la potencia cinética varió entre 0 y 400 W/m<sup>2</sup>. En la orilla Norte del Sector Oeste se observó un área donde la cantidad de energía se acumuló e intensificó. El incremento se originó donde el terreno comienza a estrecharse. Hacia el Sector Este se observaron múltiples picos de mayor potencia, sin embargo, ninguno excede de 400 W/m<sup>2</sup>.

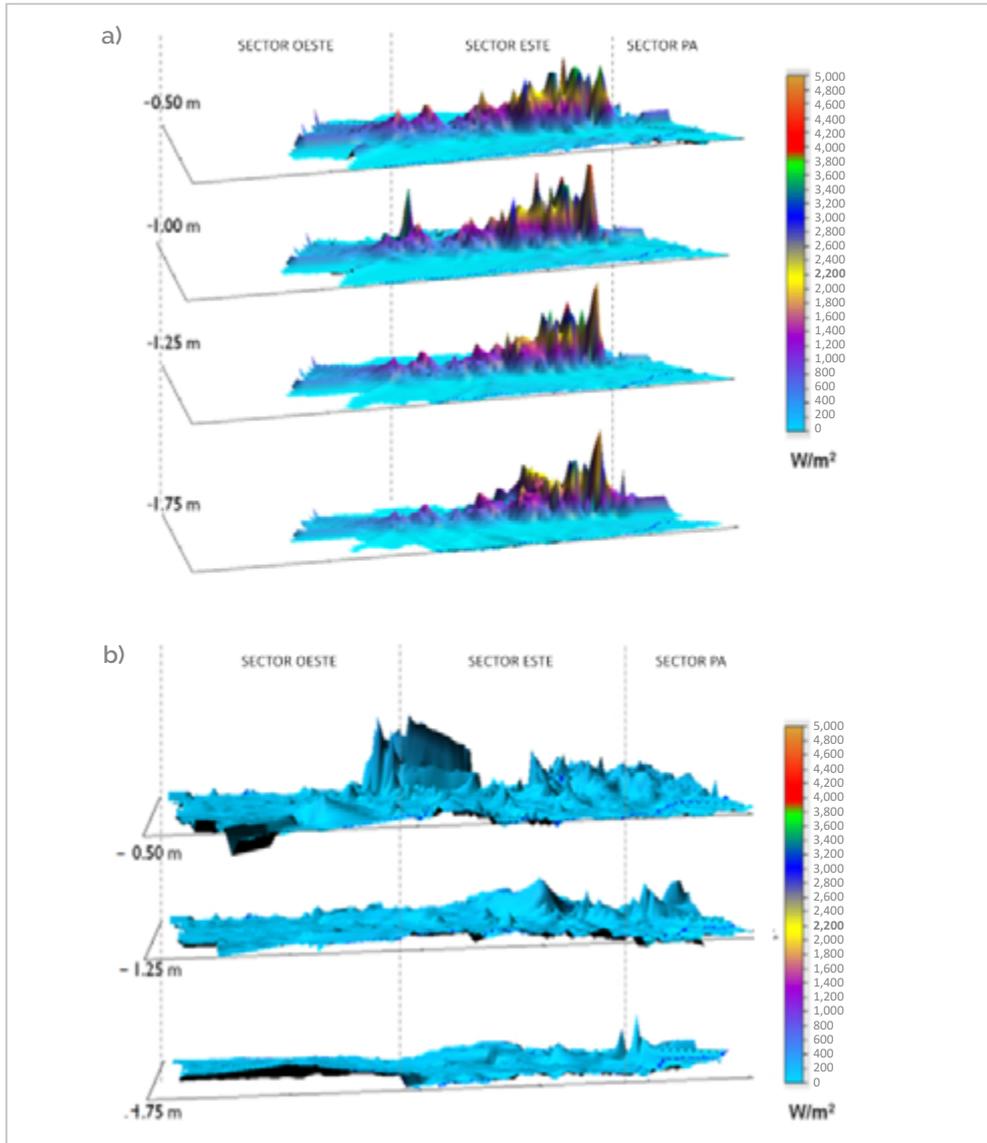
Durante bajamar con marea viva la potencia de la corriente se concentra en la parte central del área de estudio, la intensidad es mayor en el Sector Este, con magnitud de 1000 a 3600 W/m<sup>2</sup> con algunos picos de potencia de hasta 5000 W/m<sup>2</sup> (figura 8b). En la capa superficial la potencia es de 1800 W/m<sup>2</sup>, con picos de potencia de mayor magnitud (5000 W/m<sup>2</sup>) en las capas de 1.00 y 1.25 m de profundidad. Se encontró que durante esta fase de marea la potencia del sitio en la parte central del área de estudio varía entre 2000 a 4000 W/m<sup>2</sup>.

Figura 7. Distribución de corriente por capas de 0.25 m, en condiciones de a) pleamar en fase de marea muerta y b) bajamar en fase de marea viva, c) pleamar en fase de marea viva y d) bajamar en fase de marea viva.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del proyecto.

Figura 8. Potencia cinética de densidad del agua durante a) pleamar con marea viva, b) bajamar con marea viva.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del proyecto.



## Conclusiones

La marea entre la Laguna y el mar presenta un desfase entre ellos, de 30 a 75 minutos, atribuibles a la acumulación de agua y a la inercia del flujo de agua lagunar.

La velocidad asociada a los flujos de marea fluctuó entre 0.20 m/s y 2.70 m/s. La mínima se presentó en condiciones de pleamar con marea muerta y la máxima en bajamar con marea viva. Considerando que existen en el mercado generadores tipo turbina que operan a velocidades mínima de 0.7 m/s, estas magnitudes resultar ser suficientes para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.

Las componentes armónicas con mayor contribución a la amplitud de la marea en la laguna son O1, K1, M2 y S2. La dirección de las corrientes impulsadas por la marea es este-oeste, debido a la orientación del área de estudio y a la batimetría en esa zona.

## Referencias

- Boon, J. D. (2009). *Secrets of the tide, tide and tidal current analysis and applications, storm surges and sea level trends*. Virginia, USA: Woodhead Publishing Limited.
- Galicia-Perez M. A., Gaviño-Rodríguez. J. H., Patiño-Barragán M., Torres-Orozco E., Quijano-Scheggia S., Lara-Chávez B., Obeso-Nieblas M. (2010). Impacto de la Terminal de Gas Licuado Manzanillo en el ecosistema marino de la Laguna de Cuyutlán, Colima, México. *Avances sobre investigaciones marinas y acuícolas del Pacífico Tropical Mexicano*.
- Gooch, S. (2009). *Siting Methodologies for Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Systems*. Tesis de Master of Science in Mechanical Engineering, University of Washington, Washington.
- Iglesias, M. S., R. Carballo, H. Fernández (2012). The TSE index - A new tool for selecting tidal stream sites in depth-limited regions. *Renewable Energy*, 48, 350-357.
- Secretaría de Energía (12 de marzo de 2015). *Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía*. Recuperado de: <http://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-transicion-energetica-y-aprovechamiento-sustentable-de-la-energia>.



# Evaluación del recurso eólico en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez

*Rafael Vidal Herrera,<sup>1</sup> Ramón Gómez Vargas,<sup>2</sup> Jorge Iván Carrillo Flores,<sup>2,3</sup>  
Elías Ramírez Espinosa<sup>2,4</sup> y Alfredo Campos Trujillo<sup>2,5</sup>*

## Resumen

Las fuentes de energía convencionales son finitas y generadoras de contaminación. De manera alternativa, las fuentes de energía renovable, como el viento, son limpias y abundantes en la naturaleza. El recurso eólico es muy sitio-específico, por lo que uno de los mayores retos a la hora de utilizar la energía eólica es encontrar un lugar para ubicar la torre meteorológica y la turbina. La gran dependencia de la potencia generada en un aerogenerador en la velocidad del viento hace que las mediciones meteorológicas in situ sean absolutamente necesarias. El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el recurso eólico de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez (UTCJ) y estimar la producción de generación eléctrica de acuerdo al recurso eólico disponible en el sitio. Los resultados revelaron vientos de baja velocidad con promedio de 2.26 m/s y rangos de generación óptima entre 1 y 3 m/s. El potencial energético calculado para el sitio fue de 6 W/m<sup>2</sup> con dirección predominante oeste-suroeste (wsw) y sur-oeste (sw). A partir de estos resultados, se espera una producción de electricidad a baja escala.

- 1 Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez. Av. Universidad Tecnológica No. 3051, Col. Lote Bravo II. Ciudad Juárez, Chih. C.P. 32695 rafael\_vidal@utcj.edu.mx
- 2 Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., Av. Miguel de Cervantes No. 120. Chihuahua, Chih. México. C.P. 31109. ramón.gomez@cimav.edu.mx
- 3 jorge.carrillo@cimav.edu.mx
- 4 elias.ramirez@cimav.edu.mx
- 5 alfredo.campos@cimav.edu.mx

Considerando la instalación de aerogeneradores con fines didácticos se sugiere adquirir aerogeneradores pequeños, de 100 a 600 watts de potencia por edificios de la UTCJ.

**Palabras clave:** Energía eólica, pequeños aerogeneradores, potencial eólico.

## Introducción

Las fuentes de energía convencionales tales como el petróleo, gas natural o carbón, son finitas y generadoras de contaminación. De manera alternativa, las fuentes de energía renovable como el viento, celdas de combustible, solar, biogás/biomasa, geotérmica, etcétera, son limpias y abundantes en la naturaleza. Entre estas, la energía eólica (EE) tiene un enorme potencial para convertirse en la mayor fuente de energía renovable para el mundo moderno. La EE es una tecnología limpia y libre de emisiones en su generación. Como todas las fuentes renovables, se basa en la captura de energía de las fuerzas naturales y no tiene ninguno de los efectos asociados a los combustibles "convencionales". La EE es la única tecnología de generación de energía que puede proporcionar los recortes de emisión de  $\text{CO}_2$  para el sector energético en el periodo crítico hasta 2020, cuando las emisiones de gases de efecto invernadero lleguen a su pico y comiencen a declinar, lo cual daría alguna esperanza de evitar los peores impactos del cambio climático (Muyen, 2010).

El recurso eólico es muy sitio-específico. La orografía del sitio tiene una gran influencia sobre las características del viento. La energía del viento disponible tiene variaciones conforme varía la velocidad del viento, por lo que el entender las características de las fuentes del viento son críticas en todos los aspectos para la explotación de la energía eólica. Uno de los mayores retos a la hora de usar EE es encontrar el lugar para ubicar la torre meteorológica y la turbina. Así como no existen ambientes típicos rurales, tampoco existen ambientes típicos urbanos. Por otro lado, la fuertísima dependencia de la potencia generada en un aerogenerador en la velocidad del viento hace que las mediciones meteorológicas in situ sean absolutamente necesarias.

La finalidad de las campañas de medición es la colecta de datos que nos brinden la información suficiente para conocer las características del viento de un sitio dado. Los parámetros básicos, son la velocidad y dirección del viento, aunque la temperatura y presión del aire son de gran utilidad para la determinación del potencial eólico. Cada

uno de los parámetros anteriores es medido a una altura apropiada dependiendo de su naturaleza (Gipe, 2000).

Las turbinas de viento pequeñas no tienen sentido para todos o para todos los lugares, pero definitivamente juegan un papel en un futuro más limpio y en una economía energética más inteligente. Aunque las instalaciones de pequeña escala por ahora han sido dejadas de lado por proyectos comerciales en términos de inversiones, apoyos políticos y conciencia pública, la industria de las instalaciones de turbinas eólicas de pequeña escala continúa mostrando crecimiento y considerables esperanzas (Gipe, 2000).

En términos generales, se puede decir que, en el corazón de los centros urbanos, la energía eólica no tiene sentido. Sin embargo, existen espacios abiertos en todos los centros urbanos donde las pequeñas turbinas eólicas pueden ser apropiadas, como parques, áreas protegidas y campos deportivos, que ofrecen la posibilidad de demostrar cómo trabajan estas máquinas dentro y cerca de grandes ciudades. Los suburbios también ofrecen más oportunidades que los centros urbanos a este respecto (Gipe, 2000).

Tomando en consideración lo anterior, el presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el recurso eólico de la UTCJ y estimar la producción de generación eléctrica dimensionada de acuerdo con el viento disponible en el sitio. Así mismo, se desarrolló una guía práctica para el entrenamiento de los alumnos de la carrera de Energías Renovables de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez (UTCJ).

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

El sitio de medición se ubicó en el poniente del campus de la UTCJ ( $31^{\circ}35'56''N$ ,  $106^{\circ}24'32''O$ ). Este sitio se encuentra entre los edificios con denominación H, J, I, en la segunda área de descanso (figura 1).

Figura 1. Ubicación de la estación meteorológica en las instalaciones de la UTCJ.



Fuente: Google maps

## Equipo

Estación meteorológica. Para la colección de los datos meteorológicos se utilizó una estación La Crosse modelo Heavy Weather Pro Ws 2800, la cual permite el uso de una PC para monitorear y grabar datos climatológicos recibidos de la estación inalámbrica climatológica, por medio de un USB que es parte del equipo. También permite revisar los datos históricos, y analizar tendencias respecto al tiempo usando *software* de gráficas. Esta estación cuenta con interfaz de PC, sensor térmico, dirección y velocidad del viento, precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa y alarmas.

Torre. En este proyecto se utiliza una torre pequeña de perfil metálico de 3X3 pulgadas, en el que se sujetan todos los sensores a una altura de 4 metros aproximadamente. Esta altura es debida a que con esta estación se hacen práctica con los alumnos de ingeniería de la universidad.

Calibración de los sensores. Al ser una estación nueva, los sensores venían calibrados de fábrica.

## Registro de datos

Una vez que la estación anemométrica fue instalada, se llevó a cabo el programa de mantenimiento y colecta de datos. Este programa contempla la revisión periódica de datos con la finalidad de garantizar datos fiables. La colecta de datos se realizó de agosto del 2013 a julio del 2014.

## Almacenamiento de Datos

Para la obtención de datos, se sincronizaron los sensores y la consola con un dispositivo USB instalado en la computadora, el cual almacena los datos y se pueden visualizar por medio de un software de soporte del monitor. Para visualizar la información de datos que el monitor recopila del *software*, se hace una sincronización con la computadora. Esta sincronización permite que los datos almacenados en el monitor se descarguen en el *software* instalado en la computadora, además de recibir la información de los sensores directamente a la PC. El programa permite obtener promedios de datos captados cada segundo por los sensores de velocidad y dirección del viento. Campaña de monitoreo.

## Resultados y Discusión

Los valores de velocidad promedio mensual obtenidos se muestran en la tabla 1 y figura 2. También se presentan los datos registrados en las estaciones de los Aeropuertos de Ciudad Juárez, Chih. y El Paso, Tx. (Weather Underground, 2016), con el fin de hacer un comparativo del comportamiento del viento en sitios de la misma área. De este comparativo se observó en el mes de febrero datos que al parecer indican un error en el desempeño de la estación, más que una diferencia debida al emplazamiento mismo de la estación.

Se observó una velocidad promedio anual de 2.30 m/s, registrándose las velocidades más fuertes en octubre, noviembre y diciembre del 2013.

Tabla 1. Valores promedio mensuales de velocidad del viento (m/s) en el área de Ciudad Juárez-El Paso.

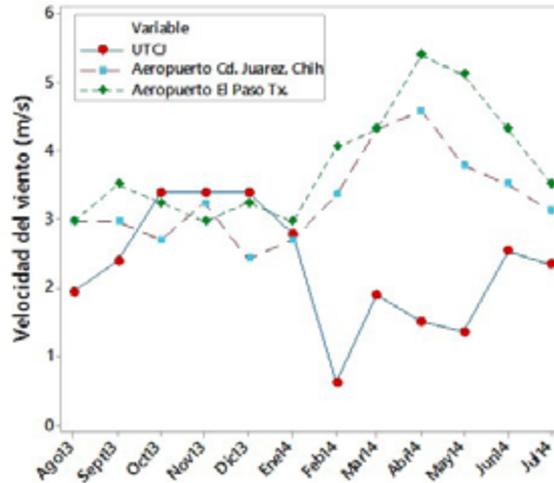
Mes	UTCJ	Aeropuerto Ciudad Juárez, Chih.	Aeropuerto El Paso, Tx.
Ago-13	1.95	2.97	2.97
Sep-13	2.4	2.97	3.51
Oct-13	3.4	2.7	3.24
Nov-13	3.4	3.24	2.97
Dic-13	3.4	2.43	3.24
Ene-13	2.79	2.7	2.97
Feb-13	0.62	3.36	4.05
Mar-13	1.9	4.32	4.32
Abr-13	1.51	4.59	5.4
May-13	1.36	3.78	5.12
Jun-13	2.54	3.51	4.32
Jul-13	2.34	3.12	3.51
Promedio	2.30	3.31	3.80

Fuente: Elaboración propia.

### Rosa de los vientos

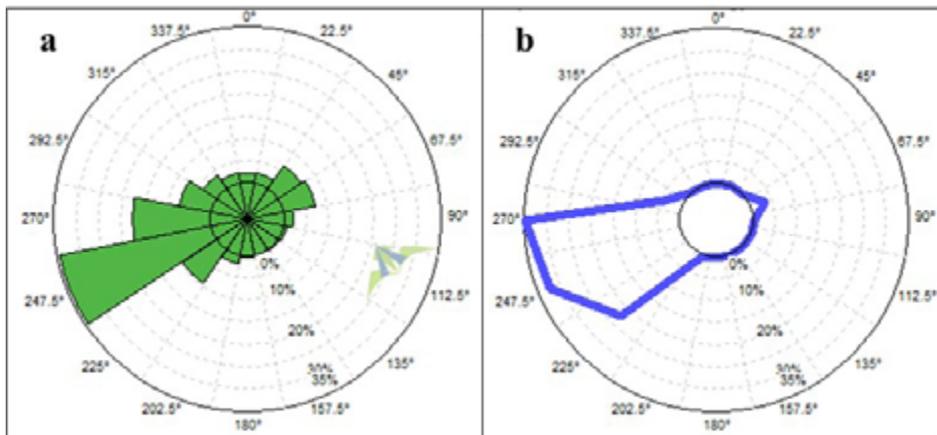
De acuerdo con la rosa de los vientos (figura 3a), la dirección de viento predominante fue wsw/247.5° (35%), seguido de W/270° (18%). El resto de las direcciones registran frecuencias por debajo de 9%. El potencial energético esperado en cada dirección se presenta en la figura 3b.

Figura 2. Series de tiempo de las velocidades de viento promedio (m/s) en el área de Ciudad Juárez-El Paso.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3. Rosa de vientos del sitio UTCJ. (a) Frecuencia por dirección. (b) Proporción de energía por dirección.



Fuente: Software de estación meteorológica la crosse heavy weather pro ws 2800.

## Distribución de Weibull

Para la generación de energía eólica es muy importante poder describir la variación de las velocidades del viento. Si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año se observará que en la mayoría de las áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos moderados son bastante comunes.

Para pronosticar la variación de la velocidad media del viento para un largo tiempo se utiliza la función de distribución acumulada o curva de duración del viento, esta función aporta información sobre la probabilidad de que la velocidad ( $V$ ) exceda un valor límite,  $V_0$  durante un periodo dado. Cuando esta probabilidad se multiplica por 8760 (horas anuales) se obtienen las horas equivalentes que durante un año esperamos que exceda esta velocidad.

La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull, descrita por la siguiente ecuación:

$$F(V_0) = P(V_0 < V) = \exp[-(V_0/C)^k]$$

Donde aparecen los parámetros de escala  $C$  y de forma  $k$ , cuyo valor cambia dependiendo del emplazamiento en estudio. El factor de forma varía en un rango de 1.5 y 3.0. Los valores  $k$  y  $C$  se obtienen a partir de las medidas tomadas en el emplazamiento. Para lograrlo se ajustan los datos obtenidos mediante mínimos cuadrados a la distribución de Weibull.

En la tabla 2 se muestran las frecuencias para las diferentes velocidades observadas en el sitio UTCJ, con las cuales se calculó y graficó la distribución de Weibull (tabla 3 y figura 3).

Tabla 2. Frecuencia de las velocidades de viento observadas en UTCJ.

V(m/s)	Probabilidad del viento (%)
0	0
1	25.8
2	34.7
3	24
4	10.1
5	2.7
6	0.5
7	0

**Fuente:** Software de estación meteorológica la crosse heavy weather pro ws 2800.

Tabla 3. Datos para la Distribución de Weibull en la UTCJ.

Datos para Distribución de Weibull	
Velocidad promedio (m/s)	2.20
DESVIACIÓN ESTANDAR o $\sigma$	2.12
“K” o $\alpha$	1.1
“c” o $\beta$	2.32

**Fuente:** Software de estación meteorológica la crosse heavy weather pro ws 2800.

Para la obtención de la densidad de potencia disponible en el viento (WPD) se consideró una densidad del aire promedio en Ciudad Juárez de  $1.0969 \text{ Kg/m}^3$  este valor depende de la altitud en la que se encuentra la ciudad y se interpolan los valores para considerar su valor local. La tabla 4 muestra la densidad de potencia obtenida.

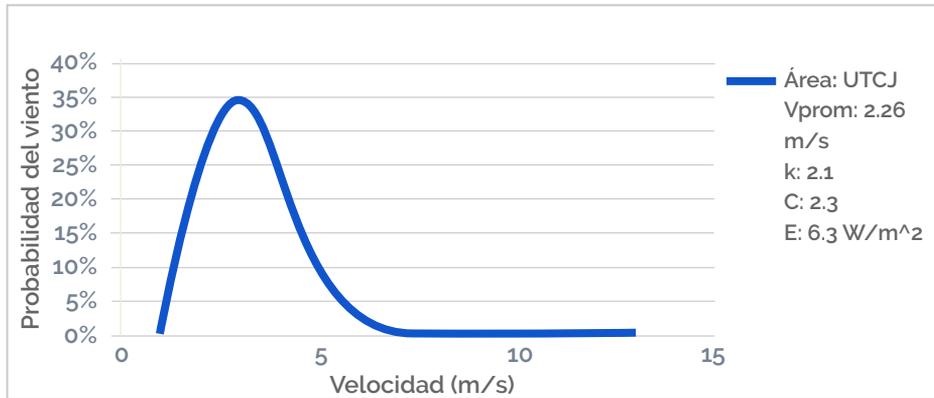
Tabla 4. Parámetros de velocidad y potencia.

Parámetro	Ajuste de valor promedio a Weibull
Velocidad promedio (m/s)	0
Promedio de la densidad de Potencia anual ( $\text{W/m}^2$ )	0.00133
Densidad de potencia	6.31

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con la distribución de Weibull (figura 3) y los datos de la tabla 2, las probabilidades de obtener energía del viento ocurrirán mayormente a 2 m/s (34.7%), seguidas de 1 y 3 m/s (25.8 y 24% respectivamente). La probabilidad de obtener energía a 4 m/s fue de 10.1%. Nuestro análisis se centró dentro del rango entre 1 y 4 m/s, al calcular la desviación estándar promedio " $\sigma$ " de 2.1, una "K" de 2.1 y una "C" de 2.3 (tabla 5). La figura 4 confirma que los rangos de probabilidad de viento inician en 1 m/s y terminan en 4 m/s.

Figura 4. Gráfica de Distribución de Weibull para el sitio UTCJ.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Análisis de Weibull para el sitio UTCJ.

Dirección (°)	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	Promedio
Vprom (m/s)	0.8	0.8	1.1	1.3	1.5	1.3	0.5	1.1	2.4	2.8	3.3	2.8	2.6	1.7	1.2	0.9	2.3
Dev. Estandar	1.2	1.1	1.1	1.3	1.5	1.4	0.7	1.5	2	2.3	2.4	2.2	2.2	1.6	1.2	1.2	2.1
"K" $\alpha$	0.6	0.7	1	1	1	0.9	0.7	0.7	1.2	1.2	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.8	1.1
"C" $\beta$	0.5	0.7	1.1	1.2	1.5	1.2	0.4	0.9	2.6	3	3.6	3.1	2.7	1.8	1.2	0.8	2.32
E (W/m <sup>2</sup> )	0.3	0.3	0.7	1.1	1.9	1.1	0.1	0.8	7.5	11.8	19.5	12.5	9.4	2.9	0.9	0.5	6.31
# Datos captados	99	21	302	349	100	49	18	19	25	100	439	1642	352	348	183	114	4760
F (%)	2.1	0.4	6.3	7.3	2.1	1	0.4	0.4	0.5	2.1	9.2	34.5	7.4	7.3	3.8	2.4	100

Fuente: Software de estación meteorológica la crosse heavy weather pro ws 2800.

El parámetro "K" o " $\alpha$ " es el factor de forma de la función de Weibull. "Vprom" es la velocidad promedio, de acuerdo a la tabla 5 "E" es la densidad de potencia y "F" es la frecuencia de cada sector de dirección en "%". Se observa una dirección predominante a 225° (NW), la segunda en dirección dominante de acuerdo a los datos es 270° (W). La

distribución de Weibull indica un factor de forma de 1.1 menor a la distribución Rayleigh (factor de forma 2) lo que significa vientos bajos. La densidad de potencia ronda los 6.31 W/m<sup>2</sup>.

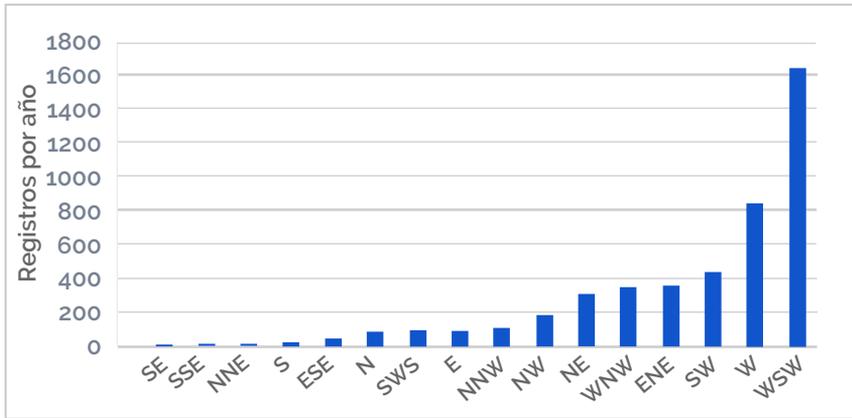
En la tabla 6 se muestran valores numéricos y el valor similar textual correspondiente a la dirección del viento mostrándose también la cantidad de repetición de direcciones del viento, siendo "wsw" la dirección predominante con 35.24% de los registros, seguido de "W" con 18.28% de los registros. Cabe mencionar también "sw" y "wnw" que son los registros siguientes pues en estas direcciones es en donde se enfoca nuestro potencial de energía, los demás datos son importantes y se observan mejor en la gráfica de cantidad de densidades por aparición de direcciones (figura 5).

Tabla 7. Frecuencia de las direcciones de viento en el sitio UTCJ.

Dirección numérica	Dirección	%
135	SE	0.39
157.5	SSE	0.41
22.5	NNE	0.45
180	S	0.54
112.5	ESE	1.05
0	N	2.12
202.5	SWS	2.15
90	E	2.15
337.5	NNW	2.45
315	NW	3.93
45	NE	6.48
292.5	WNW	7.47
67.5	ENE	7.49
225	SW	9.42
270	W	18.28
247.5	WSW	35.24

Fuente: Software de estación meteorológica La Crosse Heavy Weather Pro ws 2800

Figura 5. Gráfica de densidades por aparición de direcciones.



**Fuente:** Software de estación meteorológica La Crosse Heavy Weather Pro ws 2800.

Los resultados obtenidos revelan vientos de baja velocidad con promedio de 2.26 m/s y rangos de generación óptima entre 1 y 3 m/s. Estas velocidades de vientos no es posible aprovecharlas con eficiencias por arriba del 31% utilizando rotores multipala, ya sea para bombeo de agua o generación eléctrica.

Si se fueran a utilizar aerogeneradores de tipo horizontal de tres palas comerciales de pequeña escala, se debe observar que las velocidades de arranque de estos sean de máximo a 1 m/s y que la curva de producción de energía eléctrica alcance su mejor producción eléctrica dentro de los 3 m/s. Para estas velocidades de viento, el aerogenerador tipo Savonius, que alcanza una eficiencia máxima del 16% dentro del rango de velocidades entre 1 y 3 m/s, es el ideal.

El potencial energético calculado para la UTCJ fue de 6 W/m<sup>2</sup> con dirección predominante al oeste sur oeste (wsw) y al sur oeste (sw), lo cual es congruente con los vientos registrados en ciudad Juárez, donde el patrón de velocidad promedio no superó los 4 m/s. Monitoreos históricos por más de diez años, muestran velocidades promedio menores a 5 m/s, por lo que el patrón y la zona nos hace ver que tendremos vientos de baja escala.



## Conclusiones

A partir de estos resultados, se espera una producción de electricidad a baja escala. Considerando la instalación de aerogeneradores con fines didácticos se sugiere adquirir aerogeneradores pequeños, de 100 a 600 watts de potencia por edificios de la UTCJ.

Se recomienda continuar con la estimación del potencial del recurso eólico en la UTCJ, buscando un emplazamiento que cumpla mejor con las características requeridas para estos fines (mayor altitud de las mediciones, en terrenos planos libres de obstáculos, mejores sensores meteorológicos, etc.).



## Referencias

Gipe, P. (2000). *Energía Eólica Práctica*. Sevilla, España. PROGENSA.

Muyen, S.M. (Ed.). (2010). *Wind Power*. Vukovar, Croatia. Intech.

Weather Underground. (2016). Datos meteorológicos históricos. Disponible en: <https://www.wunderground.com/>. Consultado: 11 de octubre de 2016.



# Propuesta de un Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (sadre) para el establecimiento de parques fotovoltaicos: Chihuahua, México

*Guillermo Iván Hinojos Mendoza,<sup>1,2</sup> Dulce María Heredia Corral,<sup>1</sup> Jessica Mariscal Guerra,<sup>1</sup> Luis Ernesto Cervera Gómez,<sup>3</sup> Esmeralda Cervantes Rendón<sup>3</sup> y Adrián Botello Mares<sup>3</sup>*

## Resumen

Ante la evidencia reconocida en el mundo con respecto del carácter inequívoco del cambio climático, muchos países desarrollados han avanzado en los esquemas de aprovechamiento de fuentes alternativas. Una de esas fuentes alternativas es la energía solar. Por su ubicación geográfica, México es un país privilegiado por los altos niveles de radiación solar que recibe y que potencialmente podría ser aprovechado para la generación energía solar fotovoltaica o térmica solar. En ese contexto, el estado de Chihuahua está localizado dentro de la región más privilegiada del país, ya que, junto con Sonora, captan la mayor radiación solar.

Uno de los factores de interés y de éxito para el establecimiento de parques o granjas solares fotovoltaicas consiste en garantizar a los inversionistas una viabilidad técnico económico, ambiental y social. Para ello es necesario que el territorio cuente con características físicas, bióticas y sociales muy específicas, no solo para poder garantizar un aprovechamiento óptimo de la radiación solar, sino para obtener las autorizaciones y

1 ASES, Avenida Francisco Villa #7701, Plaza Bambú, Local 10, Chihuahua, Chih. México.

2 Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).

3 El Colegio de Chihuahua, Ciudad Juárez.



permisos necesarios. De tal modo que un Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (SADRE), puede representar una herramienta decisonal que permita identificar las condiciones óptimas para el establecimiento de dichos parques.

**Palabras Clave:** Energía Solar, Modelo de aptitud, Energía renovable, Cambio Climático

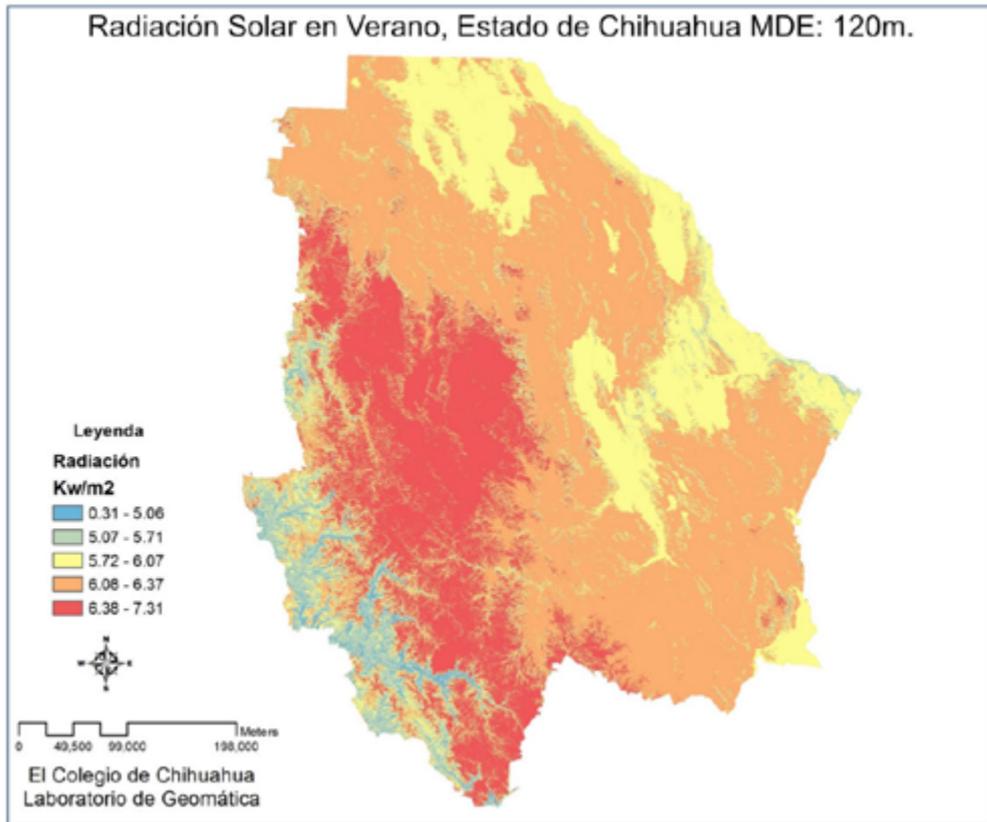
## Introducción

El potencial de irradiación solar, también conocida como insolación, que corresponde a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo sobre la superficie terrestre y se mide en  $Wh/m^2$  (Mundo *et al.*, 2014), no es el único factor que hay que tomar en cuenta para el establecimiento de la infraestructura de un parque fotovoltaico. En efecto, las condiciones de insolación deben de ser óptimas para que el sistema logre un nivel de eficiencia atractivo en términos de producción energética y de rentabilidad económica. Sin embargo, aspectos como la cercanía a las infraestructuras de tendido eléctrico como líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, representan una limitante o un impulsor importante a considerar cuando se trata de realizar una inversión económica que a menudo representa varios millones de dólares. Algunos otros aspectos se encuentran relacionados con las facilidades de gestión y autorización que se realizan en el establecimiento de los parques, tales como el uso del suelo y la vegetación de los terrenos en los cuales se pretenden desarrollar dichas infraestructuras, lo que determina la necesidad de estudios asociados al cambio de uso de suelo, así como también los tipos de propiedad ya que para ciertos inversionistas resulta más atractivo realizar contratos (algunas veces de hasta 20 o 25 años), con particulares en lugar de mancomunales o ejidos. Otros elementos como la topografía y los riesgos de inundación son importantes para la toma de decisiones, así como para la definición de un modelo de aptitud.

En México se cuenta con un promedio privilegiado en cuanto a irradiación solar, con un promedio de  $5.3 \text{ kWh}/m^2$ . Y sabiendo que el potencial de radiación del Estado de Chihuahua oscila entre los 4 y los  $6 \text{ kWh}/m^2/\text{día}$  en promedio, según datos presentados por la Asociación Nacional de Energía Solar, en el presente trabajo se plantea el potencial del territorio para el establecimiento de los parques fotovoltaicos en relación a la factibilidad económica, legal, técnica y social. En una estimación realizada con los

módulos de energía solar de Arcgis por Cervera y Botello (2017), se encontró la siguiente distribución espacial de energía. El siguiente mapa se calculó con 92 días de verano:

Mapa 1. Radiación solar en días de verano en el Estado de Chihuahua.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Según Charabi (2010), existen factores que destacan la viabilidad de los terrenos para el establecimiento de parques fotovoltaicos y estos terrenos deben cumplir con una serie de requerimientos. Las instalaciones de los parques fotovoltaicos a gran escala se adoptaron en la perspectiva del desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático, ya que funcionan durante largos períodos con un bajo mantenimiento. Desde este punto de vista, la instalación de parques fotovoltaicos debe respetar las zonas



sensibles en el paisaje y la protección de monumentos debido a los requerimientos estéticos (Charabi, *et al.*, 2010).

En este trabajo se consideraron los siguientes factores como determinantes de la aptitud: terreno, clima, infraestructura y las restricciones de tipo legal en el proceso de gestión. Esto último condicionado a la normatividad, es decir, a los lineamientos que favorecen el desarrollo de los proyectos de acuerdo a los usos del suelo y la vegetación, así como al tipo de propiedad de los terrenos. El resultado de este trabajo proporciona un método que ofrece una posibilidad para los inversionistas de parques fotovoltaicos a partir de un Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (SADRE) para la selección de un sitio óptimo que facilite el proceso de toma de decisiones, de acuerdo con las características del terreno, condiciones climáticas, capacidad y cercanía de la infraestructura, así como facilidades para el cumplimiento de la normatividad legal y ambiental.

### Características que intervienen en el establecimiento de los parques fotovoltaicos

El incremento del sector de las energías renovables en México a partir de la publicación de los instrumentos regulatorios en el 2011, que facilitan la interconexión de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, registró una capacidad adicional instalada de estos sistemas en pequeña y mediana escala por 3.48 W, en el periodo 2010- 2011 (Jaramillo *et al.*, 2013). Considerando el crecimiento de la capacidad de generación eléctrica por este tipo de sistemas interconectados a la red, principalmente en el sector residencial y de servicios, su crecimiento fue del 763% (1.34 MW) en el año 2010 y 128% (1.95 MW) (SENER, 2009). Este antecedente incrementa la necesidad de brindar soluciones para que el sector siga creciendo a partir de la facilitación de la toma de decisiones respecto al lugar del establecimiento.

Heartsch, (2012), se refiere a los mapas de SIG (Sistemas de Información Geográfica) como aquellas herramientas que ofrecen oportunidades para el consenso a través de la construcción de lenguajes visuales que facilitan la explicación y su comprensión. Asimismo, Ozawa, (1999) argumenta que la visualización de los datos e información que se despliega puede proveer una herramienta efectiva para ayudar a las partes a llegar a un consenso en ciertos tipos de discusiones o disputas. Los mapas SIG de consenso y/o argumentación se pueden utilizar para dar soporte a la toma de decisiones del entorno



de un grupo, mejorar el discurso público y la deliberación sobre decisiones espaciales y resolver conflictos entre las partes interesadas (Malczewski, 2011).

En este trabajo se propone un sistema que sirve para conciliar las características que hacen idóneo un sitio para establecer un parque fotovoltaico, el número de alternativas de ubicación y de criterios o atributos a tomar en cuenta y se define el grado de complejidad en la toma de decisiones espaciales. Además, en dicho proceso intervienen los diferentes enfoques de las perspectivas de los tomadores de decisión y se propone una alternativa diferente entre los distintos estudios que se han realizado en la determinación de modelos de aptitud para el establecimiento de proyectos de energía renovable, a menudo enfocados en el potencial de generación de energía únicamente.

Los parques fotovoltaicos se consideran como deseables, sin embargo, como en cualquier proyecto de infraestructura que implica un cambio de uso de suelo, tienen el potencial de generar un impacto ambiental específico que debe de ser mitigado. Su ubicación, puede generar un beneficio directo no solo por la energía que se produce, sino también por las infraestructuras que son necesarias para su funcionamiento (la mejora del acceso, la mejora de la red eléctrica en la zona, la construcción de nuevas subestaciones, nuevos puestos de trabajo durante la construcción y de mantenimiento posterior). (Carrión, 2008).

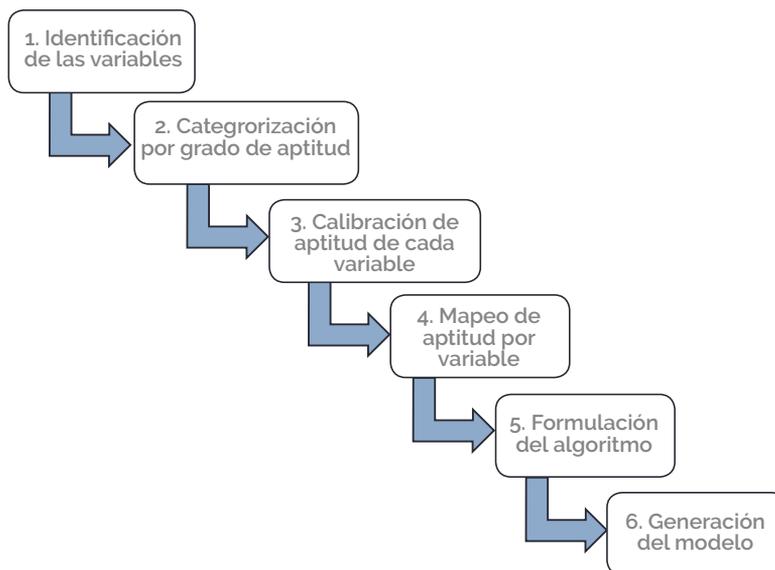
Tal y como lo propone Carrión, (2008), en su evaluación de la capacidad de carga del territorio para el establecimiento de los parques fotovoltaicos, algunos de los criterios establecidos y justificados para dicho propósito son: ubicación, geomorfología, clima y condiciones ambientales. El análisis de las variables anteriores, así como aquellas que se integran para determinar la factibilidad en los procesos de gestión de trámites y de tipo legal, se integraron en este trabajo para obtener como resultado un SADRE, el cual sirva como herramienta para dar a conocer el potencial del Estado de Chihuahua en el sector energético. Los pasos que se realizaron para lograr el objetivo de este trabajo se señalan a continuación en el apartado de metodología.

## Metodología

Esta parte del trabajo tiene como objetivo detallar las etapas que han permitido llegar a la formulación de una herramienta referenciada espacialmente para la toma de decisiones. El enfoque incluye 6 etapas consecutivas que evalúan las zonas potencialmente aptas

para la instalación de parques fotovoltaicos. A partir de la identificación, se realizó una calibración biofísica de las variables del terreno, del clima y de la infraestructura. La calibración se llevó a cabo de acuerdo a una categorización de los niveles de aptitud, conformada por 5 clases. Esto último permitió obtener un mapeo del nivel de aptitud por variable. Finalmente, los mapeos fueron un insumo para la formulación del algoritmo que generó el SADRE. A continuación, se presenta un esquema del proceso metodológico que se divide en 6 etapas:

Figura 1. Esquema de los pasos metodológicos.



---

**Fuente:** Elaboración propia, 2017.

La presente propuesta no se limita por las variables tal y como se describen aquí, sino que se trata de un ejemplo que permite demostrar que a partir de este enfoque conceptual es posible integrar la factibilidad del territorio para el establecimiento de los parques fotovoltaicos y proponer a los tomadores de decisión este sistema como una herramienta para facilitar su toma de decisiones. El método de trabajo que se empleó en cada uno de los pasos planteados en el esquema anterior se describe a continuación de manera detallada.

## Identificación de las variables

En una primera etapa se identificaron las variables de acuerdo a las condiciones presentes en el Estado de Chihuahua, analizándolas en cinco distintas categorías: terreno, clima, infraestructura y restricciones en la gestión de tipo legal (tabla 1). La selección de estas variables que se integran en cada categoría contribuye a determinar la factibilidad económica, legal, técnica y social que se representan en el SADRE. Las características y criterios que se buscaron de cada variable se detallan a continuación.

La primera categoría describe las características del terreno enfocado principalmente a su aspecto fisiográfico. La primera de ellas hace referencia a la pendiente, la cual en gran medida determina la viabilidad del terreno, dado que el óptimo para esta variable se encuentra en una inclinación menor a los 5 grados, incrementando como máximo hasta los 13 grados; conforme la pendiente aumenta la posibilidad de establecer la infraestructura disminuye por la necesidad del acondicionamiento de la zona que se ve reflejado en un incremento de la inversión. Otra variable que se encuentra directamente relacionada con la anterior, son las formas del relieve (geomorfología); categorizando las zonas montañosas con una aptitud muy baja por las formas del terreno, mientras que las zonas planas se consideraron de mayor aptitud para la instalación de los parques fotovoltaicos. La última variable de esta categoría corresponde a los terrenos sujetos a inundación delimitadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), categorizando esas zonas con una aptitud muy baja ya que para la infraestructura representa una limitante técnica.

La categoría de restricción por dificultades de gestión incluye a aquellas variables que, de acuerdo al procedimiento legal para el establecimiento de parques fotovoltaicos, representan un impedimento del proceso o un incremento de trámites. La primera variable es por el tipo de propiedad que conforma la categoría del terreno, ya que, al ser un predio particular, su nivel de aptitud es muy alto debido a la posible negociación con el propietario; de lo contrario, al ser tierras de uso común, la aptitud es muy baja debido a que el proceso de gestión para la adquisición del predio es más complejo. La variable de uso de suelo y vegetación se encuentra regulada por normas jurídicas, en ésta se categorizaron con un nivel muy alto de aptitud a aquellas zonas en las que ya hubo intervención humana, como las áreas agrícolas y desprovistas de vegetación. Los pastizales inducidos se categorizaron con una aptitud media, considerando la definición



que señala el INEGI esta cobertura no es completamente natural, ya que se desarrollan al eliminarse la vegetación original (bosque, selva, matorral, otros). Por último, el nivel de aptitud muy bajo fue asignado a las coberturas vegetales que han permanecido inalteradas por el hombre, como los matorrales, bosques y pastizales naturales, que además desde el punto de vista ecológico deben de ser preservados para luchar contra el cambio climático (Hinojos-Mendoza, 2014).

La categoría de restricción legal se refiere a los sitios en donde se restringe legalmente el desarrollo de proyectos dentro de la zona, para lo cual se ubicaron las Áreas Naturales Protegidas (ANP), las Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) y los sitios RAMSAR (Convención sobre los Humedales en pro de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos) que corresponden a los sitios que por sus características se aplica la legislación nacional en la materia de conservación, protección y uso racional de los recursos naturales; su categorización corresponde a un nivel muy bajo de aptitud a aquellas zonas que contaban con alguna área protegida. La variable de sitio arqueológicos corresponde a las zonas en donde se ubican dichos sitios, estos fueron clasificados con una aptitud muy baja de acuerdo a la restricción establecida por el Instituto Nacional de Antropología e Historia en México (INAH).

La cuarta categoría es el clima, en la cual la variable temperatura es determinante. El parámetro bioclimático empleado fue la temperatura media anual, categorizando a las regiones que mostraron un rango de temperatura entre los 19°C y 20°C con un nivel de aptitud alto, mientras que en donde la temperatura media es igual o menor a los 18°C se le asignó un nivel muy alto. Por último, las zonas donde la temperatura alcanza más de 30°C se clasificaron con un nivel muy bajo de aptitud. Esta Calibración se realizó tomando en cuenta la referencia de Skoplaki y Palyvos, (2008). "La temperatura de funcionamiento juega un papel importante en el proceso de conversión fotovoltaica. Tanto la eficiencia eléctrica como, consecuentemente, la potencia de salida de un módulo fotovoltaico depende linealmente de la temperatura del funcionamiento; a mayor temperatura del módulo menor eficiencia".

Por último, en la quinta categoría se incluyeron dos variables: líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, estas se ponderaron de acuerdo a la cercanía ya que son insumos necesarios. Para su análisis se determinó un área de influencia de 3 kilómetros a la subestación eléctrica y 1 kilómetro a la línea de transmisión eléctrica, aquellas zonas

que quedaban dentro de dicha área se clasificaron con un nivel muy alto de aptitud, mientras que las zonas que quedaron fuera se clasificaron con aptitud muy baja.

Tabla 1. Categorías de las variables analizar.

CATEGORÍA	VARIABLES	CLAVE
Terreno	Pendiente	Pe
	Relieve	Re
	Terrenos sujetos a inundación	In
Restricción por gestión	Tipo de propiedad	Tp
	Uso de suelo y vegetación	UsV
Restricción legal	Áreas protegidas	Ap
	Sitios arqueológicos	Sa
Clima	Temperatura	Te
Infraestructura	Líneas de transmisión	Lt
	Subestaciones eléctricas	Se

Fuente: Elaboración propia.

### Categorización por grado de aptitud

La categorización de 5 niveles permitió la identificación de los índices de aptitud, donde los más altos indican una mayor factibilidad para el establecimiento de parques fotovoltaicos.

Tabla 2 Características de los grados de aptitud

CATEGORÍAS DE APTITUD	CARACTERÍSTICAS
Nivel (1) Muy baja	Las condiciones no se consideran adecuadas para el establecimiento
Nivel (2) Baja	Las condiciones son limitadas
Nivel (3) Media	Resulta el punto medio entre las áreas que reúnen características
Nivel (4) Alta	Las variables se cumplen casi en su totalidad para el establecimiento de parques fotovoltaicos

Continúa

Nivel (5) Muy alta	Las características de las variables cumplen con los criterios establecidos
--------------------	---

Con los niveles de aptitud se prosiguió a calibrar cada una de las variables que se integraron en el SADRE.

### Calibración de cada variable

La calibración se elaboró apegada a las especificaciones necesarias de cada variable que se describieron para la factibilidad del establecimiento de los parques fotovoltaicos, en donde de acuerdo a las condiciones que se presentan en el estado de Chihuahua se integraron en cada una de las categorías de aptitud como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Calibración de las variables de acuerdo al grado de Aptitud

<b>Categoría terreno</b>	
<i>Pendiente</i>	
<b>Categorías aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	Pendientes con una inclinación menor a los 5 grados.
Nivel (4) Alta	Pendientes entre 5 y 13 grados.
Nivel (3) Media	Pendientes que van de los 13 a los 23 grados.
Nivel (2) Baja	De los 23 a los 35 grados de inclinación.
Nivel (1) Nula	Pendientes que superan los 35 grados
<i>Relieve</i>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Alta	Llanuras
Nivel (3) Media	Lomeríos
Nivel (1) Nula	Montaña medianamente diseccionada y Montaña débilmente diseccionada
<i>Tipo de propiedad</i>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	Particulares

Continúa

Nivel (1) Nula	Tierras de uso común
<b>Uso de suelo y vegetación</b>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	Agricultura de Riego
Nivel (5) Muy alta	Agricultura de Riego Eventual
Nivel (5) Muy alta	Agricultura de Temporal
Nivel (4) Alta	Área sin vegetación
Nivel (3) Media	Pastizal Halófilo
Nivel (3) Media	Pastizal Inducido
Nivel (3) Media	Zona urbana
Nula	Resto de los tipos de vegetación
<b>Terrenos sujetos a inundación</b>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	Zonas no susceptibles a inundación.
Nivel (1) Nula	Zonas susceptibles a inundación.
<b>Áreas protegidas</b>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	Áreas sin protección
Nivel (1) Nula	Áreas protegidas
<b>Categoría clima</b>	
<b>Temperatura</b>	
<b>Categorías de aptitud</b>	<b>Características</b>
Nivel (5) Muy alta	18°C o menos
Nivel (4) Alta	19°C y 20°C
Nivel (3) Media	De los 21°C a los 25°C
Nivel (2) Baja	De los 26°C a los 30°C
Nivel (1) Nula	Mayor a los 30°C
<b>Categoría infraestructura</b>	

Continúa

<i>Líneas de transmisión</i>	
Categorías de aptitud	Características
Nivel (5) Muy alta	Zonas dentro del área de influencia
Nivel (1) Nula	Zonas fuera del área de influencia
<i>Subestación eléctrica</i>	
Categorías de aptitud	Características
Nivel (5) Muy alta	Zonas dentro del área de influencia
Nivel (1) Nula	Zonas fuera del área de influencia
<i>Sitios arqueológicos</i>	
Categorías de aptitud	Características
Nivel (5) Muy alta	Zonas que no cuentan con un sitio
Nivel (1) Nula	Zonas que cuentan con un sitio

### Formulación del algoritmo

La formulación del algoritmo fue una adaptación del algoritmo del cálculo de aptitud productiva; el cual se procesó a través de un sistema de información geográfica a través de álgebra de mapas. Este algoritmo se integra de la siguiente manera:

$\sum_{i=1}^n (((Pe + Re + Tp + UsV + In + Ap + Te + Lt + Se + Sa) * H) * F)$ , donde:

**Pe**= Pendiente

**Re**= Relieve

**Tp**= Tipo de propiedad

**UsV**= Uso de suelo y vegetación

**In**= Terrenos sujetos a inundación

**Ap**= Áreas protegidas

**Te**= Temperatura

**Lt**= Líneas de transmisión

**Se**- Subestaciones eléctricas

**Sa**- Sitios arqueológicos

**H**- Valor máximo de la sumatoria

**F**- Número de categorías (5 grados de aptitud)

Desde =1 (primer polígono), hasta = último polígono presente en el modelo.

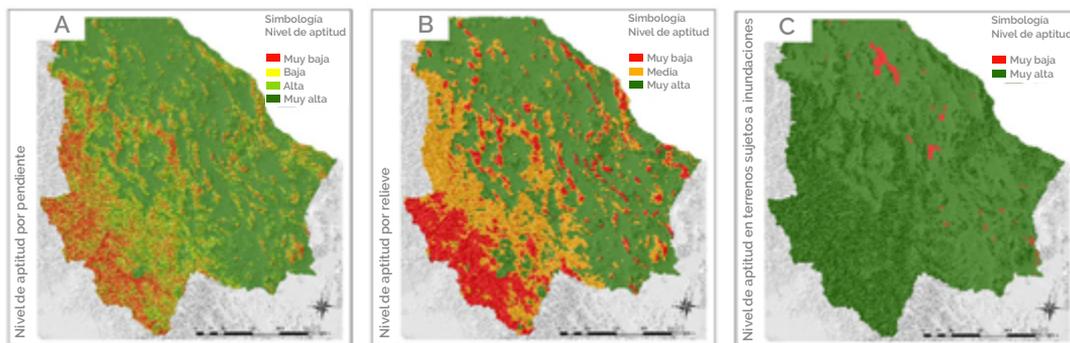
## Resultados

Los resultados obtenidos para el presente estudio se aprecian en los subcapítulos 4.1 y 4.2, correspondientes al modelo de aptitud resultante por variable, en primer lugar, y posteriormente a la generación del Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (SADRE) para el establecimiento de parques fotovoltaicos. Estos componentes representan el aporte principal de este artículo, el cual, en un análisis e interpretación de los resultados, se llega a una conclusión de la relevancia de lo presentado.

### Mapeo de aptitud por variable

El resultado de la calibración de cada variable y su respectiva categorización de acuerdo a los grados de aptitud para la factibilidad del establecimiento de los parques fotovoltaicos se muestra a continuación de acuerdo a la categoría de variable que se muestra en la tabla 1:

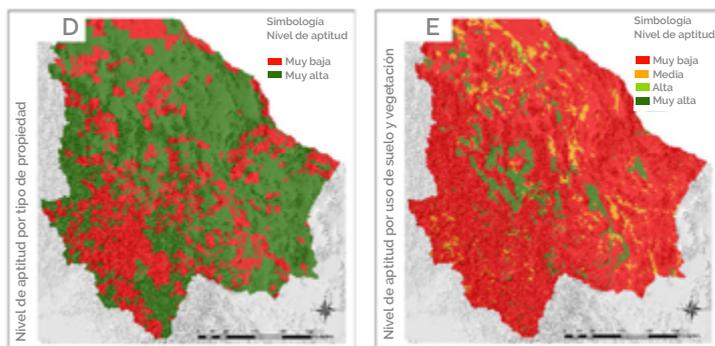
Mapa 2. Grado de aptitud de las variables de terreno.



**Fuente:** Elaboración propia.

La ponderación de las pendientes muestra un nivel de aptitud muy alto para los parques fotovoltaicos en un 56.25% de la superficie estatal. En contraste, al oeste del estado se presenta un nivel bajo de aptitud, ya que las pendientes superan los 35 grados principalmente en la zona de la Sierra Madre Occidental. El relieve (mapa B) se muestra en 3 niveles de aptitud, en donde el 54.96% de la superficie estatal se representa en color verde indicando que esa zona se conforma por áreas llanas de aptitud alta; el nivel de aptitud medio conforma el 28.66% del territorio estatal, se simboliza en color naranja y tiene mayor presencia al oeste del Estado. Las áreas sujetas a inundación (mapa C) se muestran en dos niveles de aptitud: muy baja y muy alta, en donde se puede identificar que solo el 1.20% de su superficie es susceptible de este riesgo, principalmente en áreas de los municipios de Ahumada, Aldama, Coyame y en menor proporción en zonas de Camargo, Ascensión, Saucillo y Jiménez.

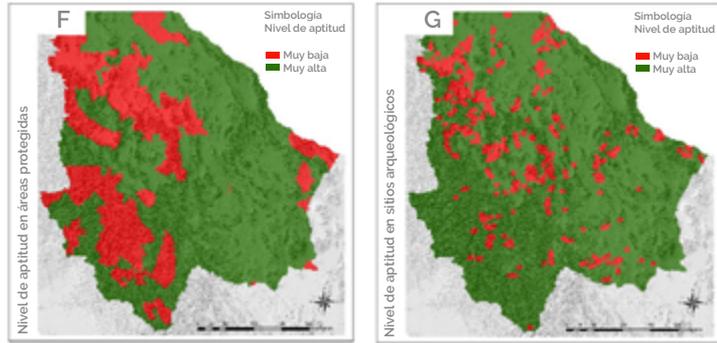
Mapa 3. Grado de aptitud de las variables de restricción de gestión.



**Fuente:** Elaboración propia.

En el mapa E de las variables de restricción de gestión es posible observar que la principal limitante en algunas regiones es el uso de suelo y la vegetación. De acuerdo a la calibración el 85.44% de la superficie presenta una aptitud muy baja que se muestra en color rojo. En el mapa D se muestra que el 35.27% de los predios en el estado de Chihuahua son tierras de uso común, mientras el 64.73% son de propietarios particulares.

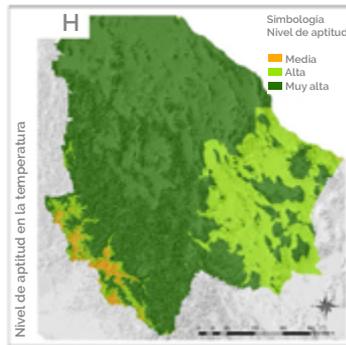
Mapa 4. Grados de aptitud de las variables de restricciones legales.



**Fuente:** Elaboración propia.

Las variables anteriores de la categoría de restricción legal solo muestran dos grados de aptitud. Las áreas protegidas se concentran en la zona oeste del estado (mapa F), representando un 29.62% de la superficie estatal. Mientras que los sitios arqueológicos tienen una distribución más dinámica en la parte central del estado.

Mapa 5. Grado de aptitud de la temperatura media anual.

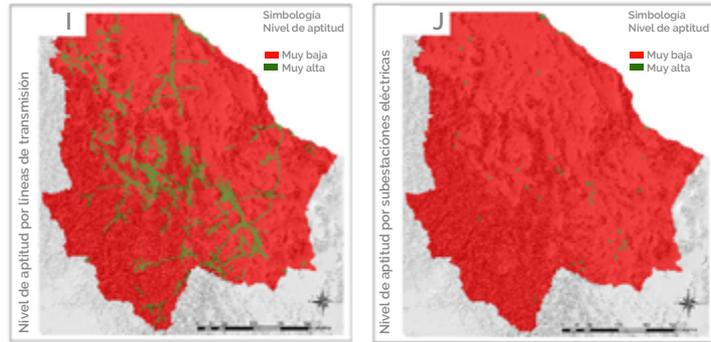


**Fuente:** Elaboración propia.

El mapa anterior se muestra una clasificación de los niveles de aptitud en la temperatura media anual. La temperatura es una variable que destaca, ya que su aptitud muestra un comportamiento completamente favorable para la producción de energía solar a través de plantas fotovoltaicas. Se puede identificar una zona clasificada con una aptitud media

la cual representa únicamente el 1.53% de la superficie estatal y se presenta en las zonas más bajas de la Sierra Madre Occidental.

Mapa 6. Grado de aptitud de las variables de infraestructura.



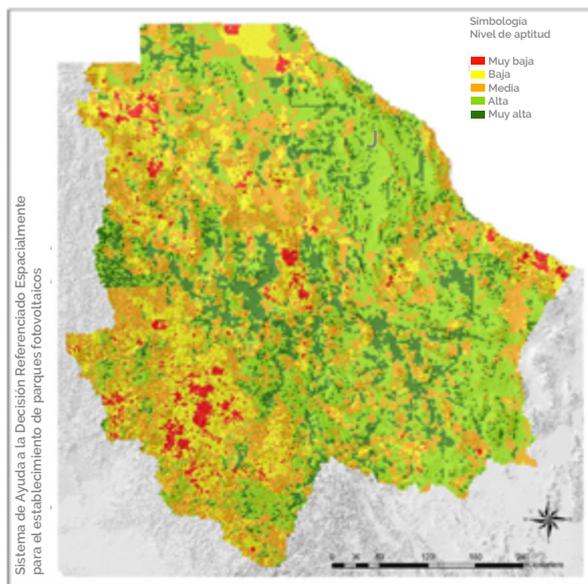
**Fuente:** Elaboración propia.

La infraestructura mostró un comportamiento predominantemente nulo en las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Esto último, debido a que la presencia de dicha infraestructura se muestra de forma dispersa en el estado de Chihuahua y su cobertura deja excluida a algunas zonas.

### Generación del Sistema de Ayuda a la Decisión Referenciado Espacialmente (SADRE) para el establecimiento de parques fotovoltaicos

El procesamiento de las variables dentro del algoritmo formulado nos da como resultado el sistema de ayuda a la decisión referenciado espacialmente para el establecimiento de parques fotovoltaicos. Los resultados se integran en un mapa que de manera visual proporciona a los tomadores de decisión una herramienta de fácil entendimiento.

Mapa 7. SADRE para el establecimiento de Parques Fotovoltaicos.



**Fuente:** Elaboración propia.

El SADRE nos muestra que el estado de Chihuahua dispone de las óptimas condiciones físicas, bióticas y sociales, a través de una simbología que va de verde con las zonas con alta aptitud a rojo con las de baja aptitud. Solo un 14.12% de su superficie muestra una aptitud muy alta y un 35.43% cumple casi en su totalidad con los criterios establecidos. Un 32.02% de las áreas del estado se encuentran en el punto medio de acatamiento de condiciones, mientras que el 15.17% y 3.27% se encuentran en un estatus de condiciones limitadas e inadecuadas para el establecimiento de parques fotovoltaicos.

### Interpretación de resultados

El objetivo del SADRE es brindar a los tomadores de decisión elementos de comprensión de la ubicación de las zonas de alta aptitud, las cuales se presenta en diecinueve municipios del estado de Chihuahua que cuentan con una aptitud alta y muy alta en al menos el 10% de su superficie. El porcentaje más alto se concentra en el municipio de Ahumada con el 67.36% de condiciones aptas. En la siguiente tabla se pueden

consultar cuáles municipios son los que presentan una mayor superficie apta y cuál es su porcentaje.

Tabla 4. Resultados de los 10 municipios con mayor superficie de aptitud.

Municipio	Porcentaje de superficie con aptitud alta y muy alta
Ahumada	67.36
Camargo	60.48
Coyame	53.78
Jiménez	44.60
Ascensión	39.38
Aldama	32.65
Guadalupe	26.41
Madera	24.57
Guadalupe y Calvo	21.83
Ojinaga	21.64
Chihuahua	20.98

**Fuente:** Elaboración propia.

En la siguiente tabla se presentan los 10 municipios más representativos en términos de superficie para cada uno de los niveles de aptitud.

Tabla 5. Municipios representativos en superficie de cada categoría de aptitud

Categoría de aptitud media		Categoría de aptitud baja		Categoría de aptitud nula	
Municipio	% de superficie con aptitud media	Municipio	% de superficie con aptitud baja	Municipio	% de superficie con aptitud nula
Ahumada	24.99	Guachochi	42.34	Guachochi	20.03
Buenaventura	51.58	Janos	34.01	Janos	10.62
Guadalupe y Calvo	42.02	Ascensión	15.49	Manuel Benavides	12.59

Continúa

Ascensión	29.75	Buenaven- tura	23.44	Chihuahua	7.45
Camargo	22.92	Guerrero	31.40	Batopilas	22.01
Madera	34.33	Bocoyna	55.04	Urique	13.52
Janos	39.20	Balleza	27.50	Bocoyna	14.99
Jiménez	25.66	Chihuahua	17.40	Casas Gran- des	10.51
Chihuahua	32.82	Guadalupe y calvo	15.12	Chínipas	15.19
Aldama	29.11	Casas Gran- des	35.13	Juárez	5.84

**Fuente:** Elaboración propia.

## Discusiones

La factibilidad del establecimiento de parques fotovoltaicos se analiza principalmente desde el punto de vista de la aptitud de acuerdo a la radiación solar. Siendo que en México es un país con una importante abundancia solar, con un promedio de radiación solar de 5kWh/m<sup>2</sup>/día (Sener, 2009), el presente trabajo se focaliza en proponer un SADRE que aporta otras variables que influyen en la factibilidad económica, técnica, social y legal diferenciándose de la mayoría de los trabajos en el tema. Este SADRE brinda una solución para los tomadores de decisión, que va más allá de conocer solo el potencial de la generación de energía, sino que considera todas las demás variables que intervienen durante el proceso que conlleva directamente a la selección del sitio en donde se realizará la inversión.

Los resultados del presente trabajo muestran que el estado de Chihuahua existe un potencial para la inversión por la gran superficie de zonas con un nivel de aptitud alto. Sin embargo, el sector de la energía solar en el mundo está por debajo de países como Alemania o Francia, que cuentan con las políticas para el desarrollo del sector. Por lo que es importante considerar que el comportamiento del mercado futuro y las tendencias de energía se proyectan en incremento; lo que conlleva a que tarde o temprano se deberá de aprender de la evolución de esta tecnología en otros países para evitar errores



(Mundo. 2014). La herramienta (SADRE) brinda un acceso a la información relevante para los decisores de los parques fotovoltaicos que puede ayudar en el impulso del establecimiento de estas tecnologías.

Este trabajo se integra como un punto de partida que promueve un análisis previo al establecimiento de los parques fotovoltaicos que previene pérdidas de recursos y facilita los procesos que conlleva el arranque de un proyecto, sirviendo como una herramienta de gran valor para los actores interesados en promover las energías renovables. Lo que representa una aportación para cubrir la necesidad de las instituciones del sector energético para mejorar el proceso burocrático.

### **Conclusiones generales**

A partir del Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial SADRE que este trabajo propone, se beneficia a los tomadores de decisiones al otorgarles un instrumento que facilitará el proceso de elección de sitio de establecimiento de los parques fotovoltaicos. Toda vez que, a través del modelo se podrán identificar las áreas focales de inversión, definiendo con una clara visualización la aptitud de la instalación de los parques fotovoltaicos. En lo referente al ordenamiento del territorio en base a las aptitudes y potencialidades del mismo. El Sistema de Ayuda a la Decisión a Referencia Espacial puede contribuir a delimitar las áreas con aptitud para este sector, evitando cambios de uso de suelo o invasiones en áreas protegidas. Este trabajo se focaliza en la factibilidad del desarrollo de los proyectos fotovoltaicos, sin embargo, es importante analizar otros efectos que implica para el territorio y la sociedad, así como algunas otras variables que incidan en el sector, como por ejemplo las modificaciones en el paisaje que la instalación de los parques representa.

Por otro lado, la aptitud que presenta el estado de Chihuahua para la producción de energía solar a través los parques fotovoltaicos es una potencialidad de inversión y de desarrollo del mercado; ya que cuenta con los requerimientos de cada una de las variables analizadas. En cuanto a las condiciones tanto de terreno y climáticas, aunado a esto, el identificar los lugares en donde se señalan con una aptitud alta indica que de establecerse un parque fotovoltaico estaría dentro del marco legal y los procesos de gestión serán menos complejos. Otra de las ventajas de este SADRE es que es una herramienta modulable que permite integrar tantas variables como sea necesario para



comprender los niveles de aptitud en función de criterios específicos de búsqueda de las características del terreno que al inversionista son atractivos. Sin embargo, el modelo se sujeta a la disponibilidad de la información y la escala o resolución a la que se obtiene; además existen factores en los que se requiere de otras herramientas para poder caracterizar de una manera más específica los sitios que resultaron con una alta aptitud y por lo tanto se requiere de verificaciones en campo.

## Referencias

- Charabi Y., Gastli A. (2011). PV Site Sustainability analysis using GIS-Based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy* 36 (2554-2561).
- Carrion J., Espin A., Aznar, Zamorano D., Rodríguez M, Ramos A. (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable Energy Reviews*; 12:2358-80.
- Heartsh, S. Smith, A. (2012). *Land use conflict mapping*. Paper presented at the Planning Institute of Australia.
- Hinojos-Mendoza. (2014). *Identificación des riesgos de perte de biodiversit e face aux pressions anthropiques et au changement climatique a l'horizon 2100*. Risk Management. Ecole nationale sup erieure des mines de Paris, 2014. French. <NNT : 2014ENMP0026>. <tel- 01123766>
- Jaramillo A., Martínez M., Tenorio J., Rio J. (2013). *Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más limpios en el tema de energía solar*. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Malczewski, J., (2011). *Spatial Decision Support and GIS Spatial Decision Support and GIS NCGIA*. Department of Geography, University of Western Ontario, Canada.
- Mundo, J., Alonso, B., Hernández J., 2014. An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Renewable and sustainable Energy Reviews*.31 (2014) 639-649.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007). *Diccionario de datos de Uso de Suelo y Vegetación*.
- Ozawa C. (1999). *Making the best use of technology* in L- Susskind S. Mckearnan, Thomas J. 2013. The consensus building handbook. Thousand Oaks CA: SAGE Publications Inc.
- SENER. (2009). *Perspectiva del sector eléctrico 2009-2024*. México.
- Stoplaki, E., Palyvos, J. (2008). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy* 34 (2009): 23-29.
- Vergara W., Alatorre C., Alves L., *Rethinking our energy future. A white paper in Renewable Energy for the 3GFLAC Regional Forum*. IDB Inter-American Development Bank.



## **PARTE II**

# **ENERGÍA RENOVABLE A PARTIR DE LA BIOMASA**



# Análisis del potencial de producción de bioenergía y reducción de emisión gases de efecto invernadero a partir de desechos agroindustriales en la Comarca Lagunera

*José Alberto Silva González,<sup>1</sup> Inty Omar Hernández De Lira,<sup>1</sup> Lilia Ernestina Montañez Hernández,<sup>1</sup> Antonio Rodríguez Martínez,<sup>2</sup> Miriam P. Luevanos Escareño,<sup>1</sup> y Nagamani Balagurusamy,<sup>1</sup>*

## Resumen

La Comarca Lagunera es una región al noreste de México con una desarrollada industria ganadera como una de las principales actividades económicas. Solo en la Comarca Lagunera hay alrededor de 750 000 cabezas repartidas en cerca de 300 establos. Esta alta densidad de productores es una fuente importante de ingresos y de problemas ambientales en términos de manejo de desechos orgánicos. Se estima que la Comarca Lagunera genera alrededor de 7 000 000 de toneladas de estiércol húmedo al año, que potencialmente liberarán metano equivalente a 50,946 Gg eq. de CO<sub>2</sub> contribuyendo significativamente al cambio climático. Una estrategia para reducir la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provenientes del manejo de estiércol, es la digestión anaerobia para la producción de biogás. El potencial de bioenergía en la Comarca Lagunera a partir de estiércol de ganado se estima en 4.61 GW/año que de aprovecharse podrían reducir significativamente las emisiones de GEI de la región. Además de la generación

1 Laboratorio de Biorremediación, Facultad de Ciencias Biológicas, Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Coahuila Carretera Torreón - Matamoros km 7.5 Torreón, Coahuila, México. C.P. 27000.

2 Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas Universidad Autónoma del Estado de Morelos Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa CP 62209, Cuernavaca, Morelos, México.



de energía renovable, la digestión anaerobia ofrece otro subproducto conocido como digestato el cual puede ser utilizado como fertilizante orgánico, reduciendo el uso de fertilizantes inorgánicos y las emisiones GEI asociadas. Al combinar la producción de biogás y recuperación de nutrientes, se puede lograr una producción sostenible de ganado y forrajes. Sin embargo, a la fecha esta práctica no ha alcanzado su máximo potencial debido a varios factores tales como; incorrecta operación de los biodigestores, altos costos de inversión y bajo precio de venta de la electricidad. En este trabajo se evalúa la producción potencial de energía renovable a partir de estiércol, la consiguiente reducción en las emisiones de GEI, además de los principales problemas que enfrenta la tecnología de los biodigestores en el contexto mexicano.

## Introducción

Las actividades relacionadas con la ganadería tienen un impacto significativo en el cambio climático y casi todos los aspectos del medio ambiente, incluidos el aire, suelo, agua y biodiversidad. Actualmente existe una creciente preocupación acerca de cómo manejar el incremento en la demanda de productos pecuarios, a la vez que se busca una huella ecológica baja sin perjudicar los beneficios económicos, sociales y culturales que proporciona la ganadería. México cuenta con un territorio de 1.96 000 000 km<sup>2</sup>, de los cuales 145 000 000 de ha se dedican a la actividad agrícola y pecuaria; 30 000 000 de hectáreas son consideradas tierras de cultivo y 115 000 000 de agostadero (Ordoñez, Hernández & Naranjo, 2013). Uno de los impactos más importante de las actividades ganaderas y uno de los que ha cobrado gran relevancia en la última década es el cambio climático cuyo principal indicador son las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) las cuales para México en 2010 se estimaron en 748 Gg de unidades equivalentes de dióxido de carbono (co<sub>2</sub> equivalente).

De este total de emisiones de GEI cerca del 12,3% corresponde al sector agrícola con un total de 89 129 Gg de co<sub>2</sub> equivalente. Del cual las emisiones de GEI para el sub sector ganadero para el mismo periodo ascienden a 44 072 Gg de co<sub>2</sub> equivalente, que representan 49,45% de las emisiones totales de Gases de efecto invernadero del sector agropecuario, estas emisiones de GEI provienen principalmente de tres fuentes, metano (CH<sub>4</sub>) proveniente de fermentación entérica estimado en 36 813 Gg de co<sub>2</sub> equivalente y metano proveniente 1105 Gg de co<sub>2</sub> equivalente por manejo del estiércol

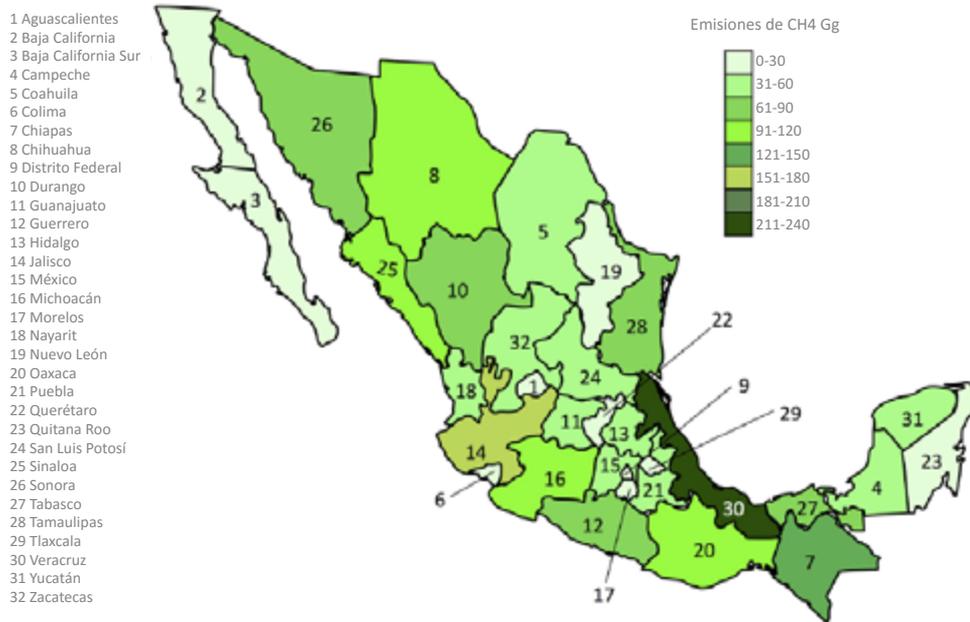


además de Óxido nitroso estimado en 6153 Gg de  $\text{CO}_2$  equivalente Derivado también del manejo de estiércol como se muestran en la siguiente figura (figura 2) (Ordoñez, Hernández & Naranjo, 2013). De esta manera, el estiércol generado en los sistemas de producción ganadera puede provocar impactos ambientales negativos si no existe un control en su almacenamiento, transporte y disposición final, debido tanto a la emisión de metano como óxido nitroso hacia la atmósfera como a la acumulación de micro y macro nutrientes en el suelo y en los cuerpos hídricos superficiales que pueden llevar a la eutroficación de los ecosistemas circundantes (Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, 2017). El óxido nitroso generado por el manejo de estiércol proviene principalmente de su descomposición en condiciones anaeróbicas, como las que se dan en las lagunas donde se dispone del estiércol tanto como en las pilas donde este se acumula en espera a su disposición final (Sommer, Petersen & Søgaard, 2000).

### **Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad Ganadera**

Las emisiones de metano relacionadas con actividades ganaderas proceden de dos fuentes principales: el sistema digestivo de los rumiantes también denominado fermentación entérica, que se define como el proceso a través del cual se produce metano en el rumen por arqueas metanogénicas en condiciones anaerobias, utilizando  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  y / o acetato para generar metano (Alvarado *et al.*, 2014). Las emisiones de metano provenientes de fermentación entérica ascienden a 36 813 Gg de  $\text{CO}_2$  equivalente, distribuidas de la siguiente manera en la República Mexicana (figura 3).

Figura 3.- Emisiones de metano por fermentación entérica en México.



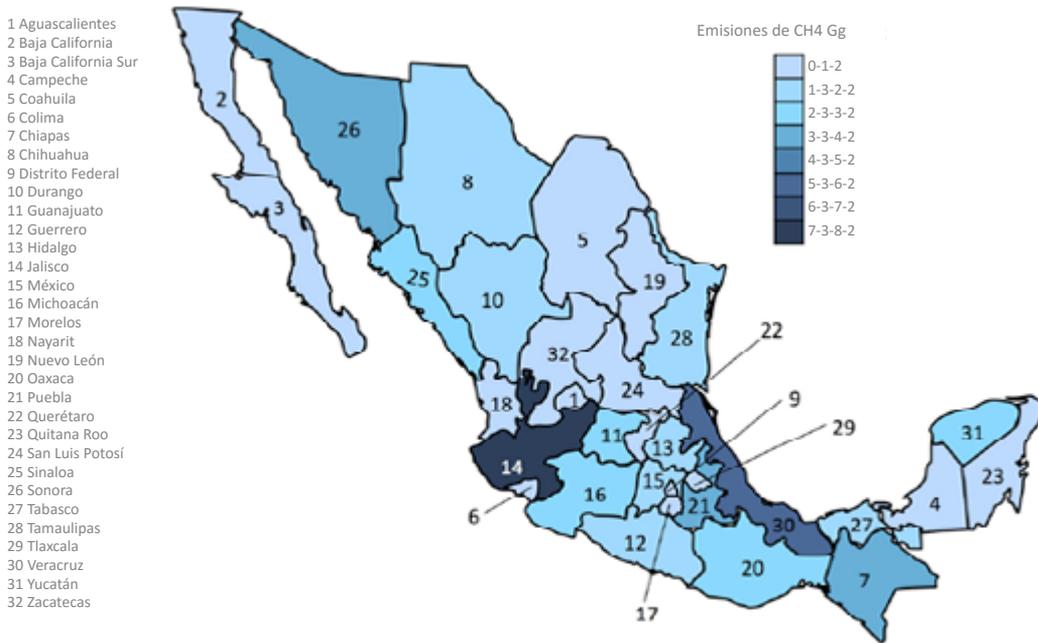
Fuente: Hernández-De Lira *et al.*, 2015.

La otra fuente principal de emisiones de metano provenientes del sector ganadero es el manejo del estiércol y la distribución de estas emisiones en el país se muestra en la siguiente figura (figura 4). Los principales factores que afectan a las emisiones de CH<sub>4</sub> por manejo de estiércol son la cantidad total de estiércol producido y la porción de este susceptible a descomponerse anaeróbicamente. El primero depende de la tasa de producción de residuos por animal y el número de animales, y el segundo en cómo se maneja el estiércol. Cuando el estiércol se almacena o trata como un líquido (por ejemplo, en lagunas, estanques, tanques o pozos), se descompone anaerobiamente y puede producir una cantidad significativa de CH<sub>4</sub> siendo la temperatura y el tiempo de retención hidráulico factores que afectan en gran medida la cantidad de metano producido. Cuando el estiércol se maneja como un sólido (por ejemplo, en pilas o montones) o cuando se deposita en pastizales, tiende para descomponerse en condiciones aerobias y se produce significativamente menos CH<sub>4</sub>. El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)



es otro GEI de importancia para el sector agrícola este se produce en forma natural en los suelos mediante los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación (Mariano, Leite, Megda, Torres y Trivelin, 2015). Algunas actividades agrícolas, como a) la aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados, b) la incorporación de excretas animales como abono y c) el cultivo de especies fijadoras de nitrógeno atmosférico, aportan nitrógeno a los suelos, aumentando la disponibilidad de este elemento para los procesos microbianos mencionados, lo que aumenta la cantidad de  $N_2O$  liberado hacia la atmósfera. Las emisiones de  $N_2O$  resultantes de los aportes antropogénicos de nitrógeno se producen por vía directa de los suelos a los que se incorpora este elemento; así como por dos vías indirectas: a) la volatilización y posterior deposición en el suelo de compuestos como  $NH_3$  y  $NO_x$  y b) a través de los procesos de lixiviación y escorrentía (IPCC, 1996). Las emisiones promedio de óxido nitroso generadas por estos procesos en el periodo 1990-2010 son 44 802 Gg de  $CO_2$  equivalente, que representan 99.4% del total de las emisiones de este gas para la subcategoría agrícola (45 056 Gg de  $CO_2$  equivalente). Estas emisiones de GEI pueden verse disminuidas si se utiliza el bioslurry de los biodigestores como fertilizante orgánico debido a su contenido de nitrógeno con el objetivo de alcanzar prácticas agrícolas sustentables (Ertem, Neubauer y Junne, 2016).

Figura 4.- Emisiones de metano por manejo de estiércol en México



Fuente: Hernández-De Lira *et al.*, 2015.

### Situación del sector ganadero en la Comarca Lagunera

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017) el sector agrícola contribuye con un 11.3% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. A la vez que esta actividad contribuye con un 2.5% (diez mil millones de pesos) para Coahuila de Zaragoza y 3.5% (quince mil millones de pesos) para Durango siendo estas las entidades federativas donde se ubica la Comarca Lagunera. La Comarca Lagunera se maneja un esquema de ganadería intensiva, característico de países industrializados debido a la alta tecnificación de estos sistemas predominante en el norte del país, donde además la Comarca Lagunera destaca como la principal cuenca lechera de la república. La producción ganadera intensiva característica de la región viene acompañada de una serie

de efectos ambientales, que incluyen altas emisiones de gases de efecto invernadero (Ilea, 2008), así como de material particulado (PM) y descargas de nutrientes a suelos y aguas superficiales (por ejemplo, nitrógeno, fósforo y metales pesados) (Melse, Ogink & Rulkens, 2009). De acuerdo con un censo realizado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA) en el 2016 (SAGARPA, 2018) la Comarca Lagunera cuenta con 284 establos con más de 100 cabezas de ganado y con 10 de más de 5000 siendo estos últimos los más importantes de la cuenca lechera norte del país. Cabe destacar que solo en la Comarca Lagunera cada año se cultivan 110 000 hectáreas de forrajes con una producción de poco más de 6 millones de toneladas. Un resumen del censo se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Establos Lecheros de la Comarca Lagunera y potencial de Bioenergía.

Rango de cabezas de ganado	Número de establos	Superficie Ocupada m <sup>2</sup>	Tipo de ordeña
100-500	82	20,000 – 50,000	Manual, Mecanizada
500-1,000	42	40,000 – 100,000	Mecanizada
1,000 – 5,000	150	100,000 -250,000	Mecanizada
5,000- 20,000	10	50,000 – 300,000	Mecanizada

Fuente: SAGARPA, 2018.

## Biogás como energía renovable en México y la Comarca Lagunera

En la actualidad, el sector energético se ha convertido en una pieza clave para el crecimiento económico de los países, debido a la estrecha relación que existe entre el Producto Interno Bruto (PIB) y la demanda energética de cada país (Yabe, 2013). El aumento del nivel de vida de la población ha generado un aumento persistente de la demanda de energía, que también se traduce en el impacto ambiental en forma de emisiones de GEI para satisfacer esta creciente demanda. En este contexto, el uso de energías renovables aparece como un elemento para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que se incrementa el suministro de energía sin dañar el medio ambiente. La electricidad procedente del biogás tiene algunas ventajas sobre



otras fuentes de energía, tales como; compatibilidad con la infraestructura pre-existente de gas natural y almacenamiento en forma de combustible en contraste con otras fuentes como la energía solar o eólica para los que no se han desarrollado sistemas de almacenamiento eficientes (Park, Pandey, Tyagi & Tyagi, 2014). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, la producción de energía a partir de fuentes renovables en México corresponde aproximadamente al 8.5% de la producción primaria de energía en el país. La misma agencia (IEA) establece que el potencial total de generación de biogas en México es de 1600 Gw/h de los cuales únicamente 410 Gw/h corresponden al potencial a partir de estiércol bovino ("IEA - Report", 2018)

En los últimos años, México ha implementado varias reformas en sus leyes para promover el uso de energías renovables, tales como la Ley de Uso de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). El objetivo de estas leyes es que el sector energético limite para el 2024 la producción de energía de los combustibles fósiles a un máximo del 65% y el resto el 35% de la generación de electricidad debe provenir de fuentes de energía renovables. En consecuencia, el biogás como energía renovable cobra gran importancia debido a que al implementar esta tecnología se contribuye a la seguridad energética a la vez que se disminuye de manera significativa el impacto ambiental del sector agrícola, específicamente del subsector ganadero (Ware & Power, 2016). Sin embargo, el marco legal de la Reforma Energética solo se permite la comercialización de electricidad a los productores por encima de 2 Mw/h dejando a los pequeños productores de menos de 5000 cabezas de ganado solo con la opción de autoconsumo sin la posibilidad de comercializar su excedente de producción eléctrica con la red general de CFE. De acuerdo con un censo a los establos de la Comarca Lagunera realizado en 2016 se determinó que la región cuenta solo con 10 establos con más de 5000 cabezas de ganado los cuales tienen un potencial de generación de electricidad a partir de biogás mayor a 2 Mw/h, el potencial de bioenergía y reducción en emisiones de GEI se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.- Potencial de bioenergía y reducción de GEI para los rangos de cabezas de ganado en la Comarca Lagunera.

Rango de cabezas de ganado	Producción potencial de metano m <sup>3</sup> /año	Potencial en Tera Joules TJ	Potencial de generación eléctrico Kw/h	Potencial reducción de GEI Gg CO <sub>2</sub> eq.
100-500	1,900 – 9,500	0.04 - 0.2	100 - 200	0.003 - 0.015
500-1,000	9,500 – 19,000	0.2 – 0.4	200 - 400	0.015 – 0.031
1,000 – 5,000	19,000 – 94,000	0.4 – 1.9	400 – 2,000	0.031- 0.15
5,000- 20,000	19,000 – 38,000	1.9 – 7.6	2,000 -10,000	0.15 – 0.61

Fuente: SAGARPA, 2018, De Lira *et al.*, 2015.

La producción de bioenergía a partir de biogás en México surge como una estrategia efectiva para combatir el cambio climático. Este potencial de generación eléctrica a partir de metano producto de la digestión anaeróbica de estiércol de ganado en México es de aproximadamente 410 GWh / año, lo que equivale al 34% de la generación actual de energía producida a partir de biomasa y el 250% de la producción de energía de Biogás (Hernández-De Lira *et al.*, 2015; IEA, 2017; Secretaría de Energía, 2017.). En comparación entre los países miembros de la OCDE, el biogás ocupa el tercer lugar dentro de las fuentes renovables de mayor crecimiento para la generación de electricidad. Este pasó de 13.1 TWh en 2000 a 47.6 TWh en 2011, con una tasa de crecimiento medio anual del 13% (Energy Balances of OECD Countries 2012, 2012). Se estima que en 2010 la producción de biogás en el mundo fue de 1025 PJ de energía, con un crecimiento anual de 13.5% (World Energy Outlook, 2010). Para Emisiones de GEI provenientes de Ganadería y Manejo de Estiércol el potencial de reducción en las emisiones de GEI para México (tabla 3) es de 1307 Gg de CO<sub>2</sub> equivalentes (Hernández-De Lira *et al.*, 2015), al utilizar el estiércol vacuno para la producción de biogás y de 50 946 Gg de CO<sub>2</sub> (Muñoz-Jiménez *et al.*, 2012) para a Comarca Lagunera y esta reducción en las emisiones de GEI viene también acompañada de una potencial producción de energía eléctrica de 410 GWh/año a nivel México (Hernández-De Lira *et al.*, 2015) y de 4.61 GWh/año para la Comarca Lagunera (Muñoz-Jiménez *et al.*, 2012).

Tabla 3.- Potencial de la Generación de Energía a partir de Biogás en México y la Comarca Lagunera.

	Potencial de generación eléctrico Giga watts/año	Producción potencial de metano m <sup>3</sup> /año	Potencial de bioenergía en Tera Joules TJ	Potencial reducción de gg CO <sub>2</sub> eq.
Mexico	410.00	620,000,000	13,400	1307.00
Comarca Lagunera	4.61	14,000,000	334	50.946

Fuente: De Lira *et al.*, 2015.

### Implementación de Biodigestores en La Comarca Lagunera

La tecnología de los biodigestores no es nueva en la Comarca Lagunera, se estima que el 10% de los establos cuentan con un biodigestor (El Siglo de Torreón, 2017). Sin embargo, la poca de financiación y la falta de subsidios a energías renovables han sido el principal obstáculo que enfrenta esta tecnología (Engelk *et al.*, 2016). En adición, esta poca penetración de los sistemas de digestión anaerobia como generadores de energía renovable puede explicarse debido a que la mayoría de estos sistemas se basan únicamente en los beneficios de la venta de la electricidad generada por lo que compiten directamente con la energía producida a partir de combustibles fósiles. Debido a estos factores en general los sistemas de energías renovables se encuentran en gran desventaja contra los sistemas de generación eléctrica basados en combustibles fósiles debido al relativo bajo precio de estos últimos (Mittal, Ahlgren & Shukla, 2018). Estos factores traen como principal consecuencia que los sistemas de energías renovables se vuelvan altamente dependientes de subsidios gubernamentales para ser económicamente viables (Gutiérrez, Xia y Murphy, 2016).

Una vez puestos en marcha los proyectos de energías renovables como biogás aun enfrentan retos particulares que pueden mermar su eficiencia. En general una ejecución incorrecta de los parámetros operacionales de un biodigestor es la principal causa su mal funcionamiento. Entre los principales factores que determinan el correcto funcionamiento de un biodigestor anaerobio se encuentran; un porcentaje mínimo estiércol de ganado como sustrato, tiempo adecuado de retención, fugas en la membrana del digestor y una alimentación de sustrato con un balance correcto de



carbono/nitrógeno (Zhang, Su, Baeyens & Tan, 2014). Estos factores podrían explicar porque algunos de los biodigestores instalados en la Comarca Lagunera no operan adecuadamente mostrando ausencia total de biogás en el caso de los digestores no operativos o biogás con un porcentaje muy bajo de metano en el caso de aquellos que no producen energía eléctrica. Además, la correcta operación de los biodigestores es de vital importancia debido a que los mismos pueden convertirse en un punto de emisión de GEI variando desde un 5% a un 10% de la producción total de biogás como emisiones fugitivas (Flesch, Desjardins & Worth, 2011).

Entre los Biodigestores de la Comarca Lagunera destaca el Mega Biodigestor construido en 2015 ubicado en La Popular, Gómez Palacio Durango, este digestor está construido sobre una superficie de 4 hectáreas y se compone por un total de 14 biodigestores interconectados los cuales tienen una capacidad de 1500 metros cúbicos, cada uno, con los cuales se pretende procesar las excretas de 20 000 vacas lecheras proveniente de dos establos cercanos, esto con la intención de producir biogás con 60% de metano para generar electricidad a través de un sistema centralizado de generación eléctrica con generador de 2 mega watts/h.

### **Producción de biogás: estrategias para la viabilidad económica a largo y corto plazo**

El sector agrícola de La Comarca Lagunera puede resultar especialmente beneficiado de la aplicación del concepto de economía circular, la cual es una alternativa sostenible a la economía lineal tradicional donde los recursos se fabrican, usan y luego se eliminan (Lieder & Rashid, 2016). Esto debido a la cercanía geográfica de la producción ganadera y agrícola de forrajes permite a ambas beneficiarse de los productos de la digestión anaerobia tales como; energía renovable apta para autoconsumo y fertilizante orgánico. De esta manera se contribuye a mantener los recursos en la cadena de producción el mayor tiempo posible mediante su recuperación o transformación en diferentes productos o materiales para ser utilizados en pasos de producción subsecuentes (Winkler, 2011). El impacto a largo plazo del concepto de economía circular en la producción pecuaria resulta especialmente positivo al integrar la energía producida a partir de biogás al consumo local, a su uso en vehículos de granja o de transporte público e industrial, así como también suministrando electricidad a granjas, hogares e industrias locales (Winkler, 2011). A su vez, el digestato se puede utilizar como fertilizante en la producción



de cultivos y forraje, cerrando el ciclo de economía circular (Tampio *et al.*, 2017). Por otro lado, las subvenciones a la producción de energía a partir de fuentes renovables como estrategia corto plazo para lograr la viabilidad económica han dado buenos resultados en países europeos tales como Dinamarca y Alemania (Ahlberg *et al.*, 2017). A corto plazo la estrategia más efectiva para promover la penetración de la producción de biogás en el sector agrícola son las políticas de subsidios y apoyos gubernamentales. Países como Bangladesh y Suiza manejan programas para subsidiar la instalación de plantas de biogás en comunidades rurales con capacidad inferior a 200 Kw/h por 50% y 30% respectivamente sobre el costo de construcción e instalación. (Yasar *et al.*, 2017, Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2017). Es también reportado que estos tipos de subvenciones aplicadas por Kw/h de al menos energía renovable producida mejoran considerablemente la competencia de los productores de energía renovable con los de fuentes fósiles al cerrar la brecha de precios (Bartoli, *et al.*, 2016). Recientemente Gutiérrez (2015) calculo que en el contexto mexicano es necesario un subsidio de al menos .45 USD por m<sup>3</sup> de biogás para alcanzar la viabilidad económica. Otro enfoque para los subsidios es el propuesto por Jensen (2017) donde se incentiva la purificación del biogás para convertirlo en biometano el cual puede utilizarse en motores a gas sin modificaciones.

## Conclusión

El potencial para la producción de energía renovable y su consecuente reducción en las emisiones de GEI provenientes de manejo de estiércol y producción eléctrica en conjunto con la aplicación de un esquema de economía circular hacen de la Comarca Lagunera una región con gran potencial para desarrollar una industria ganadera sustentable. La Comarca Lagunera es un área de gran relevancia al ser pionera en la implementación de proyectos de biogás a gran escala tales como el mega-digestor de La Popular Durango. Sin embargo, la tecnología de digestión anaerobia ha mostrado un éxito reducido en contexto de la Comarca Lagunera previa introducción de la reforma energética debido a obstáculos tales como la falta de financiamiento para la infraestructura necesaria o de subsidios en la generación de energía renovable. En adición una de las principales barreras que enfrenta el biogás como una energía alternativa es la competencia contra tecnologías tradicionales de generación de energía eléctrica tales como el carbón, petróleo y gas natural. En adición los proyectos de ingeniería de energías renovables



enfrentan retos propios de tecnologías emergentes como una pobre planeación y diseño, resultando en proyectos que funcionan a una fracción de su máximo potencial lo que a corto plazo limita el crecimiento de las energías renovables en el sector energético y a largo plazo dirigen la inversión a proyectos de energías fósiles.

## Referencias

- Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L., & Schnürer, A. (2017). Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass And Bioenergy*, 97, 27-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.002>
- Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L., & Schnürer, A. (2017). Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass And Bioenergy*, 97, 27-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.002>
- Alvarado, A., Montañez-Hernández, L., Palacio-Molina, S., Oropeza-Navarro, R., Luevanos-Escareño, M., & Balagurusamy, N. (2014). Microbial trophic interactions and mcrA gene expression in monitoring of anaerobic digesters. *Frontiers In Microbiology*, 5. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2014.00597>
- Bartoli, A., Cavicchioli, D., Kremmydas, D., Rozakis, S., & Olper, A. (2016). The impact of different energy policy options on feedstock price and land demand for maize silage: The case of biogas in Lombardy. *Energy Policy*, 96, 351-363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.018>
- Bruinsma, J. (2003). *World agriculture: towards 2015/2030 - an FAO perspective*. London, U.K.: Earthscan.
- Chiumenti, A., da Borso, F., & Limina, S. (2017). Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation. *Waste Management*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.046>
- Commodities: Latest Crude Oil Price & Chart. (2017). NASDAQ.COM. Retrieved 27 September 2017, from <http://www.nasdaq.com/markets/crude-oil.aspx>
- El Siglo de Torreón. (2017). Se estanca desarrollo de los biodigestores. Retrieved from <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1356289.se-estanca-desarrollo-de-los-biodigestores.html>
- Energy Balances of oecd Countries 2012. (2012). *Energy Balances Of oecd Countries*. [http://dx.doi.org/10.1787/energy\\_bal\\_oecd-2012-en](http://dx.doi.org/10.1787/energy_bal_oecd-2012-en)
- Engelken, M., Römer, B., Drescher, M., Welpé, I., & Picot, A. (2016). Comparing drivers, barriers, and opportunities of business models for renewable energies: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 60, 795-809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.163>
- Ertem, F., Neubauer, P., & Junne, S. (2016). Environmental life cycle assessment of biogas production from marine macroalgal feedstock for the substitution of energy

- crops. *Journal Of Cleaner Production*, 140, 977-985. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.041>
- Flesch, T., Desjardins, R., & Worth, D. (2011). Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. *Biomass And Bioenergy*, 35(9), 3927-3935. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.009>
- Grupo Milenio. (2015). La Laguna tiene el biodigestor más grande de América Latina. Retrieved from [http://www.milenio.com/negocios/Carlos\\_Fernandez\\_Gomez-biodigestor\\_mas\\_grande\\_de\\_America\\_Latina-Realidad\\_Energetica\\_15\\_630686926.html](http://www.milenio.com/negocios/Carlos_Fernandez_Gomez-biodigestor_mas_grande_de_America_Latina-Realidad_Energetica_15_630686926.html)
- Gutierrez, E., Día, A., & Murphy, J. (2016). Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico?. *Renewable Energy*, 95, 22-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.096>
- Hernandez-De Lira, I., Huber, D., Espinosa-Solares, T., & Balagurusamy, N. (2015). Methane emission and bioenergy potential from livestock manures in Mexico. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, 7(5), 053117. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4934564>
- IEA - Report. (2017). [iea.org](http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?product=Indicators&country=MEXICO). Retrieved 22 September 2017, from <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?product=Indicators&country=MEXICO>
- IEA - Report. (2018). [iea.org](http://www.iea.org). Retrieved 19 April 2018, from <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2015&country=mexico&product=RenewablesandWaste>
- Ilea, R. (2008). Intensive Livestock Farming: Global Trends, Increased Environmental Concerns, and Ethical Solutions. *Journal Of Agricultural And Environmental Ethics*, 22(2), 153-167. <http://dx.doi.org/10.1007/s10806-008-9136-3>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx). Retrieved 15 September 2017, from <http://www.inegi.org.mx/>
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programmed, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan
- Jensen, I., Münster, M., & Pisinger, D. (2017). Optimizing the supply chain of biomass and biogas for a single plant considering mass and energy losses. *European Journal Of Operational Research*, 262(2), 744-758. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.071>
- SAGARPA. (2017). La Comarca Lagunera, primer lugar en producción de leche, carne de ave y forrajes:Sagarpa. Retrieved 29 September 2017, from <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/regionlagunera/boletines/Paginas/2016B071.aspx>
- Mariano, E., Leite, J., Megda, M., Torres-Dorante, L., & Trivelin, P. (2015). Influence of Nitrogen Form Supply on Soil Mineral Nitrogen Dynamics, Nitrogen Uptake, and Productivity of Sugarcane. *Agronomy Journal*, 107(2), 641. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj14.0422>

- Melse, R., Ogink, N., & Rulkens, W. (2009). Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers. *Biosystems Engineering*, 104(3), 289-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.07.009>
- Mittal, S., Ahlgren, E., & Shukla, P. (2018). Barriers to biogas dissemination in India: A review. *Energy Policy*, 112, 361-370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.027>
- Muñoz-Jiménez, I., Hernández-De Lira, I.O., Montañez-Hernández, L.E. & Balagurusamy, N. 2014. Chapter 1.9, Evaluation of methane emissions and bioenergetic potential in Comarca Lagunera of Northern of Mexico. In: *Environmental Biotechnology and Engineering*. Poggi-Varaldo, H.M.; Bretón-Deval, L.M.; Camacho-Pérez, B.; Escamilla-Alvarado, C.; Escobedo-Acuña, G.; Hernández-Flores, G.; Muñoz-Páez, K.M.; Romero-Cedillo, L.; Sastre-Conde, I.; Macarie, H.; Solorza-Feria, O.; Ríos-Leal, E.; Esparza-García, F. (Eds). Cinvestav, Mexico D.F., Mexico. Vol. 1, pp. 78-83. (ISBN Vol. 1: 978-607- 9023-28-7).
- National Energy Board. (2017). National Energy Board of Canada. Retrieved 27 September 2017, from <https://apps.neb-one.gc.ca/Conversion/conversion-tables.aspx?GoctemplateCulture=en-ca#s1ss1>
- Ordoñez, J., Hernández, T., & Naranjo, A. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (1st ed.)*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Park, S., Pandey, A., Tyagi, V., & Tyagi, S. (2014). Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 30, 105-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.011>
- Publishing, O., & Agency, I. (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación | Gobierno | gob.mx. (2018). Gob.mx. Retrieved 19 April 2018, from <https://www.gob.mx/sagarpa>
- Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx. (2017). Gob.mx. Retrieved 22 September 2017, from <https://www.gob.mx/sener>
- Shahriari, H., Warith, M., Hamoda, M., & Kennedy, K. (2012). Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*, 32(3), 400-403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.022>
- Sigurnjak, I., Vaneekhaute, C., Michels, E., Ryckaert, B., Ghekiere, G., Tack, F., & Meers, E. (2017). Fertilizer performance of liquid fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. *Science of the Total Environment*, 599-600, 1885-1894. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.120>
- Sommer, S., Petersen, S., & Søgaard, H. (2000). Greenhouse Gas Emission from Stored Li-



vestock Slurry. *Journal Of Environment Quality*, 29(3), 744. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030009x>

- Ware, A., & Power, N. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, 97, 541-549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.068>
- Yabe, N., 2013. Environmental and economic evaluations of centralized biogas plants running on cow manure in Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy* 49, 143-151.
- Yasar, A., Nazir, S., Rasheed, R., Tabinda, A., & Nazar, M. (2017). Economic review of different designs of biogas plants at household level in Pakistan. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 74, 221-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.128>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>



# Potencial de la biomasa de pencas de agave para la producción de biogás

*Gilberto Iñiguez Covarrubias,<sup>1</sup> José de Jesús Bernal Casillas,<sup>2</sup> Walter Ramírez Meda,<sup>2</sup> Lisaura Maldonado Pereira<sup>3</sup> y David B. Hodge.<sup>3</sup>*

## Resumen

En este estudio se presenta el potencial de las hojas de agave para generar biogás partiendo del contenido de azúcares totales (limitado a sacarosa, glucosa y fructosa) encontrados en el jugo y el bagazo de las hojas. Los análisis y cálculos muestran que pueden generarse en promedio 569.14L metano (stp) por cada 100kg de hojas de agave por medio de la biodegradación anaeróbica de los azúcares.

## Antecedentes

La dependencia de combustibles fósiles es un desafío clave para la economía de México, por lo que es necesario incrementar la captación de las energías renovables para que cumpla con sus aspiraciones de cambio climático. En el aprovechamiento de las pencas de agave promueve la producción de combustibles renovables de biomasa que no provenga de alimentos para consumo humano o animal, evitando así las ligas que no se quieren entre el valor del combustible y el precio de los alimentos. Además,

- 1 Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad de Guadalajara.
- 2 Departamento de Ingeniería de Proyectos. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad de Guadalajara.
- 3 Department of Chemical Engineering and Materials Science, Michigan State University, East Lansing, Michigan, United States.



por el uso de un producto de desecho de un cultivo ya existente de una planta nativa, no causará cambios en el uso del suelo que pueda afectar el hábitat o la biodiversidad; no se promoverá el uso extra de fertilizantes ni de agroquímicos y no se alentará la competencia por la producción de alimentos por el uso del agua u otros recursos.

El *Agave tequilana* Weber variedad azul se cultiva ampliamente en México en las zonas de denominación de origen (en Jalisco, Michoacán, Nayarit, Guanajuato y Tamaulipas) para la producción de tequila. En tiempos de cosecha de las plantas de agave, se recolectan las "cabezas o piñas" y se llevan a las fábricas para la producción de tequila. Al levantar las "cabezas o piñas" se quedan en los campos agaveros más de 500 000 toneladas de biomasa por año en forma de hojas o pencas sin aprovechamiento alguno.

Actualmente, el estado de Jalisco produce cerca del 90% del tequila que se produce en México y está concentrado en las regiones de Amatitán, Arandas, Atotonilco, El Arenal, Tepatitlán y Tequila. Aproximadamente. El 8% de la producción nacional de tequila proviene de los municipios del sur de Jalisco (principalmente Ixtlahuacán del Río, Jocotepec, Tlajomulco, Tonaya y Venustiano Carranza); y el porcentaje remanente proviene de los estados de Tamaulipas y Guanajuato, que pueden elaborar la bebida de acuerdo a la Denominación de Origen Tequila (Consejo Regulador del Tequila, 2017b).

En los últimos siete años (2010-2016) la producción de tequila (100% agave y mixto) se ha reflejado en la industrialización de cabezas de *Agave tequilana* Weber, ubicándose en un rango de 1015.1 a 756.9 y con 881.4 miles de toneladas por año como promedio (Consejo Regulador del Tequila, 2017a). Si se considera que esta cantidad promedio corresponde al 57.7% del total de la biomasa de la planta y el 42.3% a pencas y trozos de la limpieza de las cabezas, entonces, se estima que 646.1 miles de toneladas de biomasa se quedan en los terrenos de cultivo sin ningún aprovechamiento ni utilidad después de la jima. Un estimado indica que se generan 0.8 kg de bagazo de agave por cada litro de tequila producido (Ramírez Cortina, 2011).

En general, se puede mencionar tres formas de usar la biomasa como fuente de energía: el proceso de combustión para producir calor y electricidad; la producción de biogás; y la conversión a combustibles líquidos como etanol, butanol y metanol. Con estas tres perspectivas de uso se genera una competencia por el uso de las hojas y bagazo de agave disponibles. La biomasa generada por los residuos de la industria agropecuaria, incluidos los residuos generados en la jima del agave, puede aprovecharse para ser usada como fuente de energía con la aplicación del proceso y la tecnología apropiadas.



Una de estas formas es la digestión anaeróbica de la biomasa, que sufre varias reacciones bioquímicas que producen biogás, el cual está constituido principalmente por metano, entre un 55% a 70%, y dióxido de carbono, entre un 30% a 45% (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011). El biogás puede ser usado como combustible y/o para producir electricidad. La degradación anaerobia usada como método de tratamiento reduce la cantidad de materia contaminante, y al mismo tiempo produce energía. Si se consideran como principales azúcares contenidos en las pencas de agave: sacarosa, glucosa y fructosa (principales compuestos biodegradables), se puede estimar la cantidad de biogás que esta biomasa puede generar por estos azúcares.

En los últimos 19 años un promedio 701 000 toneladas de cabezas de agave se cosecharon por año para la producción de tequila de un total de biomasa de 1 215 000 toneladas/año, para dejar en el campo 514 000 toneladas/año de pencas de agave para ser utilizadas como fuente de biocombustibles o bioenergía (Íñiguez, *et al.*, 2014; Íñiguez, *et al.*, 2001). Datos experimentales sugieren que esta cantidad de biomasa debería contener 216 000 toneladas de azúcares extraíbles, capaces de fermentar 165 000 toneladas de bioetanol (Núñez, *et al.*, 2010). Esto es comparable a la producción total actual de bioetanol en México. Un productor promedio de agave con aproximadamente 250 toneladas/año de desperdicio de pencas de agave, podría producir 80 toneladas/año de bioetanol con un margen estimado de operación de 35 000 dólares representando un retorno del 15% para un costo de capital anticipado de la planta de 100 000 dólares. La estrategia de multicomcombustibles en este proyecto también permitiría a la biomasa de pencas de agave ser utilizada para el biobutanol, diésel renovable o combustible para *jets*.

Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento de la biomasa está dirigido principalmente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a los esfuerzos de México por alcanzar las metas de emisiones en su Ley General de Cambio Climático (LGCC) de 2012 y su *Intended Nationally Determined Contributions* (INDC) a la Vigésima primera Conferencia de las Partes (COP21). Localmente el enfoque a la producción de biocombustibles con las pencas de agave no presentará presiones adicionales en el uso del suelo, deforestación o biodiversidad, suministro de agua, uso de fertilizantes o agroquímicos, ya que se utiliza material de desecho de un cultivo nativo que ya está en actividad agrícola. Es también importante que las estrategias de combustibles renovables en México sean localmente apropiadas y representen mejores prácticas actuales mediante:

- (a) contribución al bienestar económico regional y nacional,
- (b) no impacte indebidamente en el aire, agua o calidad del suelo,
- (c) que actualmente reduzca las emisiones netas de gases efecto invernadero,
- (d) no requiera de grandes subsidios,
- (e) no compita con la producción de alimentos o adversamente afecte sus mercados,
- (f) no tenga efectos en la biodiversidad y no contribuya a la deforestación,
- (g) no implique uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas que dañen los ecosistemas,
- (h) no degrade o extinga recursos naturales esenciales como el agua o los suelos fértiles.

En la industria del tequila el proceso de combustión de los residuos agroindustriales se ha usado en las fábricas principalmente como combustible, quemándose en generadores de vapor cómo sustituto del petróleo, o en combinación con otros residuos de madera como astillas, ramas, aserrín. La historia del uso del metano ha tenido altas y bajas alrededor del mundo. Los precios del petróleo han contribuido en que el metano no tenga una aplicación constante en la civilización. En la actualidad, el metano principalmente generado como biogás, se usa como una fuente de combustible a nivel industrial y doméstico en algunos países como fuente energética renovable alternativa al carbón y al petróleo. Los residuos de animales y vegetales (biomasa) en área agrícola contribuyen a tener varias alternativas para convertirla en energía. La tecnología anaeróbica para generar a biogás ayuda a disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante estabilizándola (bioabonos) y para producir energía a partir del biogás (PNUD, 2011).

La alternativa de usar la biomasa como materia prima para convertirla en etanol no es considerada como opción en las fábricas de tequila, pero como lo muestra un análisis económico realizado por Escamilla-Treviño (2011) sobre la producción de etanol bajo las prácticas actuales de la industria del tequila, el uso de las cabezas para producir biocombustibles implica un costo muy elevado y por lo tanto no rentable. Pero la conversión de biomasa de hojas y bagazo del agave a etanol hacen económicamente



viable y competitivo su uso como materia prima. De acuerdo al trabajo de Rijal, *et al.* (2016), realizado sobre la conversión de las hojas de agave a bioetanol, el porcentaje de conversión de glucosa a etanol fue de 68% y 61% para el bagazo y jugo de las hojas de agave. La fermentación se efectuó eficientemente con *Sacharomyces cerevisiae* sobre el bagazo crudo de agave y el jugo hidrolizado teniendo una producción de hasta 38.6 g/L y 12.4 g/L, respectivamente.

Los principales problemas con la conversión de biomasa lignocelulósica a etanol es el pretratamiento e hidrólisis enzimática de esta materia. Además, es importante considerar que el proceso de destilación para producir etanol anhidro o hidratado es una operación unitaria que consume mucha energía, y se le atribuye entre el 45% y 50% de todo el calor generado en la combustión (Zumalacárregui-De Cárdenas, 2015).

Todos los procesos que involucran microorganismos son sensibles a los cambios que ocurren en su medio ambiente, incluidos los metanogénicos. Una forma de medir el desempeño de un proceso anaerobio es a través de la relación de producción de metano ya que este paso es limitante en el proceso total. Los principales factores que deben monitorearse y controlarse son: la temperatura, el origen de la materia orgánica a degradar, nutrientes básicos y algunos metales en concentraciones bajas, pH, toxicidad del medio y las condiciones de óxido-reducción.

De acuerdo con Akowuah, *et al.* (2012), la materia volátil es la parte de la biomasa que es liberada como gases volátiles cuando es calentada de 400°C a 500°C. La biomasa generalmente tiene un alto contenido de materia volátil y bajo contenido de carbón. El alto contenido de materia volátil en la biomasa indica que, durante la combustión, gran parte de ella se volatiliza y se quema como gas en los hornos. Por otro lado, el contenido de carbón fijo de la relación carbón/biomasa, no se descompone fácilmente o su combustión ocurre a bajas temperaturas (>200°C). El carbón fijo da un estimado *grosso modo* del valor de calentamiento de un combustible y actúa como el principal generador de calor durante la quema. En la tabla 1, Íñiguez, *et al.* (2014) determinaron las principales propiedades de las hojas de agave como combustible.

Tabla 1. Propiedades combustibles de las hojas de agave.

	Materia seca (%)	Valor calorífico estimado (MJ/kg)	Materia volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbón orgánico (%)	Carbono fijo (%)
Hojas de agave	25	13.52	79.0	9.2	53.1	11.8

Fuente: Íñiguez, *et al.*, 2014.

La materia orgánica de origen vegetal, como las pencas de agave, y alto contenido de lignina no pueden aprovecharse directamente y deben someterse a tratamientos previos con el fin de extraer las sustancias factibles de biodegradación, como puede ser cortado, macerado, compostaje, u otros. Para este trabajo la extracción previa de los azúcares de la penca de agave es esencial para la experimentación. Hernández-Meléndez *et al.* (2016) han reportado los siguientes valores estadísticos promedio de algunos parámetros para bagazo de agave azul: 6.5% de humedad, 93.5% de materia seca, 9.63% de lípidos y proteínas, 7.6% de nitrógeno Kjeldahl y 5.6% de proteína Bradford. Las muestras fibrosas reportadas por los autores tuvieron un contenido promedio de celulosa del 40%, excepto para el bagazo crudo cuyo contenido fue de 32%. Los resultados obtenidos son similares a los reportados para bagazo por Ramírez Cortina C.R. (2011): 42% de celulosa, 14% de lignina, 18.5% de hemicelulosas, 2.6% de nitrógeno total, 0.8% de pectinas, 0.8% de grasas y aceites, 5% de azúcares reductores totales y 6.2% de cenizas.

El *Agave tequilana* es una especie que se selecciona para producir un alto contenido de azúcares. La cabeza de la planta contiene mayor contenido de azúcar que las hojas o pencas, y a su vez, el contenido de azúcar en las hojas disminuye a partir del de la base a la punta. Esta es la principal razón por la que la industria del tequila usa las cabezas para la producción y deja las hojas como residuos (Escamilla-Treviño, 2011).

## Objetivo

El objetivo general de este trabajo es estimar la producción potencial de biogás a partir de la biomasa de pencas de Agave Tequilana Weber y su concentración de azúcares, que quedan en el campo después de la jima de las plantas de agave. Para esta investigación

solo se consideran las hojas completas de agave y los azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa) como principales compuestos generadores de biogás.

Este análisis no contempla la hidrólisis de la inulina en azúcares reductores, por lo que el término azúcares se restringe en este documento a sacarosa, glucosa y fructosa.

## Método y Materiales

El análisis de azúcares solubles en agua se realizó a una muestra seca de 20g de bagazo de pencas de agave, dejándola reposar en 500mL de agua destilada a 80°C por 5 min. Después de dejar enfriar a temperatura ambiente, al extracto se le analizó glucosa, fructosa y sacarosa por *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) con Detector de índice de refracción (National Renewable Energy Laboratory, 2008). De forma análoga, se extrajo jugo de las hojas de agave para cuantificar la concentración de azúcares en el líquido por HPLC.

El contenido de humedad en el bagazo se determinó por el método gravimétrico, por diferencia de pesos de la muestra antes y después de secada en horno a 105°C.

La estimación del biogás producido por el bagazo se calculó por medio de la Demanda Teórica de Oxígeno (DTeo) equivalente del metano y con este factor cuantificar el biogás teórico generado por los azúcares del bagazo de las pencas. Este método considera que la materia orgánica de origen animal o vegetal es principalmente una combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno que en condiciones específicas puede degradarse biológicamente. Si se conoce la fórmula química de la materia orgánica puede calcularse una DTeo tomando como válidas las siguientes suposiciones:

- a) en una primera fase de descomposición los átomos de carbono se oxidan a dióxido de carbono, mientras que el nitrógeno se convierte en amoníaco;
- b) en una segunda y tercera fase, el amoníaco se oxida a nitrato y nitrito; y
- c) la DTeo es la suma del oxígeno requerido en cada una de las fases (Metcalf & Eddy, Inc, 2014).

Como en este estudio solo es de interés el contenido de azúcares que potencialmente pueden generar biogás, solo se considera la primera suposición del método debido a la ausencia de nitrógeno en los carbohidratos de interés.

Figura 2. En las fotografías: a) muestra de bagazo de hojas de agave secas, y en b) jugo de hojas de agave.



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados y Discusión

*Procesamiento y contenido de humedad de las hojas de agave.* Las hojas de agave completas se prensaron para producir las fracciones de jugo y bagazo húmedo (ver figura 2). Estas fracciones se secaron por separado para calcular el contenido de humedad. Los datos se presentan en porcentaje de masa inicial fresca (húmeda) en la figura 3.

*Balance de masa.* Si se considera un consumo anual promedio de 881.4 miles de toneladas por año de agave para la producción de tequila, de este valor el 57.7% es el total de la biomasa de la planta y 42.3% de pencas y trozos de la limpieza de las cabezas; así se estima que 646.1 miles de toneladas de biomasa se quedan en los terrenos de cultivo sin ningún aprovechamiento ni utilidad. Del 100% de pencas frescas de agave después de prensadas, 52% corresponde a jugo en el que 13% son sólidos totales (ST) y 39% compuestos volátiles (CV) y agua. De ese mismo 100%, 48% corresponde a bagazo húmedo en el que 12% es bagazo seco (BS) y 36% compuestos volátiles y agua. Entre ST y BS se tiene un 25% y entre compuestos CV y agua se tiene un 75%.

En la tabla 2 se enlistan las concentraciones de azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa) analizados en el jugo y bagazo de las hojas de agave por HPLC. A partir de estos datos se

calcula que en 52L de jugo de hojas de agave hay 1.156kg de azúcares. No se detectó la presencia de sacarosa en el bagazo de las hojas de agave.

Tabla 2. Concentración de azúcares en el jugo y bagazo de hojas de agave.

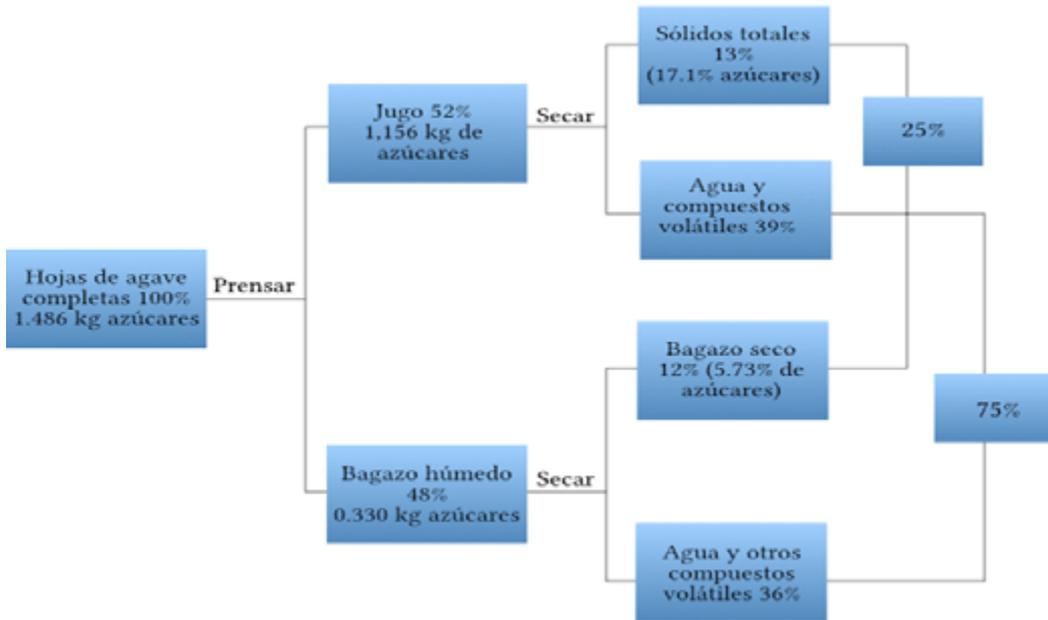
	Jugo de hojas de agave	Bagazo de hojas de agave
Azúcares	Concentración, g/L	
Sacarosa	0.574	--
Glucosa	1.189	0.064
Fructosa	20.461	2.281
Total	22.224	2.292

**Fuente:** Elaboración propia.

En el análisis del bagazo se tomaron 20 g de fibra en 0.5L de agua, en el cual se determinó que hay 0.0573 g de azúcares por cada gramo de bagazo seco, en otras palabras 5.73% de azúcares. Por lo que, en 48 kg de bagazo húmedo hay 5.76 kg de material seco si se considera que el contenido de humedad determinado es de 12% en el bagazo húmedo, puede calcularse que hay 0.330 kg de azúcares.

Con los datos anteriores, el cálculo total de azúcares en las hojas de agave es de 1.486 kg (base húmeda), como se muestra en el balance de masa de la figura 3.

Figura 3. Balance de masa total y de azúcares en del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

*Estimación de la generación de metano.* La proporción de generación de metano por unidad de Demanda teórica de oxígeno (DTeo) a presión y temperatura estándar (stp), por cálculo estequiométrico es 0.35L metano (stp)/1g DTeo. Con base en este indicador, se tiene que para sacarosa, glucosa y fructuosa un valor promedio de 0.38L de metano (stp)/g de azúcares de agave. Este valor calculado de metano es congruente con 0.37m<sup>3</sup> metano/kg ST reportado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2011) para los carbohidratos.

De acuerdo a los resultados analíticos se tienen 1486g de azúcares, y multiplicando por el factor de generación de metano se obtienen 569.14L metano (stp) por cada 100 kg de hojas de agave.

El potencial de generación de metano para 646.1 miles de toneladas de hojas de agave, que se quedan en los campos de cultivo cada año, es de 3.673 millones de



metros cúbicos de metano (stp). En términos económicos el aprovechamiento de las pencas de agave beneficiará a la gente de México mediante el desarrollo de una fuente sin explotar de energía de biomasa. Esto puede mitigar el efecto en la economía nacional de transición, esperada alrededor del 2020 de que México siendo un país exportador de combustibles fósiles pase a ser un importador neto; con este aprovechamiento también se proporcionarán beneficios económicos directos a 345,000 trabajadores comprometidos en el procesamiento y cultivo de agave en la forma de una mayor rentabilidad económica (potencial para los agaveros de pagar salarios más altos) y en la forma de creación de nuevas fuentes de trabajo. También dará empleo e ingresos a los trabajadores de firmas mexicanas comprometidas en el suministro de tecnología a los clientes. Socialmente el aprovechamiento de las pencas de agave ayudará a individuos, afectados por la pobreza de combustibles o energía, a reducir la dependencia de combustibles fósiles centrándose en la biomasa de desecho. El aprovechamiento evitará enlaces entre el valor del combustible y el precio de los alimentos, y así, formará parte de la responsabilidad y la sustentabilidad del enfoque de México con los combustibles renovables.

Al comparar las tres principales formas de aprovechar la biomasa como una fuente de energía es necesario considerar varios aspectos importantes. Por una parte, quemar los residuos de la industria del tequila para producir calor principalmente en los generadores de vapor, puede resultar ventajosa desde el punto de vista energético, pero no desde el punto de vista ambiental porque se generan muchos gases producto de la combustión. Al aprovechar los residuos para su uso potencial en la producción de etanol como biocombustible tenemos una reducción de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, pero, es necesario demarcar el aspecto negativo de la producción de etanol, como la generación de vinazas en la atapa de destilación, sin mencionar que esta misma consume mucha energía.

## Conclusiones

La industrialización de más de 880 miles de toneladas de agave por año, en la producción de tequila en el país, genera alrededor de 646 miles de toneladas de pencas y trozos de la limpieza de las cabezas de la planta. Esta biomasa que queda en los predios de cultivo es quemada sin ninguna utilidad energética como parte de la limpieza agrícola de los terrenos, con su consecuente generación de dióxido de carbono y contaminantes atmosféricos. Si esta biomasa es colectada y procesada para generar biogás, se puede tener un rendimiento teórico de 5.69L de metano (stp) por kilogramo de biomasa procedente de los residuos de la jima.

Lo que representa para 646 miles de toneladas de biomasa de hojas de agave un potencial teórico de 3.67 millones de metros cúbicos de metano (stp). Este metano contribuiría a suministrar una fuente importante energía a las industrias tequileras y a las poblaciones cercanas a los predios de cultivo, al usar la tecnología adecuada para el procesamiento y uso de biogás.

La decisión sobre el tipo de uso potencial que puedan tener las hojas y bagazo de agave para producir: etanol, biogás o calor, depende de las eficiencias de transformación de las celulosas y hemicelulosas contenidos en el bagazo, que en general, son bajas (Zumalacárregui-De Cárdenas, 2015), o usar solo los azúcares libres en estos residuos y/o los azúcares totales hidrolizados. Y sobre todo esto de la cantidad total disponible de los residuos de agave.

## Referencias

- Akowuah, J.O., Kemausuor, F. and Mitchual, S.J. (2012). Physico-Chemical Characteristics and Market Potential of Sawdust Charcoal Briquettes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*.
- Consejo Regulador del Tequila. (2017a). Estadísticas en línea. Consumo de agave para tequila y tequila 100% agave. Fecha de consulta: 17 de agosto de 2017. Disponible en: [www.crt.org.mx/Estadisticascrtweb](http://www.crt.org.mx/Estadisticascrtweb).
- Consejo Regulador del Tequila. (2017b). Consejo regulador del tequila. Consultado en: 26 de septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.crt.org.mx>.
- Escamilla-Treviño, L.L. (2011). Potential of Plants from Genus Agave as Bioenergy Crops. *BioEnergy Research*. Vol. 5.
- Hernández-Meléndez, O., Miguel-Cruz, F., Montiel, C., Hernández-Luna, M., Vivaldo-Lima, E., Mena-Brito, C and Bárzana, E. (2016). Characterization of Blue Agave Bagasse (BAB) as Raw Material for Bioethanol Production Processes by Gravimetric, Thermal, Chromatographic, X-ray Diffraction, Microscopy, and Laser Light Scattering Techniques. *BioEnergy Research*.
- Íñiguez Covarrubias, G.; Bernal Casillas, J. y Ramírez Meda, W. (2014). Agave plant leaves as a potential energy source. *Proceedings Venice 2014, Fifth International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. San Servolo, Venice, Italy; 17 - 20 November 2014.
- Íñiguez Covarrubias, G., Díaz-Teres, R., Sanjuan-Dueñas, R., Anzaldo-Hernández, J. and Rowell, R.M. (2001). Utilization of byproducts of the tequila industry. Part 2: potential value of Agave tequilana Weber azul leaves. *Bioresource Technology*, 77, pp. 101-108.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Quinta edición. McGrawHill.
- National Renewable Energy Laboratory. (January 2008). *Determination of Sugars, Byproducts, and Degradation Products in Liquid Fraction Process Samples*. Laboratory Analytical Procedure. Operated for the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- Núñez, H.M., Rodríguez, L.F. and Khanna, M. (2010). Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities. *GCB Bioenergy*, 3 (1), pp. 43-57.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (pnud), Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y



la Agricultura, y Global Environment Facility. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile. Recuperado de: [www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf](http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf).

Ramírez Cortina, C.R., Alonso Gutiérrez, M S. y Rigal, L. (2011). Tratamiento alcalino de los residuos agroindustriales de la producción del tequila, para su uso como complemento de alimentos de rumiantes. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica*. Vol. 5. No. 2.

Rijal, D., Vancov, T., Mcintosh, S., Aswath, N. and Stanley, G.A. (2016). Process options for conversion of *Agave tequila* leaves into bioethanol. *Industrial Crops and Products*.

Zumalacárregui-De Cárdenas, L. M., Pérez-Ones, O., Rodríguez-Ramos, P. A., Zumalacárregui-De Cárdenas, B. M. and Lombardi, G. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. Volumen XVI. Número 3. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.



# Producción de Higuierilla como energía alternativa expuesto a tratamiento de desalinización

*German Eduardo Dévora Isiordia,<sup>1,2</sup> Luis Carlos Valdez Torres,<sup>1</sup> Rodrigo González Enríquez,<sup>1</sup> Karen Alicia Granillo Moreno,<sup>2</sup> Martín Elizalde Duarte,<sup>1</sup> Jesús Álvarez Sánchez,<sup>1</sup> Adriana Robles Lizárraga<sup>3</sup> y María Elena López Mercado<sup>1</sup>*

## Resumen

A nivel mundial, solo el 11% del consumo total de energía es proveniente de fuentes renovables como la energía eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz, solar y la bioenergía (sagarpa, 2009). Ante la alta demanda a nivel mundial de combustibles que muevan medios de transporte utilizados por el hombre, se hace necesario el buscar alternativas de combustibles diferentes a los fósiles no renovables, por su misma esencia; además de brindar un sentido ecológico en un intento de reducir la contaminación del medio ambiente, una de ellas es el biodiesel y el etanol. Para la producción redituable de estos biocombustibles la clave se encuentra en la materia prima utilizada. Existen diversos cultivos en México como es el caso de la higuierilla (*Ricinus communis*), que se pueden utilizar como materia prima para la generación de bioenergéticos, a partir de su biomasa, gracias a su elevado potencial para la producción de biocombustibles. Por lo que, la presente investigación tiene por objetivo, evaluar el rendimiento del cultivo de higuierilla, mediante un proceso de desalinización por ósmosis inversa; para

1 Programa educativo de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Sonora

2 german.devora@itson.edu.mx

3 Programa educativo de Ingeniería en Ciencias Ambientales, Obregón-Sonora, México. Tel: +52 - (644) 410 90 00 Ext. 1402, Instituto Tecnológico de Sonora

su empleo como energía alternativa. El experimento se desarrolló en una hectárea, en el campo agrícola ubicado en el block 1814, en el Valle del Yaqui, Sonora, México. Se hicieron cuatro rastreos, un tabloneo en el terreno y surcos con distancia de 0.76 m. Se dividió el terreno en cinco fracciones, cada fracción con cuatro híbridos de higuierilla (Zoya 856, Olga 864, Galit K-93 y Eva 855), cada híbrido con cuatro surcos. El método de siembra fue mecánico, mediante sembradora tipo monograno de cuatro cuerpos a cada 0.30 m. Se fertilizó con Nitrógeno y Fósforo (100 kg de cada uno) durante la siembra. La cosecha se llevó a cabo a los 118 y 130 días después de la siembra. Se realizó la cosecha de forma manual, cortando con tijera los racimos y depositándolos en costales. Para la identificación de las etapas fenológicas del cultivo de la Higuierilla, se observó el desarrollo de la planta desde su siembra hasta su cosecha, y se realizó un análisis estadístico a los resultados de germinación y cosecha. Se abasteció de agua al cultivo de higuierilla mediante 5 tratamientos de agua de riego, con el agua producto de una planta desalinizadora de ósmosis inversa (oi) de 150 m<sup>3</sup>/d. Se realizaron mezclas, para lograr las concentraciones requeridas para los cinco tratamientos (1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 mg/L de SDT). Se utilizó el sistema de riego por goteo de 1 L/h, mediante cintas de riego de 16 mm de diámetro. Posteriormente se realizó una comparación de porcentaje de extracción de aceite en diferentes cultivos oleaginosos con potencial bioenergético. Los resultados muestran que son cuatro las etapas fenológicas del cultivo de higuierilla: nacencia, vegetativa, reproductiva 1 y reproductiva 2. En la etapa reproductiva 2, ocurrió la floración del racimo a la madurez de la semilla o cosecha, con un porcentaje de madurez casi uniforme en todos los tratamientos, así como en todos los híbridos. Al final de la germinación, 30 días después de la siembra, el porcentaje mayor se presenta en los tratamientos de 1000 y 1500 mg/L de SDT, variando de 71% a 85%. Así mismo, en relación a los híbridos, los porcentajes mayores de germinación en general se tienen en Galit K-93, Eva 855 y Zoya 856. El cultivo presentó un rendimiento de 2.5 ton/ha. La concentración de SDT de agua de alimentación (agua de pozo) es de 3873.70 mg/L, el agua producto contiene en promedio 294.82 mg/L de SDT y la corriente de rechazo presentó 10 958.63 mg/L de SDT. Esto indica un 92% de remoción de SDT en el agua producto.



## Introducción

A nivel mundial, el 89% del consumo total de energía se produce a partir de fuentes no renovables, mientras que solo el 11% es proveniente de fuentes renovables como la energía eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz, solar y la bioenergía (Sagarpa, 2009). Ante la alta demanda a nivel mundial de combustibles que muevan medios de transporte utilizados por el hombre, se hace necesario el buscar alternativas de combustibles diferentes a los fósiles no renovables, por su misma esencia; además de brindar un sentido ecológico en un intento de reducir la contaminación del medio ambiente, una de ellas es el biodiesel y el etanol. Para la producción redituable de estos biocombustibles la clave se encuentra en la materia prima utilizada, preferentemente con disponibilidad local, implementando procesos productivos a fin de obtener un biocombustible competitivo y de calidad (Benavides et al., 2007).

Existen diversos cultivos en México que se pueden utilizar como materia prima para la generación de bioenergéticos, a partir de su biomasa, gracias a su elevado potencial para la producción de biocombustibles. Estos cultivos son: higuera (*Ricinus communis*), piñón mexicano (*Jatropha curcas*), remolacha (*Beta vulgaris*), sorgo dulce (*Sorghum*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y palma de aceite (*Elaeis guineensis*) (figura 1). A partir de la biomasa de estos cultivos energéticos, el aceite extraído de su semilla es aprovechado como materia prima para la generación de biodiesel (Hernández et al., 2012; Fernández et al., 2012).

Figura 1. Áreas identificadas para la producción de biomasa para Bioenergéticos.



Fuente: SAGARPA, 2009.

Las principales motivaciones para el desarrollo de los bioenergéticos y en particular de los biocombustibles líquidos son: seguridad energética, impacto ambiental (reducción de emisiones contaminantes) y desarrollo agrícola. La inestabilidad en los precios del petróleo ha complicado la planeación energética y económica en varios países del mundo. Según analistas se tiene previsto que esta falta de estabilidad continúe, principalmente cuando se considera que la producción ha comenzado a disminuir en algunos de los principales países productores de petróleo. Según lo reportado por la Agencia Internacional de Energía, se estima que los precios del petróleo se mantendrán en rangos de entre 48 y 62 dólares hasta el año 2030 (SAGARPA, 2013).

SAGARPA en 2013, reporta que los países líderes en la producción y el uso de etanol a nivel mundial son: Brasil y Estados Unidos de América, con 34 000 y 27 000 millones de litros durante 2008, respectivamente. Ambos países son exportadores netos de los productos agrícolas en que han basado su industria de biocombustibles. Brasil es un importante exportador de azúcar y es frecuente la referencia a Estados Unidos de América como el granero del mundo.



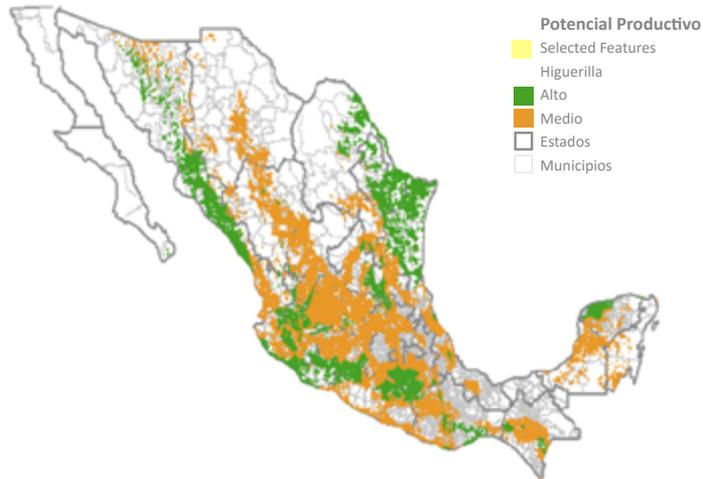
Según lo reportado por un informe de estrategia intersecretarial de los bioenergéticos de SAGARPA en 2013, uno de los principales beneficios ambientales de utilizar fuentes primarias renovables para producir energía, es el potencial que éstas pueden presentar para reducir la emisión de gases de efecto de invernadero que se asocian con el uso de las fuentes de energía fósil. La Estrategia Nacional de Acción Climática indica que el costo de las medidas preventivas de mitigación y adaptación podría corresponder al 1% del producto interno bruto mundial. Por otro lado, en caso de no tomar acciones preventivas se estima que el costo negativo de los efectos podría implicar hasta el 10% del PIB mundial.

La industria de bioenergéticos, con un crecimiento acelerado impondrá importantes demandas sobre los recursos de tierra y agua. Esta industria, ya ha presentado efectos sobre los precios de dos de los principales productos agrícolas del mundo: el maíz y el azúcar. Esta elevada demanda, podría dar motivo al sector industrial para cambiar la vocación de regiones agrícolas o deforestar extensas regiones de bosques tropicales para reemplazarlos por cultivos de especies vegetales y cultivos energéticos. En este sentido, México deberá ser estricto en el cumplimiento de la legislación aplicable y vigente en la materia, con el fin de evitar la deforestación de regiones boscosas (SAGARPA, 2013).

Para la producción redituable de biocombustibles en México, la clave se encuentra en la materia prima utilizada, preferentemente con disponibilidad local, implementando procesos productivos a fin de obtener un biocombustible competitivo y de calidad (Benavides *et al.*, 2007). Para el caso particular de Higuierilla, la mayor producción se obtiene principalmente de países como India, China, Mozambique y Brasil, conformando el 96% de esta, según cifras arrojadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (FAOSTAT, 2016).

En México, el estudio de la Higuierilla data del año 1962 por el Dr. Raúl Robles Sánchez en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) del estado de Tamaulipas y en la actualidad sigue siendo de mucho interés, debido a las ventajas agronómicas y tecnológicas que han resultado en diversas investigaciones realizadas en el país, por su alto potencial de rendimiento en relación con requerimientos bajos de agua; a su adaptación en regiones semiáridas, zonas tropicales y subtropicales, además que no compite con la alimentación humana (Rico, *et al.*, 2011), en la figura 2 se observa el potencial productivo de este cultivo en México.

Figura 2. Potencial productivo de la higuierilla bajo condiciones de temporal en México



**Fuente:** SAGARPA, 2012.

Actualmente al sur de Sonora, México, se instala una planta productora de aceite de ricino proveniente de la Higuierilla, la cual impactará a nivel internacional, teniendo como objetivos a corto plazo validar la tecnología utilizada para la producción, conocer su comportamiento fenológico y a mediano plazo espera establecer en la región, la Higuierilla como diversificación de cultivo por su alta rentabilidad (Notimex, 2015).

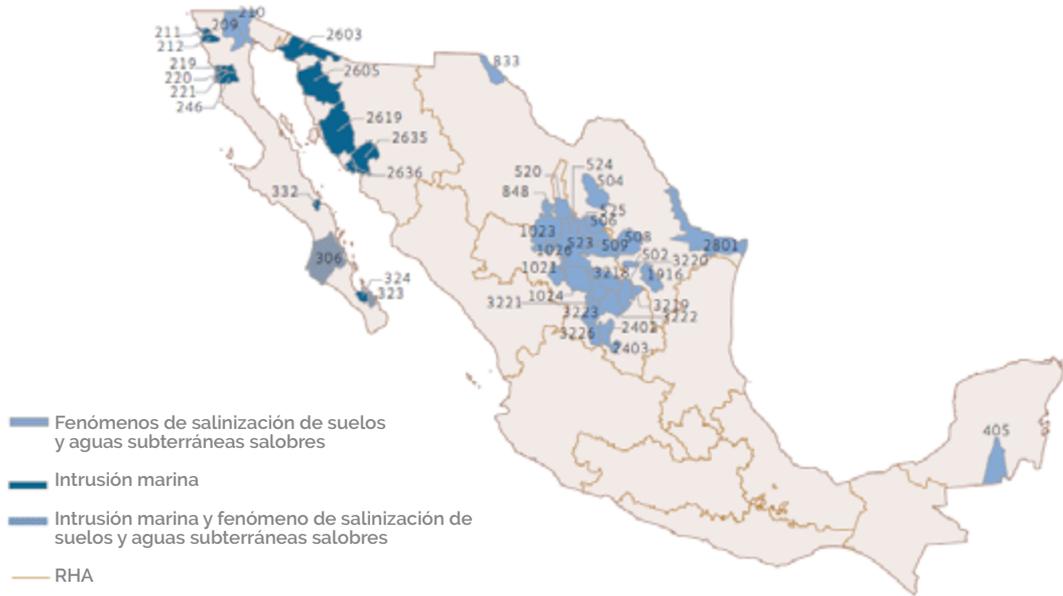
En este mismo orden de ideas, otro factor determinante para la producción agrícola sin lugar a dudas es el agua suministrada a las plantas de todo cultivo, así como el de la Higuierilla, objeto de la presente investigación. El agua debe ser suministrada en calidad y cantidad de acuerdo a los requerimientos propios de cada cultivo, para alcanzar su máximo desarrollo, derivando en altos rendimientos.

En relación a la disponibilidad del agua en el mundo, el principal uso de este recurso según la FAO en el año 2011 ha sido el agrícola, con un 70% de la extracción total; donde México ocupa el séptimo lugar con 84.93 miles de hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 65.15 miles de hm<sup>3</sup>/año están destinados al riego agrícola, lo que representa el 76.7% y el resto, el 23.3% es aprovechado en otros usos (CONAGUA, 2014).

Cabe señalar que, del volumen total extraído en México para uso agrícola, el 35.55% (23.16 miles de hm<sup>3</sup>/año) proviene del agua subterránea. Para fines de la administración

del agua, actualmente el territorio nacional se divide en 653 acuíferos, donde 106 de ellos se encuentran sobreexplotados; de estos, 31 se detectan con el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres y 15 con problemas de intrusión salina; de estos últimos, 5 se encuentran en el estado de Sonora (figura 3).

Figura 3. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres



Clave	Acuífero	Clave	Aquífero
209	Laguna Salada	833	Valle de Juárez
210	Valle de Mexicali	848	Laguna de Palomas
211	Ensenada	1021	Pediceña-Velardeña
212	Maneadero	1023	Ceballos
219	Camalú	1024	Oriente Aguanaval
220	Colonia Vicente Guerrero	1026	Vicente Suárez
221	San Quintín	1916	Navidad-Potosí-Raíces
246	San Simón	2402	El Barril
306	Santo Domingo	2403	Salinas de Hidalgo
323	Los Planes	2603	Sonoyta-Puerto Peñasco
324	La Paz	2605	Caborca
332	Mulegé	2619	Costa de Hermosillo
405	Xpujil	2635	Valle de Guaymas
502	Cañon del Derramadero	2636	San José de Guaymas
504	Cuatrociénegas-Ocampo	2801	Bajo Río Bravo
506	El Hundido	3218	Cedros
508	Paredón	3219	El Salvador
509	La Paila	3220	Guadalupe Garzarón
520	Laguna del Rey-Sierra Mojada	3221	Camacho
523	Principal-Región Lagunera	3222	El Cardito
524	Acatita	3223	Guadalupe de las Corrientes
525	Las Delicias	3226	Chupaderos

Fuente: CONAGUA, 2015.

Con relación a lo anterior, debido a los escasos escurrimientos superficiales que generan las bajas precipitaciones, el agua subterránea de países como México, constituye una fuente esencial para el abastecimiento de agua en consumo humano y en el desarrollo



económico de las regiones áridas y semiáridas, principalmente en el sector agrícola, como sucede en el estado de Sonora, donde es de observarse que algunos acuíferos se han aprovechado de forma intensiva hasta sobre explotarlos y en otros acuíferos como el del Valle del Yaqui ubicado al sur de Sonora, ya se evidencian puntos de alerta en pozos con manifestación de una continua elevación en los niveles de salinidad, ocasionando problemas de abastecimiento (González *et al.*, 2009).

En este contexto de escasez y manejo de caudales y concentraciones adecuadas para riego, el proceso de desalinización resulta ser una atractiva respuesta para tratar estas aguas salobres y rehabilitar dichos aprovechamientos subterráneos, con la intención de manejar mejor el recurso hídrico utilizado para la agricultura, en zonas donde la disponibilidad del agua es escasa (Dévora, 2015).

Al respecto, en el Valle del Yaqui ya se han hecho investigaciones de cultivos regados con agua de pozos salobres, que fue previamente tratada con una planta de desalinización de ósmosis inversa, la primera utilizada en el país con esa finalidad en el año 2013 en cultivo de sorgo, en un proyecto experimental realizado por el Instituto Tecnológico de Sonora, donde resultó que la productividad se incrementó en una tonelada por hectárea. Posteriormente en el año 2015 se realiza nuevamente el experimento, cambiando de cultivo, tomatillo variedad gran esmeralda, donde se obtuvieron 6 toneladas por hectárea más, de rendimiento (Dévora, 2015; Valencia, 2016).

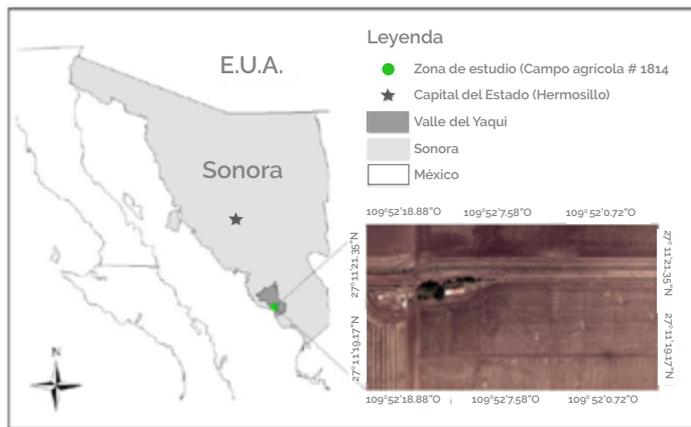
Considerando lo mencionado anteriormente, la presente investigación tiene por objetivo, evaluar el rendimiento del cultivo de higuierilla, mediante un proceso de desalinización por ósmosis inversa; para su empleo como energía alternativa. Con la realización de este proyecto, se favorecerá la capacidad económica y manejo de recursos de los agricultores de la región noroeste de México, al considerar reactivar pozos con aguas salobres como fuentes de aprovechamiento para cultivos resistentes a sales y a la higuierilla como una alternativa en la generación de energías alternativas, con la finalidad de dotar una solución a problemas sociales.

## Método

### Zona de estudio

El experimento se desarrolló en una hectárea (80 m por 125 m), en el campo agrícola ubicado en el block 1814, en el Valle del Yaqui, al sur de ciudad Obregón, Sonora, México; en las coordenadas geográficas latitud norte 27° 11' 20.47", y longitud oeste 109° 52' 10.89" (figura 4).

Figura 4. Localización geográfica de la zona de estudio.



Fuente: Robles, 2015.

### Cultivo utilizado como materia prima, para la generación de bioenergéticos

#### *Preparación del suelo y división del terreno para asignar los tratamientos*

Se hicieron cuatro rastreos, un tabloneo en el terreno y surcos con distancia de 0.76 m. Para el experimento, el campo se dividió en cinco fracciones, cada fracción con cuatro híbridos de higuierilla (Zoya 856, Olga 864, Galit K-93 y Eva 855), cada híbrido con cuatro surcos, por lo que en resumen se tuvieron 16 surcos para cada fracción, dando como resultado un total de 80 surcos en el área de estudio. A cada fracción se le aplicó un tratamiento de riego diferente (es decir; 1000 mg/L de SDT, 1500 mg/L de SDT, 2,000 mg/L de SDT, 2500 mg/L de SDT y 3000 mg/L de SDT).

### *Densidad, método de siembra y fertilización*

La separación entre surcos fue de 0.76 m por una longitud de 124 m cada uno y las semillas se fueron sembrando con una separación de 0.30 m sobre estos, por lo que se tuvo una densidad de población de 33 067 plantas en el área de estudio. El método de siembra fue mecánico, mediante sembradora tipo monograno de cuatro cuerpos a cada 0.30 m. Se fertilizó con Nitrógeno y Fósforo (100 kg de cada uno) durante la siembra.

### *Cosecha y postcosecha*

La cosecha se llevó a cabo a los 118 y 130 días después de la siembra. Se realizó la cosecha de forma manual, cortando con tijera los racimos y depositándolos en costales. En la postcosecha se realizaron el secado y el desgrane del cultivo. El secado de la higuierilla se realizó en invernaderos, el desgrane se hizo de forma mecánica mediante trilladora y de forma manual se terminó de limpiar la semilla, retirando los residuos de cáscara que no quitó la trilladora.

### *Identificación de las etapas fenológicas del cultivo*

Para la identificación de las etapas fenológicas del cultivo de la Higuierilla (tabla 1), se observó el desarrollo de la planta desde su siembra hasta su cosecha y los resultados de estas observaciones se compararon con los manuales del cultivo de la Higuierilla realizados por INIFAP (Rico, *et al.*, 2011; González *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2012 y Mercado *et al.*, 2014).

Tabla 1. Etapas fenológicas del cultivo de Higuierilla (Hernández *et al.*, 2012).

<b>Etapas fenológicas</b>	<b>Período de la etapa</b>
Nacencia	De la siembra a la emergencia de la plántula
Vegetativa	De la aparición de hojas verdaderas a la diferenciación floral
Reproductiva 1	De la diferenciación floral al inicio de floración del racimo
Reproductiva 2	De la floración a la madurez de la semilla o cosecha

**Fuente:** Hernández *et al.*, 2012.

## *Análisis estadístico*

- *Germinación*

Para los datos de germinación se establecieron tres bloques de muestreo (repeticiones) de tres metros de ancho, para cada híbrido de cada tratamiento, haciendo un total de 60 bloques de muestreo; considerando en cada caso los dos surcos centrales de cada híbrido. Se contaron las que nacieron, esperando de acuerdo a la siembra, un máximo de 10 plantas por surco.

- *Cosecha*

Para la obtención de datos estadísticos y medidas durante la cosecha se establecieron cinco bloques de muestreo (repeticiones) de 5 m de ancho, para cada híbrido de cada tratamiento, considerando en cada caso los dos surcos centrales de cada híbrido, por lo que las medidas de los bloques resultaron de 5 por 1.52 m, haciendo un total de 100 bloques de muestreo.

Se tomaron cinco muestras de racimo primario en cada híbrido (4) de cada tratamiento (5) en cada repetición (5) para obtener los siguientes datos: longitud del racimo midiéndolo con una regla graduada en cm, número de frutos contando cada uno de ellos por racimo y pesaje de los frutos en una báscula. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza.

Para la obtención del rendimiento del cultivo, se cosecharon todos los racimos principales y secundarios de cada híbrido, de cada tratamiento, en cada bloque de muestreo (repeticiones) y se pesaron las semillas. Cabe señalar que las semillas de los muestreos descritos en el párrafo anterior se sumaron a los datos de rendimiento para obtener el muestreo completo de cada repetición. La comparación de medias se obtuvo con base en la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ( $p \leq 0.05$ ) (tabla 2).

Tabla 2. Prueba de Tukey (HSD) ( $p \leq 5\%$ ) para % germinación en relación a los Tratamientos.

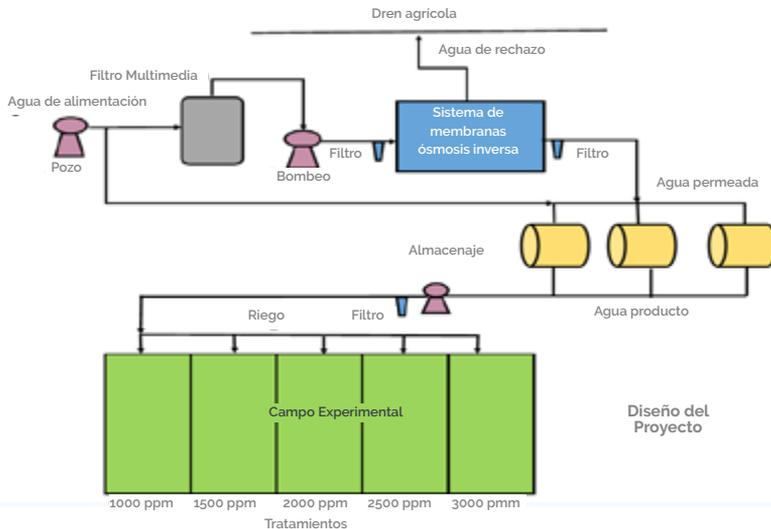
Tratamiento mg/L de SDT	Recuento Media LS	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	
3000	24	67.0833	2.82228	X	b
2000	24	69.1667	2.82228	xx	ab
2500	24	72.5	2.82228	xx	ab
1000	24	77.5	2.82228	xx	ab
1500	24	78.3333	2.82228	X	a

Fuente: Elaboración propia.

- Desalinización

Se abasteció de agua al cultivo de higuerrilla mediante cinco tratamientos de agua de riego, con el agua producto de una planta desalinizadora de ósmosis inversa (oi) de 150 m<sup>3</sup>/d. En la figura 5 se esquematiza el diseño del proyecto en relación al tren de descarga del agua de alimentación hasta obtener un agua producto.

Figura 5. Esquema del Diseño del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Se operó una planta desalinizadora de oi (figura 6) con un caudal de producción de 150 m<sup>3</sup>/d, equipada con 12 módulos de membranas modelo SWC4B-MAX de 8"x40" de la marca Hydranautics para el riego de una hectárea (ha) de cultivo de Higuerrilla, durante el ciclo Primavera-Verano 2016, se inició el primer riego el día 12 de febrero y terminó el 18 de junio.

Figura 6. Planta desalinizadora de oi con capacidad de 150 m<sup>3</sup>/d.



**Fuente:** Imagen propia.

El agua de alimentación a la unidad de desalinización fue un pozo de agua salobre, el cual tiene una profundidad de 30 m con un espejo de agua a los 10 m (figura 7). Se dio un pretratamiento al agua de alimentación, para preparar su entrada al sistema de membranas de oi. Como parte del pretratamiento físico, el agua pasó por un filtro multimedia (FMM) y los filtros de cartucho, el primero en el tren de descarga es el FMM el cual recibió directamente el agua de la fuente de alimentación (pozo), y una vez que la presión llegaba a 50 PSI encendía la planta, enseguida se estabilizaba a 40 PSI. Está compuesto por antracita, turbidex, zeolita y grava. Los filtros de cartucho con 5µm de diámetro, se ubicaron a la entrada y a la salida del bastidor de membranas. Por otra parte, el pretratamiento químico, consistió en la dosificación de anti-incrustante, el cual

fue suministrado por una bomba de diafragma de 0.25 HP, con la finalidad de separar sales incrustadas en la superficie (poros) de membranas y evitar el aumento de presión por taponamientos.

Figura 7. Pozo de alimentación, con bomba trifásica de 3 HP y 3540 RPM.



Fuente: Imagen propia.

### *Homogenización en tratamientos de agua*

Se hicieron mezclas de agua permeada (planta desalinizadora) con agua de alimentación (pozo) para la obtención de las concentraciones de sales requeridas de 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 ppm (mg/L) para los tratamientos de agua de riego en el cultivo de la Higuierilla. Para el cálculo de la homogenización en los tratamientos del agua se utilizó la siguiente fórmula:

$$C1*V1 + C2*V2 = C3*V3 \quad (1)$$

Donde:

**C1** concentración del agua de alimentación (pozo) en ppm o mg/L.

**V1** volumen del agua de alimentación (pozo), en litros (L).

**C2** concentración del agua permeada (planta desalinizadora) en ppm o mg/L.

**V2** volumen del agua permeada (planta desalinizadora) en litros (L).

**C<sub>3</sub>** concentración del agua producto requerida por el tratamiento (tanque de almacenamiento) en ppm o mg/L.

**V<sub>3</sub>** es el volumen del agua producto requerida por el tratamiento (tanque de almacenamiento) en litros (L).

El agua se homogenizó en una mezcla mediante un agitador eléctrico que se colocó en la escotilla del tanque. El motor del agitador es de 0.25 HP y 3460 RPM.

### **Riego**

Se utilizó el sistema de riego por goteo de 1 L/h, mediante cintas de riego de 16 mm de diámetro. El flujo se suministró mediante sistema tecnificado de desalación (ósmosis inversa) del agua de un pozo salobre. Mediante sensores enclavados en el suelo se revisó la humedad a través del medidor watermark, considerando apropiado de 20 a 40 (centibars/kPa). El agua almacenada en las concentraciones requeridas para cada tratamiento es bombeada por un sistema de 1 HP a 3640 rpm, para el riego del cultivo.

### **Monitoreo de parámetros de calidad del agua**

Para conocer las condiciones del agua de alimentación, y el efecto que tuvo el tratamiento de desalinización por *oi*, es decir; si el sistema de *oi* estuvo realizando el trabajo de eliminación de sales correctamente, se determinó: pH, temperatura (°C), oxígeno disuelto (%), conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), y con este último se calculó la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en (mg/L) considerando que ( $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  equivale a 0.640 mg/L), en el agua de alimentación proveniente del pozo de agua salobre, en el agua rechazo que se produjo de la planta desalinizadora y en el agua permeada que se obtuvo después del tratamiento de desalinización por membranas de *oi*, con un equipo de medición multiparamétrico modelo ysi 556.

#### **• Energías alternativas**

Se realizó una comparación de porcentaje de extracción de aceite en diferentes cultivos oleaginosos con potencial bioenergético, como la higuera (*Ricinus communis*), piñón (*Jatropha curcas*), palma aceitera (*Elaeis guineensis*), coco (*Cocos nucifera*), soya (*Glycine*

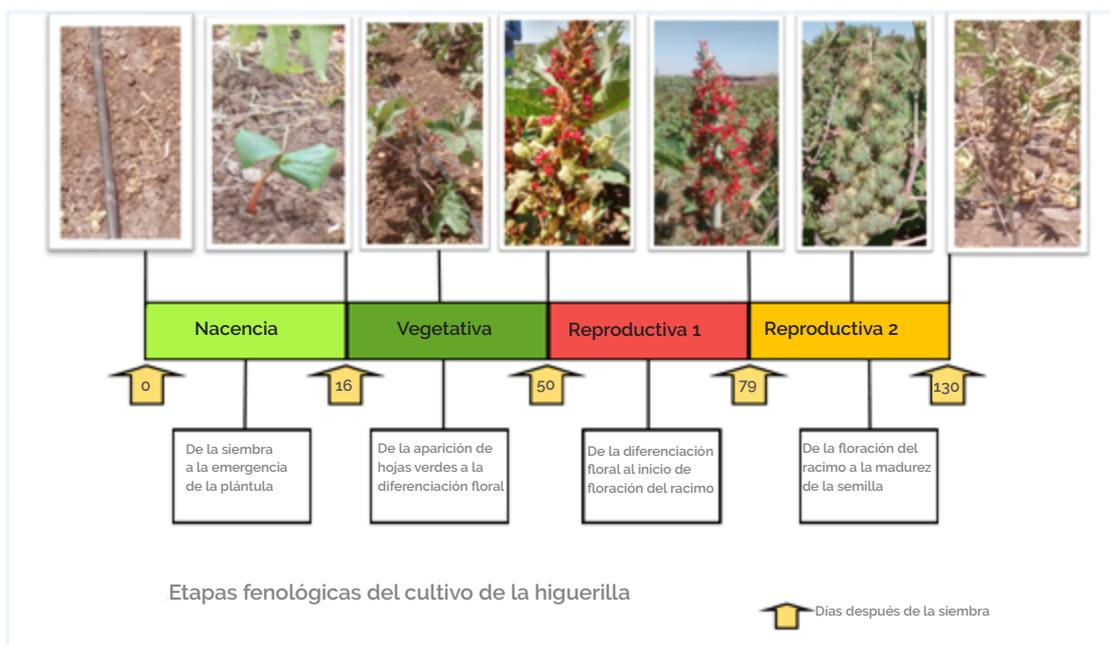
max), entre otros. Con la finalidad de identificar el cultivo con mayor porcentaje de aceite extraíble, para conocer el de mayor rentabilidad para el sector agrícola y comercial.

## Resultados

- *Crecimiento de higuera*

### *Etapas fenológicas del cultivo (figura 8)*

Figura 8. Etapas fenológicas de la higuera.



**Fuente:** Elaboración propia.

*Nacencia:* (del 11 al 27 de febrero). De la siembra a la emergencia de la plántula, en general la germinación se da a los 16 días después de la siembra, con un porcentaje mayor de germinación en los tratamientos de 1000 y 1500 mg/L de SDT y en relación a los híbridos, en Galit K-93 y Eva 855.



Vegetativa: (del 28 de febrero al 01 de abril). De la aparición de hojas verdaderas a la diferenciación floral, fue entre los 17 y 50 días después de la siembra; con un porcentaje mayor de Floración en los tratamientos de 1000 y 1500 mg/L de SDT, y en relación a los híbridos, en Galit K-93 y Eva 855.

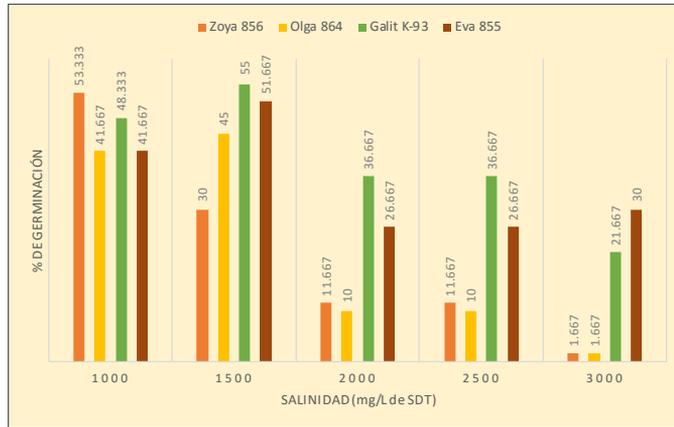
Reproductiva 1: (del 02 al 30 de abril). Se presentó de la diferenciación floral al inicio de floración del racimo, entre los 51 y 79 días después de la siembra; con un porcentaje de Floración casi uniforme en todos los tratamientos, así como en todos los híbridos.

Reproductiva 2: (del 01 de mayo al 20 de junio). Se dio de la floración del racimo a la madurez de la semilla o cosecha, entre los 80 y 130 días después de la siembra; con un porcentaje de madurez casi uniforme en todos los tratamientos, así como en todos los híbridos; siendo el híbrido Olga 864 el más tardío para su cosecha con 12 días después con respecto al día de corte de los otros.

### ***Germinación: Análisis estadístico***

Al inicio de la germinación, 16 días después de la siembra, se muestra el porcentaje (%) mayor, el cual se presenta en los tratamientos de 1000 y 1500 mg/L de SDT, variando, oscilando de 30% a 55%. Ahora bien, en relación a los híbridos los porcentajes mayores de germinación en general se tienen en Galit K-93 y Eva 855; además de Zoya 856 en el tratamiento de 1000 mg/L de SDT (figura 9).

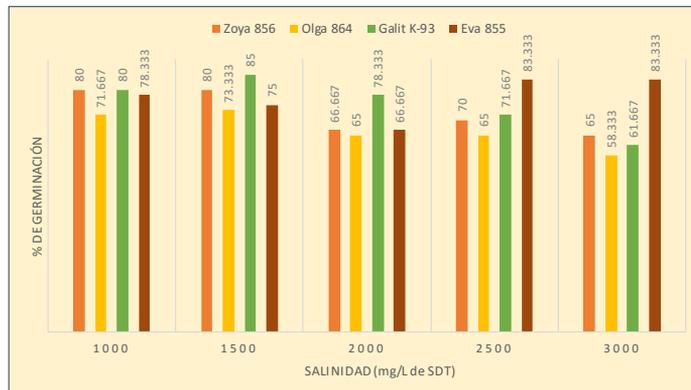
Figura 9. Porcentaje de germinación 16 días después de la siembra.



**Fuente:** Elaboración propia.

Al final de la germinación, 30 días después de la siembra, el porcentaje mayor se presenta en los tratamientos de 1000 y 1500 mg/L de SDT, oscilando del 71% y 85%. Así mismo, en relación a los híbridos, los porcentajes mayores de germinación en general se tienen en Galit K-93, Eva 855 y Zoya 856, (figura 10).

Figura 10. Porcentaje de germinación 30 días después de la siembra.



**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis de varianza ANOVA (tabla 3), los factores de tratamiento e híbrido tienen efecto estadísticamente significativo en porcentaje de germinación de 30 días después de la siembra, para un 95% de nivel de confianza, mientras que la interacción entre estos factores no es significativa, (tabla 4).

Tabla 3. Análisis de varianza para % de germinación 30 días después de la siembra.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-	P-Valor
A: Tratamiento	2,366.67	4	3.10	3.10	0.0190
B: Híbrido	1,942.5	3	3.39	3.39	0.0211
Interacción AB	2,853.33	12	1.24	1.24	0.2645
Residuos	19,116.7	100			
Total Corregido	26,279.2	119			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Prueba de Tukey (HSD) ( $p \leq 5\%$ ) para % germinación en relación a los híbridos.

Tratamiento mg/L de sdt	Recuento-Media ls	Media ls	Sigma ls	Grupos Homogéneos	
Olga 864	30	66.6667	2.52433	X	B
Zoya 856	30	72.3333	2.52433	xx	Ab
Galit K-93	30	75.3333	2.52433	xx	Ab
Eva 855	30	77.3333	2.52433	X	A

Fuente: Elaboración propia.

### *Rendimiento de higerilla*

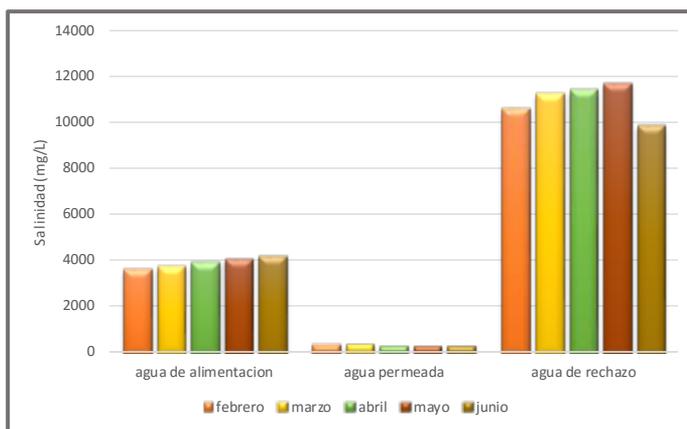
Al momento de la cosecha de la higerilla, el rendimiento total fue 2500 kg/ha, es decir, 2.5 ton/ha.

- *Calidad del agua*

### *Concentración de SDT en las tres corrientes de agua: alimentación, producto y rechazo*

Se muestran resultados promedios mensuales de salinidad de los muestreos obtenidos en campo, de las tres corrientes de agua que intervinieron en el proceso (figura 11), donde se tiene que para el agua de alimentación (pozo salobre) el promedio final arrojado es de 3 873.70 mg/L de SDT; para el agua de rechazo (salmuera), 10 958.63 mg/L de SDT y para el agua permeada a la salida del proceso de desalinización, 294.82 mg/L de SDT.

Figura 11. Promedio de la salinidad según el tipo de agua.



Fuente: Elaboración propia.

### *Agua de riego*

En la tabla 5 se muestran los promedios de los parámetros de calidad de agua evaluados en agua producto, que se utilizó como agua de riego.

Tabla 5. Promedios de los parámetros de calidad del agua producto.

Tratamiento (mg/L de SDT)	Temp. (°C)	OD (%)	pH	CE (ms/cm)	SDT (mg/L)
1000	25.17	1.62	7.04	1.63	1,040.77 ± 307.52
1500	25.43	1.45	7.26	2.36	1,509.52 ± 402.92
2000	25.31	1.18	7.41	3.17	2,031.23 ± 299.12

Continúa.

2500	25.06	0.97	7.52	3.84	2,455.35 ± 184.74
3000	25.19	0.74	7.63	4.66	2,979.77 ± 184.77

Donde: **SDT**= Sólidos Disueltos Totales, **OD**= Oxígeno Disuelto, ± Desviación estándar.

**Fuente:** Elaboración propia.

### *Cantidad de agua producto utilizada*

En la tabla 6, se muestra la cantidad de agua producto que se suministró al riego del cultivo durante el periodo del 12 de febrero al 18 de junio del 2016.

Tabla 6. Agua producto total preparada durante el experimento.

Tratamiento (ppm)	Tanque (L)	Bimestre 1 (tanque)	Bimestre 2 (tanque)	Bimestre 3 (tanque)	Total (tanques)	Volumen total (L)
1000	5,000	46	68	4	118	590,000
1500	5,000	46	68	4	118	590,000
2000	5,000	46	68	4	118	590,000
2500	5,000	46	68	4	118	590,000
3000	5,000	46	68	4	118	590,000
<b>Totales</b>	-	230	340	20	590	2,950,000

**Fuente:** Elaboración propia.

### *Lámina de riego total suministrada*

En total se prepararon 2 950 000 L de agua, durante la siembra del cultivo de la higuera.

- *Bioenergéticos*

En la tabla 7, se muestra una lista de cultivos con su nombre, su parte oleaginosa, el porcentaje (%) de aceite y los principales países productores de cada especie. Los cultivos que se describen son: higuera (*Ricinus communis*), girasol (*Helianthus annuus*), canola (*Brassica napus* y *B. rapa*), soya (*Glycine max*), palma aceitera (*Elaeis guineensis*), algodón (*Gossypium hirsutum*), coco (*Cocos nucifera*), cacahuate (*Arachis hypogaea*), cártamo (*Carthamus tinctorius*) y piñón mexicano (*Jatropha curcas*).

Tabla 7. Relación de especies oleaginosas cultivadas a nivel mundial (SAGARPA, 2011).

Cultivo	Parte oleaginosa	Contenido de aceite (%)	Principales países productores
Higuerilla	Semilla	26 - 66	India, China, Brasil, Paraguay.
Girasol	Semilla	45 - 55	Federación de Rusia, Ucrania, Argentina. China, Francia, Estados Unidos.
Canola	Semilla	40 - 44	China, India, Alemania, Canadá, Francia.
Soya	Semilla	18 - 20	Brasil, Argentina, China, India.
Palma aceitera	Pulpa del fruto y semilla	Pulpa: 45 - 55 Semilla: 44 - 57	Malasia, Nigeria, Tailandia, Colombia, Ecuador.
Algodón	Semilla	18 - 25	India, china, Estados Unidos, Pakistán, Uzbekistán, Brasil.
Coco	Pulpa del fruto del cocotero (copra)	65 - 75	Filipinas, Tailandia, India, Brasil.
Cacahuete	Semilla	48 - 50	China, India, Estados Unidos, Senegal.
Cártamo	Semilla	35 - 40	India, Estados Unidos, Argentina, Australia.
Piñón mexicano	Semilla	20 - 60	India, Ghana, Brasil.

Fuente: SAGARPA, 2011.

En la tabla 8 se muestra el rendimiento del cultivo, el rendimiento de aceite y el rendimiento de biodiesel que se produce con cada uno de los cultivos que se describen: higuerilla (*Ricinus communis*), palma aceitera (*Elaeis guineensis*), coco (*Cocos nucifera*),

tung (*Aleurites fordii*), piñón mexicano (*Jatropha curcas*), colza (*Brassica napus*), cacahuete (*Arachis hypogaea*), girasol (*Helianthus annuus*) y soya (*Glycine max*).

Tabla 8. Rendimiento de aceite por especie (SAGARPA, 2011).

Especie	Rendimiento (kg ha-1)	Rendimiento de aceite (kg ha-1)	Rendimiento de aceite (L ha-1)	Rendimiento de biodiesel (Lha-1)
Higuerilla ( <i>Ricinus communis</i> )	2060	1133	1211	1151
Palma aceitera ( <i>Elaeis guineensis</i> )	12246	5511	5925	5688
Coco ( <i>Cocos nucifera</i> )	4645	3019	3431	3294
Tung ( <i>Aleurites fordii</i> )	2409	1204	1384	1329
Piñón ( <i>Jatropha curcas</i> )	1900	950	1058	1015
Colza ( <i>Brassica napus</i> )	2081	832	895	859
Cacahuete ( <i>Arachis hypogaea</i> )	1582	712	765	735
Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> )	1419	568	610	586
Soya ( <i>Glycine max</i> )	1677	335	365	350

Fuente: SAGARPA, 2011.

## Discusión

- *Crecimiento de higuera*

### *Etapas fenológicas del cultivo (figura 8)*

Los manuales del cultivo de la Higuera realizados por INIFAP (Rico, *et al.*, 2011; González *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2012 y Mercado *et al.*, 2014) respecto a las etapas fenológicas exponen lo siguiente (figura 8). Hernández *et al.*, 2012, señala que en base a diferentes experimentos de componentes tecnológicos se logró entender las etapas fenológicas del cultivo de la Higuera y su respuesta a los diversos factores controlables de la producción, las cuales se detallan en la tabla 1.

Según Rico *et al.*, 2011, la plántula emerge a los 15 días después de la siembra, la cosecha se da entre los 120 a 150 días después de la siembra. Por otra parte, para Mercado *et al.*, 2014, la madurez del fruto o cosecha se da entre los 145 a 210 días posteriores a la siembra. En cambio, González *et al.*, 2011 afirma que la germinación ocurre entre los 8 y 12 días después de sembrado y la cosecha se inicia entre los 120 a 150 días después del sembrado.

Cabe señalar que los días después de siembra para germinación y cosecha entre estos autores y los resultados de la presente investigación, varían entre sí ya que los experimentos se dieron en sitios con condiciones ambientales diferentes como el tipo de suelo, clima, humedad, horas de luz, entre otros; además de la variedad de híbridos evaluados y el paquete tecnológico desarrollado.

### *Germinación: Análisis estadístico*

De los valores del porcentaje de germinación (a los 30 días) sometidos a la prueba de Tukey (HSD) ( $p \leq 5\%$ ) en relación con los tratamientos (figura 12), se identifican dos rangos de significación, reportando el tratamiento de 1500 mg/L de SDT el mayor valor con 78.33% de germinación, el cual estadísticamente resulta similar a los tratamientos de 1000, 2000 y 2500 mg/L de SDT. El menor valor correspondió al tratamiento de 3000 mg/L de SDT con 67.08% de germinación, resultados que estuvieron determinados por la concentración de salinidad en el agua de riego.

Figura 12. Porcentaje de germinación según tratamiento.

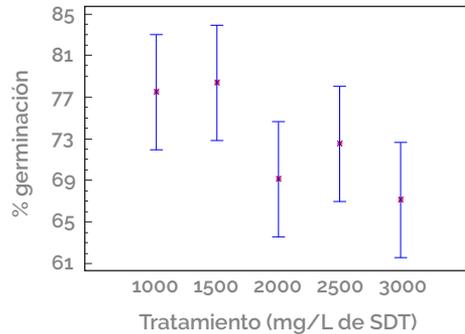
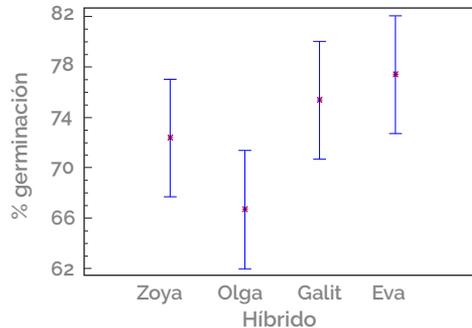


Figura 1. Benjumea, P. et al. (2009) Tipos de catalizadores para la reacción de transesterificación.

De los valores del porcentaje de germinación (a los 30 días) sometidos a la prueba de Tukey (HSD) ( $p \leq 5\%$ ), en relación a los híbridos (figura 13), se identifican dos rangos de significación, reportando el híbrido Eva 855 el mayor valor con el 77.33% de germinación, el cual estadísticamente resulta similar a los híbridos Zoya 856 y Galit K-93. El menor valor correspondió al híbrido Olga 864 con 66.67% de germinación, resultados que estuvieron determinados por las características genéticas propias de cada híbrido.

Figura 13. Porcentaje de germinación según híbrido.



En Cuba (Machado *et al.*, 2012), caracterizaron la procedencia de cinco variedades de Higuierilla, donde los resultados del experimento arrojaron un porcentaje de emergencia de la plántula desde los siete hasta los 56 días posteriores a la siembra, en un rango de 50% a 66.6 %. Por su parte (González *et al.*, 2011) en Jalisco, México, señalan que, en variedades de porte enano, porte bajo y porte normal, en condiciones de densidad

de siembra recomendados, tienen un mínimo de germinación del 85%. En relación a la variabilidad de estos resultados, se deben a las características propias de cada variedad de las semillas, clima y zona donde se realizó el estudio.

### *Rendimiento de higuierilla*

El cultivo presentó un rendimiento de 2.5 ton/ha, el cual es mayor, a lo reportado por SAGARPA en 2011, que indica que el rendimiento del cultivo de higuierilla es de 2.06 ton/ha.

- *Calidad del agua*

### *Concentración de SDT en las tres corrientes de agua: alimentación, producto y rechazo*

Se puede deducir a partir de la figura 13 que el promedio de SDT contenidos en el agua de alimentación es de 3873.70 mg/L, el agua producto contiene en promedio 294.82 mg/L de SDT y la corriente de rechazo presentó 10 958.63 mg/L de SDT. Esto indica un 92% de remoción de SDT en el agua producto. Según informes de (Medina, 2000) y (Valero *et al.*, 2001), el agua de alimentación se clasifica como agua salobre (agua de 1000 -10 000 mg/L de SDT), el rechazo como agua salina (agua de 10 000 a 30 000 mg/L de SDT) y el permeado (o agua producto) está en el rango de agua dulce (agua con concentración menor a 1000 mg/L de SDT).

### *Agua de riego*

En relación a los lineamientos de calidad del agua para uso agrícola, (CONAGUA, 2016) señala parámetros de pH (6-9), OD (-), temperatura (-), y SDT en mg/L (500 -1000 para cultivos sensibles, de 1000 - 2000 manejo especial y 2000 - 5000 para cultivos tolerantes. A este respecto los parámetros de calidad del agua permeada y del agua producto con el cual fue regado el cultivo de Higuierilla estudiado, quedan establecidos dentro de dichos rangos.

### *Cantidad de agua producto utilizada*

En el periodo de operación de la planta desalinizadora utilizada para la obtención de agua producto que suministró los cinco tratamientos fue del 12 de febrero al 18 de junio

del año 2016, reportando 118 tanques preparados (5000 L) para cada tratamiento, lo que equivale a 590 000 L y sumados los volúmenes de los 5 tratamientos arroja un total de 2 950 000 L. Para cada tratamiento, durante el primer bimestre se suministraron 46 tanques, en el segundo bimestre 68 y ya en el tercer bimestre cuatro tanques (tabla 6).

### *Lámina de riego total suministrada*

Teniendo en cuenta que se prepararon en total 2 950 000 L de agua producto y que un milímetro de agua entre una hectárea de terreno equivale a 10 metros cúbicos de agua ( $1\text{mm} = 10 \text{ m}^3/\text{Ha} = 1 \text{ L}/\text{m}^2$ ) se tiene que la lámina de riego total entregada en el terreno experimental es de 29.50 cm y lámina efectiva en surcos de 39.13 cm.

#### • *Bioenergéticos*

Como se observa en la tabla anterior (tabla 7) la parte oleaginoso de la higuierilla se encuentra en su semilla, la cual contiene del 26% al 66% de aceite que puede ser extraído para el desarrollo de biocombustibles, los cuales no tienen impactos negativos al medio ambiente y reducen las emisiones netas de gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo, se verá reflejado un aumento en la productividad agrícola.

Como se puede observar en la tabla 8, el cultivo de higuierilla genera un rendimiento de 2060 kg/ha. El 55% de esta cantidad es aceite (1133 kg/ha), lo cual equivale a un rendimiento de 1211 L/ha de aceite. Posteriormente el biodiesel se obtiene mediante la reacción del aceite vegetal (en este caso aceite de higuierilla o también conocido como aceite de ricino), con un alcohol de bajo peso molecular, todo esto en presencia de un catalizador. El rendimiento de biodiesel que se produce a partir el aceite de higuierilla es de 1151 L/ha. Es decir, un 95% de conversión. Por lo que lo hace un proceso viable y rentable para el sector agrícola e industrial. La principal ventaja de la economía de producción de biodiesel se encuentra en las materias primas.

## **Conclusiones**

Se cumplió con el objetivo del proyecto, al evaluar el rendimiento del cultivo de higuierilla mediante un proceso de desalinización por ósmosis inversa para su empleo como energía alternativa. El cultivo presentó un rendimiento de 2.5 ton/ha.



El pH del agua de riego se mantuvo entre 7.04 y 7.63, estos valores se encuentran dentro del rango óptimo reportado por CONAGUA (pH= 6 - 9). Se regó con cinco tratamientos diferentes de concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT), que variaron de 1000 mg/L a 3000 mg/L, las variaciones de concentración de SDT en el agua de riego, no presentaron algún impacto negativo en el rendimiento del cultivo. Por lo que se puede considerar, que la higuera es un cultivo tolerante a la salinidad. Se recomienda regar el cultivo de higuera con concentración mayor a 2000 mg/L de SDT, para aprovechar pozos abandonados que presentan similar salinidad.

Durante todo el proyecto, se prepararon 2950 m<sup>3</sup> de agua para riego. Por lo que la lámina de riego total entregada en el terreno experimental fue de 29.50 cm y la lámina efectiva por surco fue de 39.13 cm.

## Referencias

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2009). *Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico*. Recuperado de [http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/documents/proinbios\\_20091013.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/documents/proinbios_20091013.pdf)
- Benavides, A., Benjumea, P., & Pashova, V. (2007). *El biodiesel de aceite de higuierilla como combustible para motores diesel*. DYNA, 15.
- Hernández, M., Zamarripa, A., Teniente, R., & Solis, J. L. (2012). *Guía Técnica para la producción de la Higuierilla (Ricinus Communis L.) en Guanajuato*. Celaya: inifap.
- Fernández, V. A., & Mendoza, M. (2012). Aprovechamiento de la Higuierilla (Ricinus Communis) para uso bioenergético. En C. N. (CONABIO), *La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado* (págs. 234-240). México: Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2013). *Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos*. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Estrategiabioenergeticos.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations Statics Division. (2016). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de fao.org: <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>
- Rico, H., Tapia, L., Teniente, R., González, A., Hernández, M., Solis, j., & Zamarripa, A. (2011). *Guía para cultivar higuierilla (Ricinus communis L.) en Michoacán*. Michoacán: INIFAP.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). *Guía técnica para la producción de higuierilla (Ricinus communis L.) en Guanajuato*. Recuperado de <http://www.bioenergeticos.gob.mx/wp-content/uploads/2015/08/guia-tecnica-para-la-produccion-de-higuierilla-en-guanajuato.pdf>
- Notimex. (25 de Diciembre de 2015). *Milenio diario, S. A. de C. V.* Obtenido de Milenio: [http://www.milenio.com/estados/aceite\\_de\\_resino-aceite\\_para\\_el\\_estomago-aceite\\_productores\\_0\\_652734751.html](http://www.milenio.com/estados/aceite_de_resino-aceite_para_el_estomago-aceite_productores_0_652734751.html)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2011). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura*. ISBN FAO: 978-92-5-306614-8. Recuperado de <http://www.fao.org/3/b-i1688s.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México, D.F.: CONAGUA.

- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Estadísticas del Agua en México*. México, D. F. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- González, R., León, K., Dévora, G., & Mendoza, A. (2009). *Funcionamiento y contaminación generada por plantas desalinizadoras ubicadas en las zonas del mar de Cortés y mar Caribe: un estudio para el desarrollo de normatividad ambiental acuática*. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5 (2), 186-197.
- Dévora, G. (16 de julio de 2015). *Desalinización, una alternativa tecnológica para la agricultura*. (C. Baez, Entrevistador) México, D. F.: Agencia Informativa Conacyt. Obtenido de Conacyt Prensa: [www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/2185-nota-desalinizacion-una-alternativa-tecnologica-para-la-agricultura](http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/2185-nota-desalinizacion-una-alternativa-tecnologica-para-la-agricultura)
- Valencia, J. (2016). *Crean en el ITSON tecnología para contrarrestar intrusión salina*. *Sonora Es...*, 18.
- Robles, A. (2015). *Plan de manejo de vertido de salmuera para planta desalinizadora en el Valle del Yaqui*. Tesis inédita. ITSON. Cd. Obregón, Sonora, México.
- González, A., García, K., Hernández, M., Héctor, R., Hernández, M., Solís, J., & Zamarripa, A. (JUNIO de 2011). *Guía para cultivar higuierilla (Ricinus communis L.) en Jalisco*. 15. Tepatlán de Morelos, Jalisco, México: INIFAP.
- Mercado, R., Martínez, E., & Zarazua, M. (noviembre de 2014). *Tecnología de producción de higuierilla en el Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México*: INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro Campo Experimental Hidalgo.
- Machado, R.; Suárez, J. & Alfonso, Marlen. (2012). *Caracterización morfológica y agroproducción de procedencias de Ricinus communis L. para la producción de aceite*. *Pastos y Forrajes*. 35 (4):381-392.
- González, A., García, K., Hernández, M., Héctor, R., Hernández, M., Solís, J., & Zamarripa, A. (JUNIO de 2011). *Guía para cultivar higuierilla (Ricinus communis L.) en Jalisco*. 15. Tepatlán de Morelos, Jalisco, México: INIFAP.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/leyfederaldederechos.pdf>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2011). *Calidad físicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México*. Folleto Técnico No.24 - ISBN: 978-607-425-650-5. Recuperado de <http://www.bioenergeticos.gob.mx/wp-content/uploads/2015/06/calidad-fisicoquimica-de-insumos-bioenergeticos-para-la-produccion-de-biodiesel-en-mexico.pdf>
- Medina, J. A. (2000). *Desalación de aguas salobres y de mar, ósmosis inversa*. Editorial Mundi Prensa, Madrid, España 799 pp.



Valero, A., Uche, J., Serra, L. (2001). La Desalación como alternativa al plan hidrológico nacional. Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), España. 1-108 pp.



# Producción de biodiesel a partir de aceites comestibles usados

*Rocío Arellano Ramírez,<sup>1</sup> Bertha Campos López, Evelyn Castañeda Villa, María Fernanda Valle Vargas.*

## Resumen

El aceite usado de cocina es actualmente una de las principales causas de contaminación de aguas residuales. Un solo litro de aceite usado puede contaminar hasta mil litros de agua potable<sup>1</sup>.

Industrialmente suele reciclarse para producir biodiesel. El biodiesel es un combustible de naturaleza renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales, que puede ser utilizado como combustible a través de la transesterificación (reacción de ácidos grasos con el alcohol para producir éster metílico). Además de formarse el biodiesel, se forma un subproducto, que es el glicerol o glicerina, que puede utilizarse en otros productos.

Para la producción de biodiesel se preparó una solución de metóxido, se midieron 200 ml de metanol y 3.5 g de NaOH, se agito hasta disolver el NaOH, se procedió a calentar el aceite tanto nuevo como usado a 50 °C y 60 °C para establecer a que temperatura y en que aceite se obtenía un mayor rendimiento. Llegando a esta temperatura se vertió el metóxido con mucho cuidado y se mezcló durante 20 o 30 minutos aproximadamente. Se traspasó a un recipiente y se dejó en reposo por siete días.

La determinación del rendimiento de biodiesel se obtuvo a partir de la medición del volumen total de la mezcla de reacción (catalizador + aceite) respecto del volumen

<sup>1</sup> Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Departamento de química en Blvd. Marcelino García Barragán No. 1451, Guadalajara, Jalisco, México. evelyncv1196@gmail.com

obtenido de la fase liviana (superior), luego del proceso de transesterificación, y decantación. Los resultados obtenidos fueron para aceite nuevo a 50 °C un rendimiento promedio de 87.05% de biodiesel con 29.80 gr promedio de glicerina, de aceite reciclado a 50°C un rendimiento promedio de 84.15% de biodiesel con 16.28 gr de glicerina, de aceite nuevo a 60 °C un rendimiento promedio de 85.8% de biodiesel con 11.194 gr de glicerina y aceite reciclado a 60 °C un rendimiento promedio de 87.05% biodiesel con 15.31 gr de glicerina.

Para la caracterización del biodiesel se midió la corrosión a la lámina de cobre, que consistía en sumergir una lámina de cobre en el biodiesel a una temperatura de 100 °C por tres horas, con el fin de detectar la presencia de ácidos o de compuestos azufrados que podrían deteriorar la lámina de cobre, indicando posibilidad de ataque corrosivo, el resultado de la corrosión obtenida está dentro del margen máximo de la norma europea ISO 2160.

### **Antecedentes**

El aceite de cocina es grasa de origen animal o vegetal que suele permanecer en estado líquido a temperatura ambiente (Gobierno de España, 2016).

Algunos de los muchos tipos de aceites vegetales son; de oliva, de palma, de soja, de colza, de semilla de calabaza, de maíz, de girasol, de cártamo, de cacahuete, de semilla de uva, de sésamo, de argán, de salvado de arroz y se usan para cocinar junto con otros elementos comestibles (Gobierno de España, 2016).

En cocina, el término genérico «aceite vegetal» se usa para etiquetar un producto compuesto por un aceite concreto (Gobierno de España, 2016).

El aceite puede aromatizarse sumergiendo en él hierbas frescas, pimienta, ajo y otros condimentos durante un periodo de tiempo (Gobierno de España, 2016).

Calentar un aceite cambia sus características. Algunos aceites que son saludables a temperatura ambiente pueden volverse perjudiciales cuando se calientan por encima de ciertas temperaturas. Al elegir un aceite para cocinar, es por tanto importante tener en cuenta su tolerancia al calor, y usar el adecuado para el uso que vaya a dispensársele (Gobierno de España, 2016).

## Almacenaje y conservación del aceite

No todos los aceites son sensibles al calor, la luz y la exposición al oxígeno. Todos los aceites deberían guardarse en el frigorífico o en un lugar seco y fresco. Los aceites pueden espesar, pero recuperan su fluidez si se dejan reposar a temperatura ambiente. Para evitar los efectos negativos del calor y la luz, los aceites deben sacarse de su lugar de almacenaje solo el tiempo imprescindible para su uso. Los aceites refinados ricos en grasas monoinsaturadas aguantan hasta un año (si son de oliva, hasta varios años), mientras los ricos en grasa poliinsaturadas se conservan unos seis meses (Gobierno de España, 2016).

Los aceites de oliva virgen y extra virgen se conservan un mínimo de nueve meses tras la apertura del envase. Otros aceites monoinsaturados se conservan bien hasta ocho meses, mientras los aceites poliinsaturados sin refinar solo aguantan aproximadamente la mitad. (Gobierno de España, 2016).

### Aceite de cocina usado

El residuo aceite usado de cocina, o RAUC por sus siglas en español, es en la actualidad una de las principales causas de contaminación de las aguas residuales urbanas, ya que en general una vez utilizados, se vierten por el desagüe a la red de alcantarillado, contaminando el medio ambiente, produciendo atascos y malos olores en las cañerías y una gran cantidad de problemas ambientales (RBU, 2015).

El desecho adecuado del aceite de cocina usado es una importante preocupación en la gestión de residuos. El aceite es más ligero que el agua y tiende a esparcirse en grandes membranas finas que dificultan la oxigenación del agua. Debido a ello, un solo litro de aceite puede contaminar hasta mil litros de agua. Además, el aceite puede solidificarse en las tuberías provocando atascos. Debido a ello, el aceite de cocina nunca debe desecharse por el fregadero o el retrete (RBU, 2015). La forma adecuada de desechar el aceite usado es depositarlo en un envase sellado no reciclable y tirarlo junto con la basura normal, o bien, desecharlo en un punto limpio. Industrialmente suele reciclarse para producir jabón y biodiesel (RBU, 2015).

## ¿Cuánto y dónde se genera?

Anualmente se consumen unas 850 000 Tm (tonelada métrica) de aceite en España (Fuentes: MARM y Asociación Nacional de Industriales Envasadores y Refinadores de Aceites Comestibles –Anierac-) y tan solo en la Ciudad de México en el 2014 existían 1865 restaurantes y estos generaban desecho de aceite comestible vegetal con un potencial de entre 81 y 106 000 litros al mes. De acuerdo con los actuales hábitos culinarios y de consumo, se estima que pueden generarse unos 150 millones de litros anuales de aceite vegetal usado (Fuentes: Eroski consumer, GEREGRAS, MARM) (RBU, 2015).

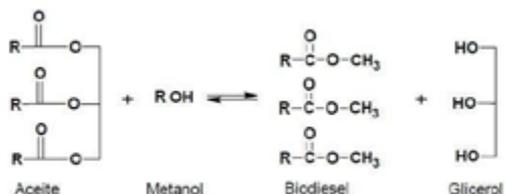
## Biodiesel a partir de aceite usado

El biodiesel es un combustible de naturaleza renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales y que puede ser utilizado en motores de ignición por compresión (Diesel) (UNAM, 2012).

Este concepto de biodiesel, se originó en 1912, por Rudolf Diesel, siendo este, el inventor del primer motor diésel, el cual publicó que “el uso de aceites vegetales para combustibles de motor, puede parecer insignificante hoy, pero ese aceite puede llegar a ser, con el paso del tiempo, muy importante como el petróleo o algunos materiales usados actualmente” (UNAM, 2012).

Se han realizado métodos o procesos para desarrollar biodiesel a partir de los desechos de aceite comestible, y este combustible se realiza a través de un proceso químico, la transesterificación (UNAM, 2012).

Tal proceso trata de que, el aceite orgánico es mezclado o combinado con alcohol, siendo este alterado para formar éster metílico nombre que se le da al biodiesel, en este caso. Además de formarse aparte el biodiesel, se forma un subproducto, que es el glicerol o glicerina (UNAM, 2012).



Triglicérido (aceite usado) + metóxido de sodio → éster metílico (biodiesel) + glicerina



Las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son:

La calidad de la materia prima, el tipo y la cantidad de alcohol empleado, la transferencia de masa durante la reacción, el sistema catalítico y las condiciones de reacción; temperatura, presión y agitación (UNAM, 2012)

El tema de biodiesel ha obtenido demasiado interés, como un combustible alternativo, debido a la disminución del impacto ambiental que generan estos desechos al medio ambiente (UNAM, 2012).

Se han implementado más estas técnicas, por la alta presencia de problemas como lo son, cambios climáticos, agotamiento de fuentes orgánicas, el efecto invernadero, entre otros problemas (UNAM, 2012).

Tipo de catalizador			Ejemplos
Catalizadores químicos	Básicos	Homogéneos	Hidróxidos de metales Alcalinos, MOH Alcoóxidos de metales Alcalinos R OM Bases orgánicas fuertes (alquilguanidina)
			NaOH, KOH CH <sub>3</sub> -ONa CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -OK TBD (1,1,3,3-tetrametilguanidina)
		Heterogéneos	Carbonatos y óxidos de metales alcalinos o alcalinotérreos
			Óxidos de metales alcalinos o alcalinotérreos y metales de transición
			Hidróxidos de metales alcalinotérreos
			Metales alcalinos, hidróxidos o sales soportadas en alúmina
			Resinas de intercambio iónico
			K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Ca <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> CaO.MgO CaO SrO BaO  CaTiO <sub>3</sub> CaMnO <sub>3</sub> Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaZrO <sub>3</sub> CaO-CeO <sub>2</sub>  Ba(OH) <sub>2</sub>  NaOH/ γAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Na / NaOH / γAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> KNO <sub>3</sub> / γAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . KI / γAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  Resinas aniónicas de bases fuertes

**Fuente:** Biodiesel Producción, calidad y caracterización. (Echeverría, 2013).

### Beneficios:

- Reciclar este residuo para transformarlo en un biocombustible.
- Reducir los costos de potabilización del agua que tomamos.

- Disminuir las inundaciones en nuestras casas y calles, ya que el RAUC es uno de los principales elementos que tapan los caños y las cloacas.
- Fomentar el acopio de residuos de aceite usado en nuestro centro universitario, para posteriormente comercializar este residuo como materia prima para la producción de Biodiesel.
- Evitar que el aceite pueda ser reutilizado irresponsablemente para producir alimentos que dañan la salud de quienes los consumen.
- Minimizar la contaminación ambiental y sus efectos en el cambio climático. (RBU, 2015).

### **Justificación**

El presente proyecto se enfoca en la utilización de aceites comestibles para la elaboración de biodiesel como una alternativa del uso de combustibles fósiles, ya que la quema de estos ha colaborado en el llamado efecto invernadero, provocando cambios climáticos y la erosión del suelo, ya que un alto porcentaje de este aceite es vertido por el desagüe a la red de alcantarillado, contaminando el medio ambiente, produciendo atascos, malos olores en las cañerías y una gran cantidad de problemas ambientales de los que resalta la contaminación del agua, ya que un litro de aceite contamina mil litros de agua, atentando así contra la flora y fauna del ecosistema. Por eso, se pretende reciclar los residuos de aceite para darles un manejo adecuado y benéfico para el medio ambiente a partir de un proceso químico y así obtener biodiesel, mismo que al ser utilizado como combustible no aporta nuevos gases de efecto invernadero a la atmósfera.

### **Objetivos**

1. Utilizar aceite usado para evitar la contaminación de suelo y agua.
2. Obtención de biodiesel de buena calidad a partir del aceite usado y nuevo determinando las condiciones óptimas para su producción.

## Metodología

En base al procedimiento descrito previamente en antecedentes, basado en investigaciones realizadas en la feria de ciencias de la UNAM; se llevó a cabo la experimentación de la realización de biodiesel a partir de aceite comestible (UNAM, 2012). Se probará con dos distintos tipos de aceite. El aceite comercial Cristal® y un residuo de aceites usado de la misma marca comercial, a dos temperaturas (50 °C y 60 °C) cercanas al punto de ebullición del alcohol utilizado, en este caso metanol, necesarias para que se lleve a cabo la reacción de transesterificación. El aceite empleado para este procedimiento fue un aceite marca Cristal® es un aceite vegetal, el cual contiene varios aceites vegetales como lo son: canola, soya, girasol y cártamo.

El proceso que se llevó a cabo es el siguiente (UNAM, 2012):

1. Preparación del Metóxido. (UNAM, 2012).

1.1 Se miden 200 ml de metanol y se vierten con un embudo dentro del recipiente de HDPE de medio litro.

1.2 Con un segundo embudo en la mezcla anterior, se vierten 3,5 g de hidróxido de sodio (NaOH).

1.3 Se agita la botella unas pocas veces, de lado a lado. La botella se calienta durante la reacción. Se agita bien durante un minuto, a intervalos de cinco o seis minutos, el hidróxido de sodio se disuelve en el metanol formando metóxido de sodio.

2. Reacción. (UNAM, 2012).

2.1 Calentar el aceite a 50 °C - 60 °C y se vierte dentro de la batidora.

2.2 Con la máquina aún parada, vierte el metóxido con mucho cuidado.

2.3 Mezclar durante 20 o 30 minutos aproximadamente.

3. Trásvase. (UNAM, 2012).

3.1 Verter la mezcla en una de las botellas de dos litros y cerrarla.

4. Separación. (UNAM, 2012).

4.1 Dejarlo reposar siete días aproximadamente.

4.2 La glicerina formará una capa oscura en el fondo claramente separada de la capa de biodiesel que flota encima, de color claro.

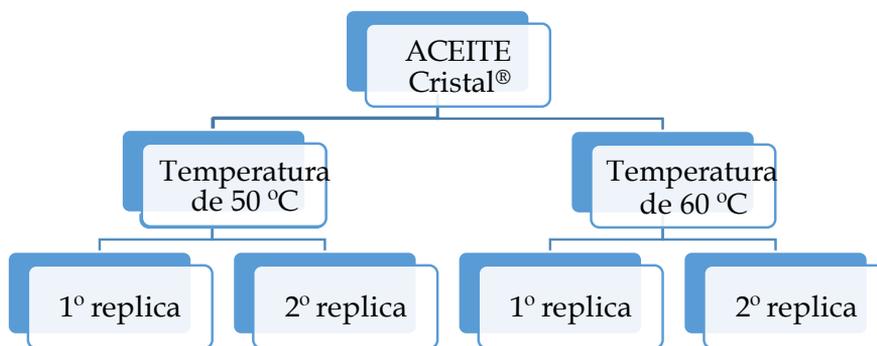
4.3 Decantar el biodiesel cuidadosamente en un frasco limpio o en una botella de plástico, evitando que entre glicerina en el nuevo recipiente.

5. Para probar el biodiesel hecho, como prueba de caracterización, se optó por usarlo en una lámpara de alcohol y en algunos mecheros que se realizaron. Sin embargo, pueden variar las cantidades, en los gramos del catalizador y en el tiempo en que se calentará por cuestiones del tipo de aceite utilizado.

### Marco Geográfico Temporal

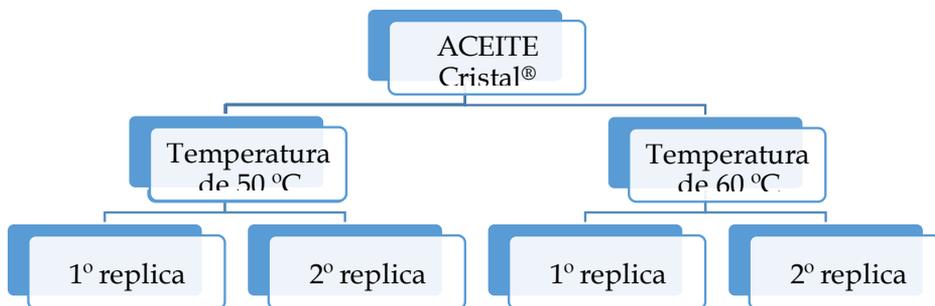
La experimentación se realizó en el Laboratorio de Análisis Cuantitativo, se encuentra dentro del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, CUCEI, ubicado en Blvd. Marcelino García Barragán No. 1451. Guadalajara, Jalisco, México. Se realizaron ocho réplicas experimentales, de los dos tipos de aceites a dos temperaturas (50 °C y 60 °C), realizando dos réplicas para cada temperatura.

Gráfico 1. Procedimiento realizado con el aceite nuevo, a dos temperaturas.



Fuente: UNAM, 2012.

Gráfico 2. Procedimiento realizado con el aceite usado, a dos temperaturas.



Fuente: UNAM, 2012.

Las cantidades que se utilizaron para cada tipo de aceite son las siguientes:  
Primer aceite (Aceite Cristal® nuevo) a 50 °C.

- 3.5 g de sosa caustica se mezcló con 200 mL de metanol (para formar el metóxido de sodio).
- 1000 mL de aceite.
- Se calentó el aceite hasta llegar a la temperatura (50 °C).
- Se mezcló poco a poco el metóxido de sodio con el aceite previamente llevado a la temperatura de 50 °C.
- 30 minutos batiendo el metóxido con el aceite.
- Reposo por siete días.

**2.** Primer aceite (Aceite Cristal® nuevo) a 60 °C.

- 3.5 g de sosa caustica se mezcló con 200 mL de metanol (para formar el metóxido de sodio).
- 1000 mL de aceite.
- Se calentó el aceite hasta llegar a la temperatura de 60 °C.



- Se mezcló poco a poco el metóxido de sodio con el aceite previamente llevado a la temperatura de 60 °C.

- 30 minutos batir el metóxido con el aceite

- Reposo por siete días.

**3.** Residuo de aceite usado de cocina (RAUC). En este caso marca Cristal<sup>®</sup>, a 50 °C.

- 3.5 g de sosa caustica se mezcló con 200 mL de metanol (para formar el metóxido de sodio).

- 1000 mL de aceite.

- Se calentó el aceite a 50 °C aproximadamente.

- Se mezcló poco a poco el metóxido de sodio con el aceite previamente llevado a la temperatura de 50 °C.

- 30 minutos de batir el metóxido con el aceite.

- Reposo por siete días.

**4.-** Residuo de aceite usado para cocina (RAUC). En este caso marca Cristal<sup>®</sup> a 60 °C

- 3.5 g de sosa caustica se mezcló con 200 mL de metanol (para formar el metóxido de sodio).

- 1000 mL de aceite.

- Se calentó el aceite a 60 °C aproximadamente.

- Se mezcló poco a poco el metóxido de sodio con el aceite previamente llevado a la temperatura de 60 °C.

- 30 minutos de batir el metóxido con el aceite.

- Reposo por siete días.

Para el diseño de experimentos se empleó, un diseño multifactorial, ya que la experimentación consta de dos factores, de los cuales cada uno tiene distintos valores, y unidades experimentales. Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre

factores sobre dicha variable. Para llevar a cabo este diseño multifactorial, se empleó en programa Statgraphics Centurion 16.103 en español.

### Hipótesis de la parte experimental

H<sub>0</sub>: El rendimiento obtenido de biodiesel no depende del tipo de aceite.

H<sub>a</sub>: El rendimiento obtenido de biodiesel depende del tipo de aceite.

H<sub>0</sub>: La temperatura no influye en el rendimiento obtenido de biodiesel.

H<sub>a</sub>: La temperatura si influye en el rendimiento obtenido de biodiesel.

### Resultados Estadísticos

#### *Determinación del rendimiento de biodiesel*

Se obtuvo a partir de la medición del volumen total de la mezcla de reacción (catalizador + aceite) respecto del volumen obtenido de la fase liviana (superior), luego del proceso de transesterificación y decantación.

Tabla 1. Resultados de los dos subproductos de la reacción de transesterificación del metóxido de sodio con el aceite comestible (biodiesel y glicerina).

Tipo de aceite	Temperatura(C°)	Biodiesel rendimiento (%)	Gramos de glicerina
Reciclado	50	83.3	13.4749
Reciclado	50	85	19.0984
Reciclado	60	86.6	18.5279
Reciclado	60	87.5	12.0998
Nuevo	50	86.6	45.0056
Nuevo	50	87.5	14.5964
Nuevo	60	85	6.9603
Nuevo	60	86.6	15.4277

**Fuente:** Tabla elaborada a partir de los resultados de esta experimentación (2016).

ANOVA Multifactorial - RENDIMIENTO \_%\_

Variable dependiente: RENDIMIENTO \_%\_

Factores:

TEMPERATURA \_C°\_

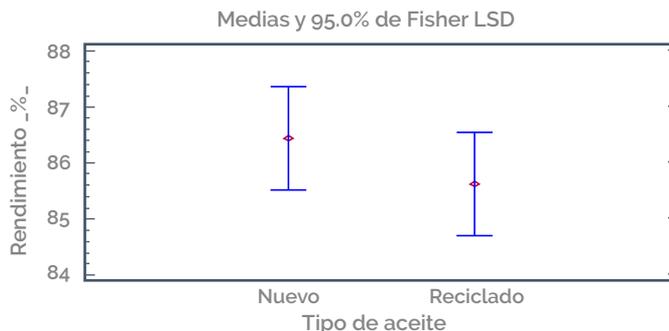
TIPO DE ACEITE

Número de casos completos: 8

El StatAdvisor

Análisis de Varianza para RENDIMIENTO \_%\_ - Suma de Cuadrados Tipo III

Gráfico 2. Medias de LSD.



**Fuente:** Elaborado a partir de los resultados de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion (2016).

El gráfico de medias de LSD representa la diferencia entre las medias obtenidas por cada tipo de aceite nuevo y reciclado, así como la distribución de los rendimientos obtenidos, siendo mayor el rendimiento de aceite nuevo con una media de 86.4% en comparación con el 85.6% de aceite reciclado.

Tabla 2. ANOVA Biodiesel.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:temperatura _C°_	1.36125	1	1.36125	1.54	0.2824
B:tipo de aceite	1.36125	1	1.36125	1.54	0.2824
Interacciones					
ab	8.61125	1	8.61125	9.74	0.0355
Residuos	3.535	4	0.88375		
Total (corregido)	14.8687	7			

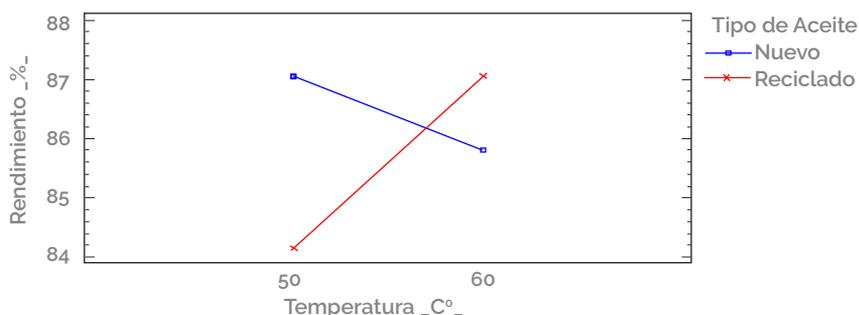
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

**Fuente:** Elaborada a partir de los resultados estadísticos de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion.

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de RENDIMIENTO %\_ en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P 0.2824 correspondiente a temperatura, 0.2824 a tipo de aceite y 0.0355 para temperatura y tipo de aceite, prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre RENDIMIENTO %\_ con un 95.0% de nivel de confianza.

Gráfico 3. Gráfica de interacciones rendimiento contra temperatura.



**Fuente:** Elaborado a partir de los resultados estadísticos de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion (2016).

Mayor rendimiento: aceite nuevo a 50 °C aceite reciclado a 60 °C además, se obtuvo un segundo subproducto: glicerina, para la cual se obtuvieron mayor cantidad de gramos a temperatura de 50 °C para aceite nuevo y aceite usado.

ANOVA Multifactorial - GRAMOS DE GLICERINA

Variable dependiente: GRAMOS DE GLICERINA

Factores:

TEMPERATURA \_C°\_

TIPO DE ACEITE

Número de casos completos: 8

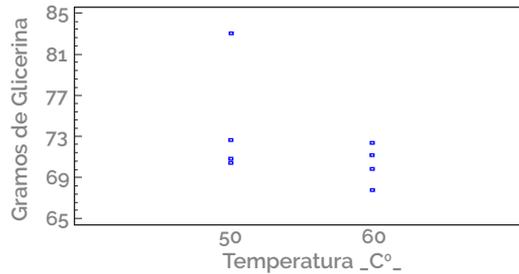
El StatAdvisor

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para GRAMOS DE GLICERINA. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si

es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permiten identificar los factores significativos.

Análisis de Varianza para GRAMOS DE GLICERINA - Suma de Cuadrados Tipo III.

Gráfico 4. Dispersión por código de nivel.



**Fuente:** Elaborado a partir de los resultados estadísticos de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion (2016).

Se representa la distribución de los gramos de glicerina obtenidos a las temperaturas de trabajo 50 °C y 60 °C, presentando una mayor dispersión de datos a temperatura de 50 °C.

Tabla 3. ANOVA Glicerina.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Temperatura _C°_	191.684	1	191.684	1.43	0.2972
B:Tipo de aceite	44.1283	1	44.1283	0.33	0.5964
Interacciones					
AB	155.483	1	155.483	1.16	0.3415
Residuos	534.68	4	133.67		
Total (Corregido)	925.975	7			

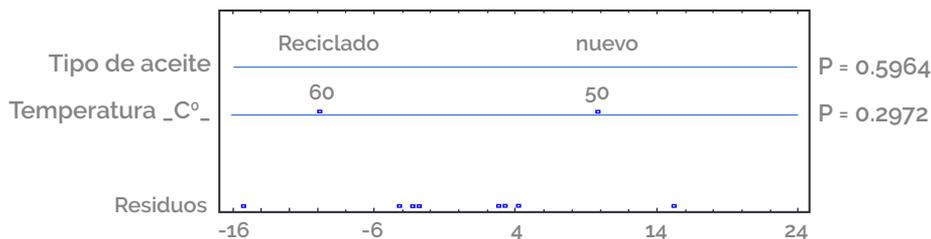
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

**Fuente:** Tabla elaborada a partir de los resultados estadísticos de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion (2016).

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de *gramos de glicerina* en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás

factores. Los valores-P 0.2972 correspondiente a temperatura, 0.5964 a tipo de aceite y 0.3415 para temperatura y tipo de aceite, prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores ó interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre *gramos de glicerina* con un 95.0% de nivel de confianza.



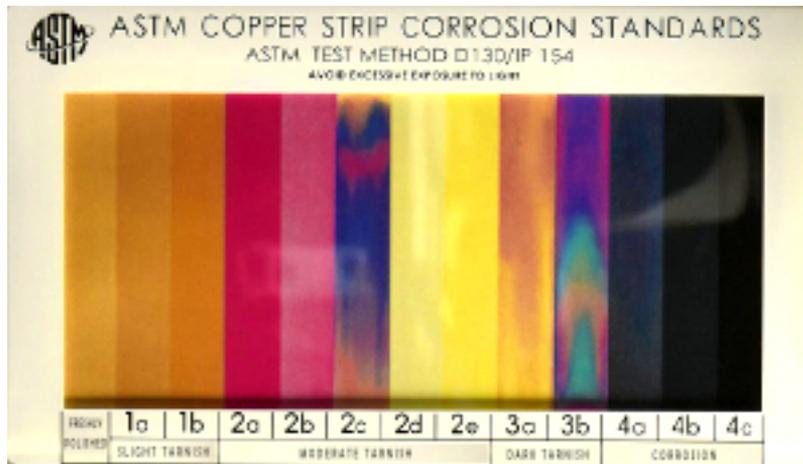
**Fuente:** Elaborado a partir de los resultados estadísticos de esta experimentación, por el programa Statgraphics Centurion (2016).

## Pruebas de Caracterización del Biodiesel

### Corrosión a la lámina de cobre

Este procedimiento se utiliza para determinar la acción corrosiva de los diferentes combustibles sobre algunas de las partes de los sistemas de inyección fabricadas en cobre. El ensayo consiste en introducir una tira de cobre pulido en una determinada cantidad de muestra, durante el tiempo (3 horas mínimo) y a la temperatura (100 °C) especificados para el producto que se ensaya; al final de este período de tiempo, la tira de cobre se saca, se lava y se compara con las tiras patrón ASTM D130 que se muestran en la figura: (Sánchez, 2012).

Figura 2. Sánchez,I.; Huertas,K. (2012)Láminas patrón para la norma ASTM D130.



Fuente: Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira.

Para la norma ASTM D130 el límite máximo es 3b (Clase 3b). Para la norma europea EN ISO 2160 el límite máximo es 1b (Clase 1b) en la escala mostrada. La presencia de ácidos o de compuestos azufrados podría deteriorar la lámina de cobre, indicando así, la posibilidad de ataque corrosivo (Sánchez, 2012).

### Combustión en papel

Esta prueba consistió en aplicarle a un trozo de papel periódico el biodiesel con mejores rendimientos, que en este caso fue el de aceite reciclado a una temperatura de 60 °C y se aplicó fuego al mismo, lo que sirvió de guía para corroborar que sí era biodiesel ya que al compararlo con un papel incendiado con fuego el papel repentinamente se convertía en cenizas, mientras que en el papel con biodiesel la combustión permanecía por más tiempo.

Figura. 3 Papel periódico con biodiesel haciendo combustión.



**Fuente:** Fotografía tomada el 15 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

### Luminosidad en lámpara de combustible líquido

Esta prueba consistió en agregarle a la lámpara el biodiesel para que la mecha absorbiera este y así se pudiera observar que la llama se quemará para dar iluminación pues la aparición de las primeras lámparas de este tipo se remonta a la época en que empezó a usarse comercialmente el petróleo (año 1859). Se presume que el primer fabricante fue Ignacy Łukasiewicz, un inventor polaco que adaptó lámparas que antiguamente funcionaban a base de aceite de ballena que, hasta esa época, mediados del siglo XIX, era el principal combustible para lámparas, material que fue completamente sustituido por el queroseno, más limpio, barato y seguro que el anterior.

A finales del siglo XIX, casi todas las formas de iluminación existentes dieron paso a las lámparas eléctricas incandescentes de manera generalizada. Sin embargo, en algunas zonas rurales se continúan empleando, de forma limitada, lámparas de queroseno o de gas incandescente. (León, 2007).

### Conclusión

La utilización y producción del biodiesel cumple un rol importante en cuanto al desarrollo de la sociedad ya que esta se encuentra estrechamente ligada al uso de los combustibles y, por ende, se muestra el biodiesel como sustituyente para el mejoramiento de la

calidad de vida y del ambiente. Además de que se encontró un mejor uso de los aceites usados, ya que la mayoría de las personas que desechan aceite después de cocinar no saben qué hacer con él y en ocasiones terminan desechándolos a la alcantarilla lo que provoca la contaminación del agua y del suelo.

Con este estudio se pudo determinar las condiciones adecuadas para llevar a cabo la producción de biodiesel a partir de aceites comestibles en especial los usados, y así obtener un mayor rendimiento. Se utilizó como base el artículo de la UNAM del 2012 de Producción de biodiesel a partir de aceite comestible usado, para la elaboración del biodiesel, en el cual nos indica que la temperatura que ellos utilizaron fue de 55 °C, así mismo concordamos con el artículo de CONACYT del año 2017 "La fórmula del éxito: biodiesel de bajo costo", en el que se reportó que la temperatura óptima para la elaboración de biodiesel es de 60 °C, misma que en nuestros estudios se obtuvo el mayor porcentaje de rendimiento siendo este de un 87.5%.

## Anexos

Figura 4. El procedimiento realizado, se introdujo el aceite a la temperatura deseada y el metóxido de sodio, agitando a una velocidad constante, llevando un control de la temperatura deseada.



**Fuente:** Fotografías tomadas el 07 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 5. Biodiesel a partir de aceite nuevo.



Figura 6. Biodiesel a partir de aceite usado.



**Fuente:** Fotografías tomadas el 14 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 7. Subproducto (glicerina), aceite nuevo.



Figura 8. Subproducto (glicerina), aceite usado.



**Fuente:** Fotografías tomadas el 14 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 9. Rendimiento de biodiesel, del aceite usado marca Cristal®



**Fuente:** Fotografías tomadas el 14 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 10. Material empleado para la producción de biodiesel a partir de aceite comestible.



---

**Fuente:** Fotografía tomada el 04 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 11. Procedimiento en la producción del biodiesel a partir del aceite comestible usado, marca Cristal®



---

**Fuente:** Fotografía tomada el 07 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

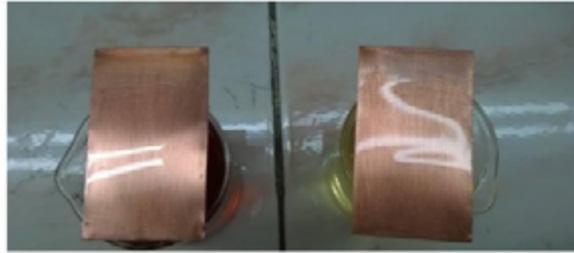
Figura 12. Comprobación de biodiesel a partir de aceite usado, con diésel normal, introduciendo placas de cobre, llevada a una temperatura aprox. de 100°C. Prueba cualitativa.



---

**Fuente:** Fotografía tomada el 25 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI)

Figura 13. Pasadas 3 horas, sumergida la placa de cobre en el biodiesel a partir de aceite usado y el diésel normal, no se notaron cambios.



---

**Fuente:** Fotografía tomada el 25 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Figura 14. Mecheros que se realizaron para la comprobación del biodiesel a partir de aceite usado y nuevo marca Cristal®, a las distintas temperaturas que fueron elaborados.



---

**Fuente:** Fotografía tomada el 29 de marzo del 2016 en el Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo ubicado en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

## Referencias

Pedro Nel Benjumea Hernández, John Ramiro Agudelo Santamaría. (2009). *Biodiesel: producción, calidad y caracterización*, GIMEL Ciencia y tecnología, Facultad de ingeniería de Antioquia: Editorial universidad de Antioquia. Pág.17-26.

Antonio Lucas Martínez. (2004) *Termotecnia básica para ingenieros químicos*. La Mancha, Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-. Pág. 59-62.

### Documentos electrónicos:

RBU Ambiental. (2015). *Aceites usados*. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://www.rba-ambiental.com.ar/aceite-de-cocina-usado/preguntas-frecuentes/>

Reoil México. (2010) Recolección de RAUC y Producción de Biodiésel. Challenge México. Recuperado de: <http://www.reoil.net/rauc.html>

Gobierno de España ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. (2016). *Aceites de cocina usados*. Recuperado de:<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/aceites-cocina/>

José Adolfo Echeverría-Vizcaya, José Hermilo Martínez-González, Omar Martínez-Álvarez, José Martín Medina-Flores, Héctor Hugo Rodríguez Santoyo, Beatriz Ruiz-Camacho, (2013). *Obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados y catalizadores básicos*. Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Guanajuato, Av. Universidad Norte. Recuperado de:

[https://www.google.com.mx/search?q=almacenamiento+y+conservacion+de+aceites&biw=1188&bih=559&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahukewigtzsbqjh-mahVruomkhx7sbiqq\\_auibigB#tbm=isch&q=biodiesel+a+partir+de+aceite+usado+](https://www.google.com.mx/search?q=almacenamiento+y+conservacion+de+aceites&biw=1188&bih=559&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahukewigtzsbqjh-mahVruomkhx7sbiqq_auibigB#tbm=isch&q=biodiesel+a+partir+de+aceite+usado+)

UNAM. (2012). *Producción de Biodiesel a partir de aceite comestible usado*. Recuperado de: [http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria20/feria252\\_01\\_produccion\\_de\\_biodiesel\\_a\\_partir\\_de\\_aceite\\_comesti.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria20/feria252_01_produccion_de_biodiesel_a_partir_de_aceite_comesti.pdf).

C. F. F. Consejo Federal De La Energía Eléctrica. (2016). Energías Renovables. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: <http://www.cfee.gov.ar/energias-renovables.php>

Sánchez Medina Iris Adriana. (2012). *Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de Ricinus communis. (higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnolo-



gía. Basado en: Proyecto de norma técnica colombiana de 100/04. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3048/6626S211.pdf;jsessionid=oce2359B-40546B399fa39442dc9afc8A?sequence=1>

León, Paco (02 de julio de 2007). En el Campamento del viento... [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://todosobresafaris.com/2007/07/02/en-el-campamento-del-viento/>

Patiño González Dalia (17 de agosto de 2017). *La fórmula del éxito: biodiesel a bajo costo*. CONACYT. Recuperado de: <http://newsnet.conacytprensa.mx/index.php/documentos/33323-la-fo-rmula-del-e-xito-biodiesel-de-bajo-costo>

**PARTE III**

**CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE**



# Loseta Térmica Hidrofóbica

*Jorge Miguel Saldaña Acosta,<sup>1</sup> Emilia Zapata Moreira y Ramiro Martínez Alvarado*

## Resumen

La impactante y rápida evolución de la tecnología dentro de la sociedad contemporánea, exige una revisión de ciertas apreciaciones sobre problemas estrechamente relacionados con el hombre, como el cambio climático y el deterioro ambiental, todo esto, relacionado con los procesos de construcción actuales, es evidente que existe un uso irracional de los recursos naturales además de la exigencia de cierto nivel de capacitación requerido por los operarios constructores, que difícilmente la mayoría de la gente destinada a estos oficios alcanza. Por ello es imperativo desarrollar materiales y sistemas de construcción adecuados y/o adaptados a las costumbres y grado de capacitación, para poner en las manos de la mayoría de la gente la posibilidad de construir. Las losetas obtenidas mostraron altas cualidades mecánicas y propiedades muy adecuadas como materiales de construcción. Fueron resistentes al fuego, de baja densidad ( $0.521 \text{ g/cm}^3$ ), soportaron una carga puntual de  $5.0 \text{ kg/cm}^2$ , la absorción de agua fue mínima  $0.12 \text{ g}$  del peso original, coeficiente de transmisión del calor ( $0.26 \text{ W/m}^2$ ). Además, fueron resistentes al ataque de insectos y microorganismos.

**Palabras Clave:** Reciclado, papel, losetas, sustentable

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Gral. Mariano Escobedo. Carrera de Mecatrónica área Automatización y Departamento de Incubadora de Negocios, libramiento noroeste km 33.5 Escobedo, N.L. msaldana@ute.edu.mx

## Introducción

En la producción de materiales alternativos de construcción se han empleado una gran diversidad de materias primas como la cascara de maní, caucho, bambú, lana mineral, fibra de vidrio, pet, cascarilla de arroz entre otros. Cada uno de estos desarrollos ha generado productos propios para la construcción con características particulares y propias de los materiales utilizados para ello.

Los aislamientos juegan un papel crucial en la construcción de edificaciones sustentables; un aislamiento no solo nos resguarda de los agentes externos (calor, frío, ruidos...), sino que además contribuye de manera muy importante a la reducción en el consumo de energía en nuestros hogares y puestos de trabajo, así como también una disminución de los gases de efecto invernadero producto de la combustión (Saldaña-Acosta *et al.*, 2013). Al momento de seleccionar los materiales que se emplearán en una edificación, se debe valorar el funcionamiento ambiental de estos, lo cual debe ser tan importante como los de tipo técnico y económico (Caballero-Montes y Alcántara-Lomeli, 2012). Cada vez más científicos y empresarios están desarrollando materiales ecológicos alternativos, aprovechando diversos desechos como botellas de plástico, vidrio, cartón, papel reciclado, aserrín, cascarilla de arroz, cascara de maní, bambú y hasta fibras obtenidas de vegetales y de la mezclilla. También se han creado opciones a partir del aprovechamiento de residuos agrícolas, de los desechos producidos por las industrias minera y azucarera, así como elementos totalmente naturales como el cáñamo y la leche. Un material verde que ha ido ganando popularidad es el vidrio reciclado. Después de haber sido reutilizado y reciclado varias veces, el vidrio considerado inutilizable puede procesarse para ser usado como recubrimiento de muebles y paredes.

Otra alternativa al concreto prefabricado es el llamado Hempcrete, que consiste en una mezcla de cáñamo, cal y agua. Su poca densidad favorece la circulación del aire y la humedad. Se han creado paneles y azulejos a partir de botellas de plástico (PET), que además pueden aislar el sonido. La celulosa tiene un coeficiente de conductividad térmica muy bajo, por lo que no transmite el calor y almacena energía, se comporta como la madera, equilibrando las temperaturas máximas y mínimas del día en verano y



protegiendo en invierno del frío. Además, posee un coeficiente de aislamiento acústico muy eficiente. La baja densidad de este material reduce el costo de los cimientos y ofrecen un muy buen nivel de confort térmico, además el panel permite construir paredes y entre pisos y recubrimientos rápidamente; al tratarse de un producto obtenido a base de materiales reciclados es el aislante ecológico por excelencia. El aislamiento de celulosa es el único que combina la protección térmica, acústica y control de condensación en un solo material.

El aislante de celulosa cuya conductividad térmica  $k$  es de  $0.042 \text{ W/mK}$ , deriva de fibras naturales de la madera por lo que posee características similares a la madera ( $k = 0.13 \text{ W/mK}$ ). Al casi no permitir el paso del calor, este se queda dentro de la vivienda en invierno, mientras que en verano la alta capacidad de absorción de calor específico nos proporciona una temperatura fresca en el interior. La reducción de entradas de calor, de frío o ruido, aumenta la sensación de confort y crea un clima ambiental sano. Al aislar fachadas y techos se evita la formación de humedad por condensación, ya que no se alcanza el punto de rocío. La vivienda respira, deja pasar el vapor del agua a través de los muros lo que reduce la posibilidad de condensación. En la actualidad hay muchísimas viviendas y edificios mal aislados y en un gran número de éstas, es posible mejorar su aislamiento por este tipo de productos (loseta térmica hidrofóbica). Entre los beneficios obtenidos podemos mencionar el confort térmico, el ahorro energético y económico, así como una importante disminución en la emisión de gases de efecto invernadero. La arquitectura sustentable es una de las alternativas que varios países han emprendido para disminuir el uso de recursos naturales y aprovechar los residuos producidos por el ser humano. En la actualidad hay una gran diversidad de materiales para realizar aislamientos como la lana de roca, la lana de vidrio, el papel, las perlitas EPS NEOPAR, Fibra de madera, poliuretano, etcétera. Una alternativa sustentable para mejorar la calidad de vida de la población de menos recursos económicos, que actualmente es una política pública de México. A la par se trata de solucionar un antiguo problema, la escasez de viviendas dignas para los ciudadanos. Las prácticas de reciclaje y reutilización, a partir de la recuperación de materiales y componentes de desecho de los diversos procesos productivos son eficientes desde el punto de vista ecológico, pero también desde el punto de vista económico, ya que la recuperación de materiales puede ser el punto de partida para generar un mercado alternativo de productos, que por haber sido utilizados

anteriormente resulten más económicos. La ventaja económica también se obtiene a causa de reintroducir los desechos en el ciclo industrial-comercial.

La generación de materiales de construcción sustentables, aislantes y económicos, con material reciclado. Impactara positivamente: en la economía de la sociedad y al disminuir importantemente la generación de  $\text{CO}_2$  hacia la atmosfera.

### Antecedentes

Hoy en día la tecnología debe tener además otro objetivo fundamental que es el de la búsqueda del bienestar humano, la naturaleza y el equilibrio ecológico; lo que se conoce como diseño sustentable. Evaluando aspectos como son:

- El consumo de agua potable y energía.
- La contaminación del aire, agua, y suelo, la generación de residuos sólidos (Rodríguez M. F. 1998).

El sector constructivo es responsable de un notable impacto ambiental (agotamiento de recursos naturales, calentamiento global, lluvia ácida, emisión de humos, acumulación de residuos, etc.) ya que durante el proceso de fabricación de los materiales para construcción y durante la edificación de los inmuebles (Sartori, I. and Hestness, A.G. 2007; Deepak, *et al.*, 2011). Este sector es el principal consumidor del suelo y materia prima, y una gran generación de desechos. A nivel mundial anualmente consume el 40% de piedra, arena y grava, 25% de madera y 16% de agua (Arena and de Rosa, 2003; Sartori, I. and Hestness, A.G. 2007; Deepak, *et al.*, 2011); de esta preocupación, surge la intención de búsqueda de sistemas constructivos, que sean o no tradicionales, que contribuyan al bienestar ambiental del país al no tener excesivos costos energéticos ni en su manufactura ni en su abasto. (García L. E. 1998; González y Navarro, 2006; Chau, *et al.*, 2012; Young-sun, *et al.*, 2012).

La construcción a base de pacas de paja cumple con estas características, no es tradicional de México, es ciertamente una técnica importada la cual se adapta de manera eficiente en la idiosincrasia del mexicano y en la realidad económica del país. (García L. E. 1998). Para que una vivienda se considere ecológica debe cumplir ciertos requisitos como son: evitar los impactos ambientales, interrelación con los ciclos de la naturaleza, diversidad funcional de la vivienda. En la realización de las obras se recomienda la utilización de materiales de construcción inocuos para el medio ambiente. Así, como

aislantes, se deben utilizar materiales naturales como corcho, papel, lana mineral o fibra de vidrio, fibra de madera, cascara de maní y, en general, materiales que sean poco conductivos y que almacenen calor. (Ramos Z. M., 2001).

El uso de materiales sobrantes o inútiles, naturales o bien de procesos de transformación, en la generación de materiales alternativos de construcción nos permite insertarlos en un ciclo autosustentable. En el mundo de hoy y con su estilo de vida se genera una gran abundancia de materiales de desecho que por algunas características generales pueden ser considerados como potenciales aislantes térmicos de bajo costo. Esta loseta al ser producida con materiales de desecho y sin gasto de energía su precio final es realmente bajo (\$ 25.00). Ver tabla 1.

Tabla 1. Comparación de costo de producción de 1 m<sup>2</sup> con loseta tradicional contra la loseta térmica hidrofóbica.

Recubrimiento con loseta comercial	Recubrimiento con loseta Térmica Hidrofóbica
\$ 75.00	\$ 700.00

**Fuente:** elaboración propia.

Materiales a base de celulosa de diferentes fuentes, en diversas proporciones de mezcla con otros materiales como el cemento, el bórax o fibras poliolefinicas ya han sido utilizados para este fin. (Molleda, C. *et al.*, 2005; Gutierrez, J. y González, A., 2012; Rivera, L., 2013).

En el mercado existen ya diversos tipos de productos aislantes a base de papel reciclado como el Isofloc el cual es un granulado de celulosa (ICARO, 1995); ECOMARC que es papel periódico reciclado mezclado con sales bóricas y HOMATHERM paneles de celulosa reciclada (93% - 90%), y Fibras Poliolefinicas (7% - 10%), fibra vítrea sintética que son materiales inorgánicos fibrosos que contienen silicatos de aluminio o de calcio. (ATSDR 2004). Otros materiales alternativos de construcción son la mezcla de cascara de cacahuate con poliéster y cemento en la fabricación de paneles con propiedades de aislamiento térmico y baja densidad; el papercrete compuesto de cemento portland, arena y papel con cualidades de aislamiento acústico y resistencia a la compresión; Biprocel, ladrillos de adobe adicionados con paja, tabiques de jal (Alcivar Velez, D.E. 2012; Rivera L.E., 2013). A través del diseño adecuado de los espacios es posible, evitar o disminuir el uso de la climatización artificial; así como aprovechar ampliamente la iluminación natural durante el día. Aplicando el diseño bioclimático, se ayuda también a

preservar el medio ambiente, integrando al hombre a un ecosistema más equilibrado. La arquitectura debe diseñar espacios ecológicamente concebidos que respondan integral y armónicamente a la acción de los factores ambientales del lugar. (Fuentes F. V., 1998).

## Material y Métodos

La mezcla para la obtención de las losetas contenía cemento (42%), papel reciclado (29%), aserrín (17%) y cal (12%). Estos componentes se mezclaron perfectamente, posteriormente se añadió agua hasta obtener una pasta homogénea de consistencia semilíquida; esta fue depositada en moldes de madera de 60 x 50 x 2.0 cm se le aplicó presión mediante una cubierta superior y se dejó secar a temperatura ambiente durante ocho horas, posteriormente fueron desmoldadas y se continuo el sacado por 120 horas más, una vez secas la superficie de las losetas fue recubierta con una monocapa de nanotubulos de carbón. Ver figuras 1 y 2.

Figura 1. Vista superior de Loseta.

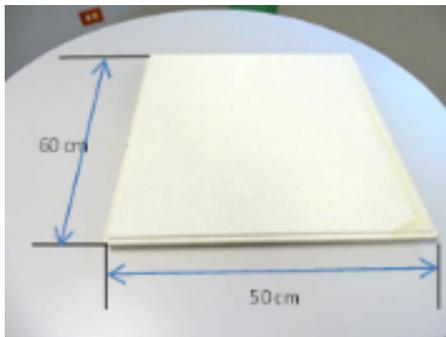


Figura 2. Vista frontal de Loseta Térmica Hidrofóbica.



Fuente: Jorge Miguel Saldaña.

## Térmica hidrofóbica

Las losetas obtenidas fueron sometidos a una serie de pruebas para determinar sus propiedades mecánicas y características propias para su utilización en procesos de recubrimientos o construcción, tales como:

**a) Resistencia a la compresión simple.** Es una de las pruebas de mayor relevancia ya que la función principal es soportar esfuerzos de compresión en una construcción, esta se realizó de acuerdo a la norma oficial NOM-C-036-ONNCCE-2003

**b) Absorción de agua.** El grado de absorción de agua es una medida de la maduración de la loseta. Las losetas fueron sumergidas en un depósito con agua, por 15 días y al término de este período de tiempo se analizó su integridad, resistencia a la fricción y su peso húmedo. NOM-C-037-ONNCCE-2005

**c) Densidad.** El material debe tener una densidad baja para facilitar su manejo, transporte y aplicabilidad en sitios elevados. Ésta se determinó a través de la fórmula de densidad, se obtuvo el peso promedio de 12 piezas y el volumen promedio de estas, estos valores fueron aplicados en la fórmula de densidad.  $d = m/V$

**d) Resistencia al fuego.** Todo el material para construcción requiere mostrar como mínimo un tiempo de 60 minutos de resistencia al fuego, sin producir flama, humo o gases tóxicos. Una muestra de 12 losetas apiladas fue expuesta al fuego de acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-C307/1-ONNCCE-2009.

**e) Resistencia al ataque de insectos.** Por el tipo de componentes en estas losetas existe la posibilidad de que sean atacados por diversos insectos. Las losetas fueron dejadas a la intemperie en una zona donde abundan los insectos (termitas, arañas, tijeretas, etc.) por un período de dos meses y medio.

**f) Resistencia al ataque por microorganismos.** La presencia de papel y madera (aserrín) en las losetas establece la posibilidad de que sean atacados por microorganismos, sobre todo si se dan las condiciones de humedad y temperatura adecuadas, para prevenir esto fue incluida en la mezcla cal. Las losetas fueron dejadas a la intemperie y enfrentados a cultivos de hongos del suelo (*Aspergillus*, *Rhizopus* y *Penicillium*) así como a cultivos de bacterias del suelo (*Bacillus subtilis*, *Aeromonas*) durante dos meses y medio.

## Resultados

Las losetas obtenidas fueron resistentes al fuego, ya que no produjeron flama ni desprendieron humo o gases tóxicos al ser expuestas al fuego de un soplete de gas butano. La densidad de las losetas producidas fue bastante baja,  $0.521 \text{ g/cm}^3$  en comparación con la de otros materiales de uso cotidiano (tabla 2).

Tabla 2. Densidades de algunos materiales de construcción.

Materiales	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Ladrillo aprensado	2.2 – 2.3
Ladrillo común	1.8 – 2.0
Ladrillo blando	1.5 -1.7
Ladrillo Sílico Calcáreo fino	1.66
Ladrillo Mahon hueco	1.20
Adobe	2.02
Bloque hormigón ligero	1.40
Bloque hormigón macizo	1.00
Paca de Paja	0.85
Loseta de papel,aserrín,cemento,cal	0.521

**Fuente:** Elaboración propia.

Las losetas mostraron una buena resistencia al ataque de insectos y microorganismos ya que después del período de enfrentamiento no mostraron deterioro observable a simple vista. La absorción de agua por parte de estas losetas fue mínima 0.12 g del peso original, comparada con otros materiales de construcción como: el ladrillo blanco 20%, ladrillo de gres 2%, ladrillo de arcilla 12% y ladrillos cara vista comunes por arriba de 8%. (ver tabla 3).

Tabla 3. Valores de absorción de agua por algunos materiales de construcción.

Materiales	Absorción de agua (%)
Ladrillo Blanco	20
Ladrillo de Gres	2
Ladrillo de arcilla	12
Ladrillo cara vista	más de 8
Loseta (UTE)	0.12

**Fuente:** elaboración propia.



Además, no sufrieron ningún deterioro o desgaste apreciable a simple vista, no sufrieron deterioros por fricción en estado húmedo, y su incremento de peso solo fue de 0.08 g. En cuanto a la resistencia a la compresión, mostraron una alta resistencia con un valor de 5.0 kg/cm<sup>2</sup>

### **Conclusión y Discusión**

Esta tecnología es muy ambiciosa por su eficacia energética y económica. Se desarrolló un nuevo material aislante ideal para las regiones más débiles económicamente. Al ser producido con material de desecho y sin gasto de energía, su precio al final es realmente bajo. Las losetas obtenidas mostraron altas cualidades mecánicas y propiedades muy adecuadas como materiales de recubrimiento en construcciones con altos coeficientes de conductividad. La resistencia a la compresión del material de construcción alternativo obtenido fue alta, a pesar de solo haber sido fraguado al sol. La densidad de estos materiales permite que puedan ser utilizados en sitios elevados, sin incrementar la cimentación, y los hace perfectamente manejables. Su buena resistencia al ataque de insectos y microorganismos, así como al fuego, los hace un material alternativo de construcción o recubrimiento ideal, que además de ser económicos y resistentes, representan un beneficio ecológico, al ser un material sin ningún gasto de transformación y promover la reutilización del papel de desperdicio y el aserrín. Estos últimos, materiales de desecho que tienen un tiempo de degradación promedio de 2 a 5 meses y 4 años, respectivamente. Esta aplicación impactará positivamente al medio ambiente, al disminuir la generación de residuos urbanos. Con respecto a la acción del viento y la temperatura, estos materiales mostraron una alta resistencia, ya que después de 18 meses no han sufrido deterioro alguno.

## Referencias

- Alcivar Velez Danny Emir 2012. El papercrete como material alternativo ecológico para la construcción de proyectos arquitectónicos turísticos. Monografias.com. Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos93/papercrete-como-material-ecologico-construccion.shtml#zz4HzonzxaS>
- Arena, A.P. & C. de Rosa. 2003. Life cycle assessment of energy and environmental implications the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza - Argentina. *Build. Environ.* 38, 359-368.
- ATSDRA Agency for Toxic Substances and Disease Registry. División de Toxicología Toxfqs. Sept. 2004. Fibras Vitreas Sintéticas (Synthetic Vitreous Fibers). Recuperado de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfqs/es\\_tfaq161.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfqs/es_tfaq161.pdf)
- Caballero Montes José Luis y A. Alcantára Lomelí 2012. Beneficios Ambientales Inherentes al uso de Sistemas de construcción con materiales alternativos en viviendas. *Naturaleza y Desarrollo*. Vol.10, N° 2. 48 – 53
- Chau,C.K. W.K. Hui and G. Powell 2012. Assessment of CO<sub>2</sub> emission reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options. *Resour. Conserv. Recycl.* 61, 22 – 34
- Deepak R. S. Behzad, F. Rosi and H. Xiao 2011. Assessment of CO<sub>2</sub> emissions reduction in a distribution warehouse. *Energy* 36, 2271 - 2277
- Dyna rev.fac.nac. 2006. Minas. Vol. 73. N°148 Medellin Jan/Apr
- Fuentes Freixanet, Víctor Armando, 1998 Nuevas Tecnologías en la arquitectura bioclimática, Tecnología y diseño en las edificaciones, Ed. U. A. M. -A., México, D. F., ISBN. 970654711 – 8, Pp. 135 - 162.
- García López, Esperanza, 1998, Técnicas ecológicas de construcción no tradicionales, Tecnología y diseño en las edificaciones, Ed. U. A. M. -A., México, D. F., ISBN. 970654711 – 8, Pp. 107 – 134.
- González, M.J. & J. García-Navarro 2006. Assessment of the decrease CO<sub>2</sub> emission in the construction field through the selection of materials: Practical case study of tree houses of low environmental impact. *Build. Environ.* 41, 902 – 909.
- Gutiérrez J.A. y A. D. González 2012. Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado. *Avances en Energías Renovables*

y Medio Ambiente. Vol. 16. Impreso en Argentina ISSN 0329 - 5184 <http://www.sec-forestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewfile/7559/7482>

Icaro Vitorello; Ehlers, Ricardo Sanders; Pacheco Admilson P. Dic 1995. Thermal inertia in Thermal infrared: Porosity and Chemical components of rocks; Inercia Termica no infravermelho Thermal: Porosidade e componentes quimicos de rocas. U.S. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information. ETDE WEB

Molleda C. Clara, N. Gómez- Hernández, E. Manrique- Menéndez, J. Santalla Rodríguez, A. González de la Aleja Tejera y J.D. Marco Martín 2005. Estudio de la conductividad Térmica de la Celulosa. Relación con otros parámetros físico - químicos. Recuperado de <http://es.scribd.com/document/338487420/Conductividad-Termica-de-la-Celulosa>

NOM-C-036- ONNCCE- 2003. Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines-resistencia a la compresión-método de prueba

NOM-C-037- ONNCCE- 2005. Industria de la construcción-bloques, ladrillos o tabiques y tabicones-determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua.

NOM-C-307/1-ONNCCE- 2009. Industria de la construcción-edificaciones-resistencia al fuego de elementos y componentes, especificaciones y métodos de ensayo.

Rivera L. E. 2013. Materiales Alternativos para la elaboración de Tabiques ecológicos. Tesis de Maestría en Ingeniería y Administración de la Construcción.

Rodríguez Manzo, Fausto, 1998, Control de ruido en las edificaciones, Tecnología y diseño en las edificaciones, Ed. U. A. M. -A., México, D. F., ISBN. 970654711 - 8, Pp. 61 - 90

Saldaña-Acosta Jorge Miguel, Rosales Javier y Muñoz Armando 2013. Reutilización de papel reciclado en la producción de material de construcción aislante térmico y acústico. Universo de la Tecnológica Año IV N° 14, 10-12.

Sartori I. and A. G. Hestnes 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low - energy buildings: a review article. Energy Build. 39, 249 - 257

Young-Sun, J., L.Seung-Eon & H. Jung-Ho 2012. Estimation of CO2 emission of apartment buildings due to major construction materials in the Republic of Korea. Energy Build. 49, 437 - 442.

Vasco G. J. 1998. Tableros prefabricados en hormigón aligerado con pulpa de celulosa. [TDG] Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.





# La participación comunitaria, elemento esencial para la implementación de energías renovables

*Celina Alvarado Gamiño<sup>1</sup>*

## Resumen

Este documento tiene como objetivo principal mostrar la importancia de la participación de la población para el logro de buenos resultados en proyectos comunitarios con diferentes finalidades, enfatizando la importancia de la metodología para el logro de una participación efectiva, continua y comprometida, lo cual aplicaría para proyectos con diferentes objetivos incluidos en este caso en especial, los que aspiran a la implementación de energías renovables de manera masiva. Este documento se ha derivado de una investigación y en él se incluyen los resultados obtenidos en este estudio. En esta investigación se siguió una estrategia metodológica de enfoque mixto. Es un estudio explicativo, transversal, retrospectivo, centrado en exponer cómo se da la participación comunitaria y por qué se relaciona con determinadas variables.

El documento inicia con una breve revisión de los estudios realizados en torno a la participación comunitaria, luego se describe la importancia que tiene esta participación para el éxito de los proyectos, ya que, al incidir de manera favorable en sus resultados, se puede lograr que las prácticas cotidianas en relación al cuidado del ambiente sean más favorables y se generalicen. Derivado del análisis de la teoría existente, así como del estudio realizado, se plantea la necesidad de llevar a cabo cambios en dos sentidos,

1 Aqua 21, A. C. celina.alvarado.aqua21@gmail.com



por una parte, en el tipo de proyectos implementados en las comunidades de escasos recursos y por otra, en relación a la metodología que se utiliza generalmente en estos proyectos. Finalmente, se realizan algunas recomendaciones metodológicas específicas.

**Palabras clave:** participación, participación comunitaria, proyectos comunitarios, metodología, medio ambiente, energías renovables, cambio climático.

La utilización de energías renovables, en otros momentos, se podría ver como una opción más para auxiliar en el mejoramiento del ambiente. Actualmente, ante el cambio climático, la implementación de energías renovables se convierte en una necesidad impostergable. Es indispensable lograr una modificación de prácticas que ayude a minimizar el avance del cambio climático. Para que esta modificación incida en forma significativa, se requiere que sea un cambio de prácticas generalizado. Por lo tanto, se requiere de la colaboración de los diferentes sectores que conforman la sociedad ya que la participación es un elemento indispensable dentro de una democracia e implica la inclusión y el involucramiento de toda la sociedad en la toma de decisiones sobre políticas públicas (Hevia, Vergara-Lope y Ávila, 2011). Ante este panorama, el sector académico, los científicos sociales, se encuentran obligados a difundir el conocimiento generado, a transmitirlo al sector gubernamental, al empresarial y al resto de la sociedad. La difusión de este conocimiento posibilita la implementación de reglamentaciones por parte de las instituciones gubernamentales y la modificación, aun con ciertas resistencias, de algunas prácticas del sector empresarial. Con algunos esfuerzos, es posible lograr acuerdos, realizar ciertos cambios que se puede considerar son a niveles micro, ya que los grupos que componen el sector académico, el sector gubernamental, el sector empresarial, son élites, es decir, son grupos minoritarios que cuentan con determinadas condiciones que les posibilitan la realización de modificaciones en sus hábitos, en su esfera doméstica.

Esta situación no es igual para una gran cantidad de población del sector popular que, por sus mismas condiciones de vida, mantiene prácticas que muchas veces son opuestas a este propósito común de minimizar el cambio climático. A este grupo poblacional van dirigidos una gran cantidad de proyectos comunitarios. En esta población mayoritaria se invierten recursos provenientes de diferentes instancias. Ya sean instituciones gubernamentales u organizaciones no gubernamentales (ONG). Considerando que



en este grupo poblacional se invierten gran cantidad de recursos y que, al incluir a la mayoría de la población, sus prácticas cotidianas inciden en forma significativa en las condiciones ambientales, valdría la pena preguntarnos si se está logrando el objetivo de modificar las prácticas ambientales de estos grupos sociales y de no ser así, ¿qué se puede hacer?, ¿cómo lograr que este grupo poblacional, que es el más numeroso, implemente prácticas distintas?

Al comentar sobre diferentes proyectos sociales, es común escuchar entre los implementadores que la gente no participa, que, aun siendo proyectos para su beneficio, la gente no se interesa, que es apática, que es difícil que modifique sus prácticas ya que se interesa en la información que se le ofrece, pero no lo suficiente como para participar de una manera activa en la implementación de cambios a mediano y largo plazo. Sobre este punto, algunos autores como Olson (1985), Ostrom (2000), y Thöenig, Duran y Cabrero (Cabrero, 2006), examinan la importancia del análisis racional sobre el costo-beneficio y la maximización de la utilidad en la toma de decisiones para la acción colectiva y afirman que la decisión- de participar o no- depende de cómo esta participación pueda potenciar las posibilidades de un individuo de desempeñar sus objetivos solo. De lo cual se desprende que la decisión de participar depende de que esta participación ofrezca al individuo beneficios inmediatos o potenciales (significativamente altos), que le permitan mejorar su situación particular respecto al grupo. Y entonces, ¿cómo lograr que la gente se involucre, que participe? Pero, además, ¿qué tipo de participación se requiere para lograr cambios que verdaderamente incidan en un ambiente más saludable? ¿Cómo conseguir el cambio de prácticas generalizado que se requiere?

Si hablamos de una participación comunitaria realmente comprometida, que incida en beneficio de una comunidad, habrá que definir el tipo de participación al que nos referimos. Varios estudiosos de las ciencias sociales han teorizado sobre la participación, sus características, sus variantes y sus diferentes alcances. Éste ha sido un tema de importancia social y ha sido objeto de numerosos análisis y de diferentes estudios. Y la razón de esta relevancia es el hecho de que la participación activa de una sociedad, no solo en la toma de decisiones, sino más aún en las actividades formadoras y transformadoras de una comunidad es indispensable para su desarrollo. Hay estudios en los que es considerada una necesidad para la generación de capital humano, en temas como la alfabetización (Freire, 1975, 1994) y el trabajo en cooperativas (Fals Borda, 1970). En otros, implica una redistribución de poder, en donde los grupos menos favorecidos



puedan tener voz y posibilidades de decidir y de ser incluidos en procesos políticos y económicos y ser partícipes de los beneficios sociales (Freire, 1994, Arnstein, 1971). En otros más, se considera que, al incluir a los ciudadanos en los procesos de asignación de recursos, establecimiento de prioridades, control de la transparencia y rendición de cuentas, se otorga mayor eficacia a las políticas públicas (Habermas, 1996).

Los argumentos sobre la necesidad de participación varían y van desde quien la considera indispensable para la construcción de ciudadanía (Cardozo y Ziccardi, 2010; Aguilar, 2000), o para generalizar una cultura participativa, que se considera inexistente o poco desarrollada (Cejudo, 2011); así como para generar capital social (Putnam, 1993) o para hacer más eficientes las políticas públicas (Aguilar 2012; Ziccardi, 2009; Krauskopf, 1998), hasta quien la menciona como un derecho imprescindible y una condición *sine qua non* puede darse un desarrollo integral del ser humano (Freire, 1975) y, por lo tanto, de cualquier comunidad. Los estudiosos del tema coinciden también en mencionar que se requieren determinadas condiciones para que pueda darse la participación (Marchioni, 2012; Torgerson, 1992; Freire, 1975; Ruiz-Giménez, 2008). Algunos, como Torgerson (1992), mencionan que es necesario disponer de espacios para propiciarla, posibilitar que se pueda realizar con capacidad de decisión y sin temor a las consecuencias; otros (Ucar, Llena y Berñe, 2006), que además se requiere tomar en serio a la ciudadanía y sus propuestas y que esta participación deberá ser de utilidad práctica para quienes participan.

Si consideramos indispensable la participación y observamos que no se da en la medida necesaria para el buen desarrollo de una comunidad, se tendrían que analizar las causas de que el interés en la participación sea escaso. Quienes han estudiado este punto han encontrado que la gente se involucra poco porque no se dan las condiciones necesarias para ello. Se pueden señalar algunos aspectos fundamentales para que pueda darse una participación real: que se ofrezca información clara y completa a los afectados por algún problema. Que se procure respaldo financiero cuando se requiera. Y, que se garanticen las condiciones necesarias para que puedan emitir su opinión, independientemente de su cultura Torgerson (1992). Es importante conocer y adecuar, en su caso, las metodologías de implementación de proyectos comunitarios, ya que "la educación de adultos requiere de una adecuación a las necesidades básicas de los grupos marginados, estar apegada a su contexto socio-económico-político y fundamentada en las experiencias subjetivas"; por ello se considera indispensable su

inclusión en los procesos comunitarios, pues es recomendable "la participación activa de los sujetos en todos los momentos del proceso de educación de adultos, inclusive en el estudio de su propia realidad" (De Schutter, 1983, p. 63).

Con la participación de la población en el proceso de desarrollo local, se posibilita la responsabilidad y el cuidado de la obra, la comunidad se hace responsable, vigila su propio desarrollo. Se origina así una nueva actitud de los pobladores ante las autoridades locales, al no esperar que éstas atiendan todos sus problemas, sino que la población resuelva los que estén dentro de sus posibilidades, tratando así de asegurar el bienestar general (López, 2008).

En un estudio realizado en Ciudad Juárez, sobre la participación en proyectos relacionados con los parques, se encontró que, entre las razones para no participar, se argumentan el desconocimiento y la falta de tiempo y que existe la disposición al trabajo, pero sin la intervención del gobierno (Romo y Córdova, 2009). Por otra parte, como resultado del estudio sobre los factores que inciden en la participación en proyectos comunitarios, realizado entre el 2012 y 2014,<sup>1</sup> se observó que existen algunas razones por las cuales no se da el compromiso, la participación requerida para lograr cambios reales. Esta investigación, cuyo enfoque fue la participación, tuvo como unidad de análisis los proyectos comunitarios. Se realizó con una estrategia mixta, (enfoques cualitativo y cuantitativo). Se planteó una hipótesis causal multivariada, el tipo de estudio fue explicativo y el trabajo de campo consistió en tres etapas: 1) Primera inmersión o inmersión inicial en campo (Hernández, 2006) en donde los instrumentos utilizados fueron la entrevista (informal) y la observación. La estrategia de muestreo fue el muestreo en cadena o "bola de nieve". 2) Segunda etapa, realización de entrevistas. El instrumento utilizado fue la entrevista a profundidad, la técnica fue la entrevista semiestructurada. La elección de participantes fue a través del muestreo por criterio lógico que implica trabajar todos los casos que reúnan algún criterio predeterminado de importancia (Patton, citado por Sandoval, 1996). Se entrevistó a implementadores de asociaciones civiles, a promotoras comunitarias y a beneficiarias de proyectos comunitarios.

3) Tercera etapa, la encuesta. El instrumento utilizado fue la encuesta. El tamaño de la muestra se calculó en línea a través del programa Sample Size Calculator de Raosoft

2 Alvarado Gamiño, Celina (2014). *Factores que inciden en la participación en proyectos de intervención comunitaria en la colonia Juanita Luna, en Ciudad Juárez, Chihuahua: 2002-2012*. Tesis de Maestría en Acción Pública y Desarrollo Social. El Colegio de la Frontera Norte, A. C. México. 118 pp.

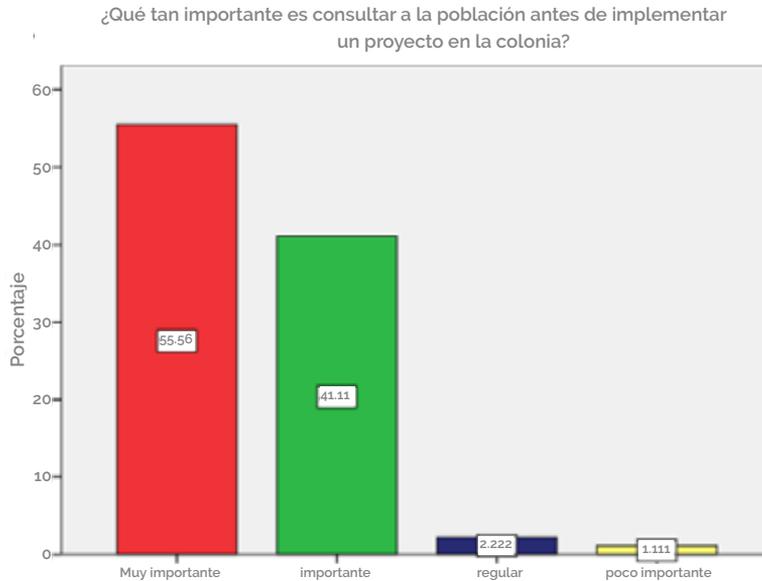


(<http://www.raosoft.com/samplesize.html>), en donde, con una población total de 629 viviendas y un margen de error del 10%, se obtuvo la cantidad de 84 viviendas como tamaño de muestra recomendado. Se redondeó en 90. Para determinar las viviendas a visitar, la estrategia que se utilizó fue la generación de números aleatorios a través de True Random Number Service. Los temas guía para el diseño de cuestionarios de entrevistas y encuesta fueron las tres variables independientes: necesidades observadas (objetivas) y necesidades sentidas (subjetivas); características socio-económico-culturales y metodología de implementación, así como la variable dependiente: participación (factores que influyen en su concreción) en proyectos comunitarios.

Entre los resultados que arrojó la investigación se encontró que la población tiene deseos y necesidad de participar, pero no existen los medios para ello. No existen las condiciones requeridas para que pueda darse una participación real, una incorporación generalizada a los proyectos, porque, como señala Torgerson (1992), por una parte, no hay información clara y suficiente; después, no se consideran los tiempos disponibles de los participantes potenciales y, finalmente, no se consideran sus recursos económicos en programas que podrían ser los de más interés para la comunidad. En la investigación, se confirma que para que pueda darse la participación en proyectos de intervención comunitaria, se requiere de la coincidencia de algunos factores, como conocer y consultar a la comunidad (ver gráficas 1 y 2),<sup>2</sup> así como considerar sus necesidades, sus características específicas y sus posibilidades reales de participación.

2 En la gráfica 1 se puede observar que más del 96% de la población consultada considera importante o muy importante que se les consulte antes de realizar algún proyecto en su comunidad y en la gráfica 2 se observa que casi el 88% de los participantes en la encuesta considera que la participación aumentaría si se les consultara.

Gráfica 1. Importancia de consultar.

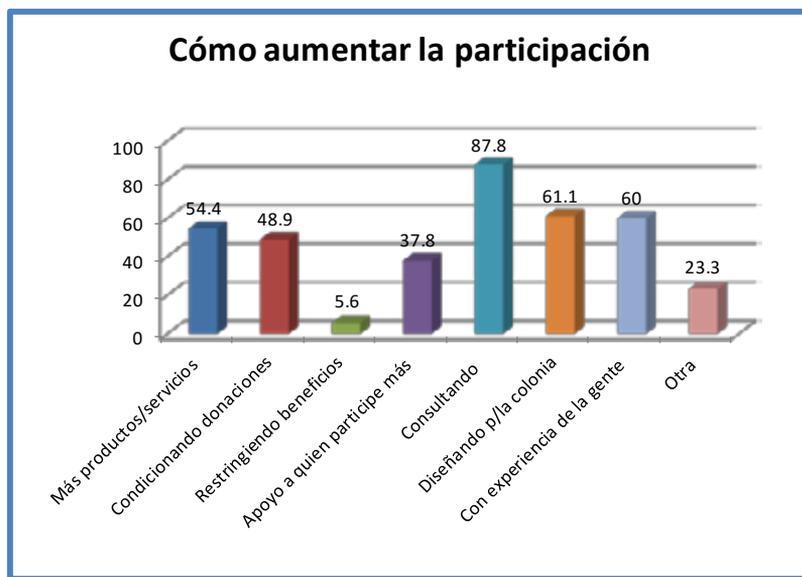


**Fuente:** Elaboración propia con datos de Encuesta a pobladores de la colonia Juanita Luna, 2014.

Las experiencias previas de la comunidad han sido con programas asistencialistas en porcentajes significativos (ver gráfica 3),<sup>3</sup> y los programas y proyectos asistencialistas han generado un par de problemas que terminan dando por resultado comportamientos racionalistas (egoístas e inmediatistas) en la población donde se realizan las intervenciones comunitarias. Por un lado, propician la no participación, y por otro, propician una serie de actitudes egoístas, que dividen a la comunidad y dañan los procesos comunitarios.

3 Como puede observarse en la gráfica 3, los proyectos en los que más ha participado la población encuestada son de tipo asistencialista, desde los que ofrecen donaciones menores como despensas, cobijas, chamarras, los que ofrecen materiales para construcción, la construcción misma de un cuarto o la inclusión en el Programa Federal Oportunidades.

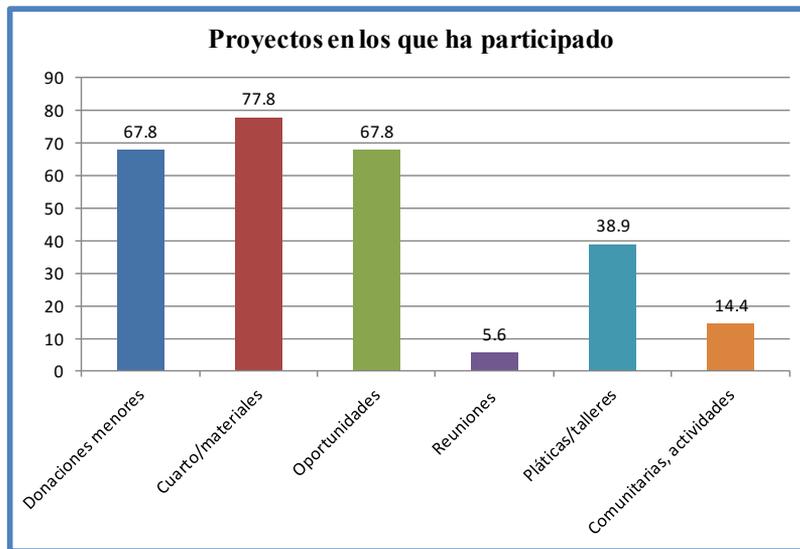
Gráfica 2. Cómo aumentar la participación.



**Fuente:** Elaboración propia con datos de Encuesta a pobladores de la colonia Juanita Luna, 2014.

Los comportamientos racionalistas de los beneficiarios son el resultado de estos programas asistencialistas y de la dinámica utilizada en los proyectos. Es decir, no solo es el tipo de programas sino también la metodología utilizada para llevarlos a la práctica. Por una parte, el estar recibiendo donaciones en abundancia y sin ningún tipo de plan determinado, ha propiciado en la población una actitud de desenfado, de despreocupación, pero también de egoísmo, y desunión; sabe que no requiere participar en alguna actividad para allegarse recursos, que éstos le llegarán sin que se esfuerce pero también sabe, que los beneficios pueden ser, a veces para el vecino y en otras ocasiones para él, lo cual provoca actitudes egoístas y de acaparamiento o de control para el clientelismo político, lo cual se puede observar claramente en los comentarios vertidos al final de la encuesta.

Gráfica 3. Tipos de proyectos.



**Fuente:** Elaboración propia con datos de Encuesta a pobladores de la colonia Juanita Luna, 2014.

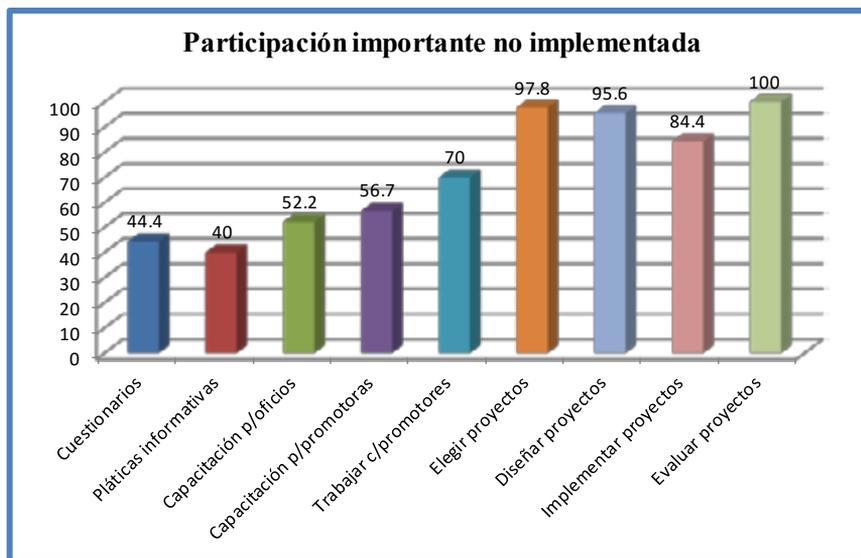
Además, no están siendo considerados elementos importantes en la participación como la inclusión de las habilidades, la experiencia y los conocimientos previos de los participantes, lo cual redunda en una disminución del interés por la participación.

En esta investigación se encontró también un elemento importante que se ha estado soslayando y que remite a Habermas (Healy, 1996), en relación a la acción comunicativa que está enfocada a lograr el entendimiento común de una situación mediante el debate, ya que, para él, la acción colaborativa llevará a la búsqueda de soluciones con base en los argumentos más válidos sobre la verdad. Y es que, al conocer más de cerca a la comunidad, se puede percibir el interés de la población por hacerse escuchar, por opinar sobre lo que sucede en su comunidad, por hacer sugerencias y manifestar sus inconformidades (ver gráfica 4),<sup>4</sup> lo cual puede ser un elemento valioso al tratar de incorporarlos en la participación comunitaria, ya que el desinterés y la apatía que se observan son en relación a los

4 En la gráfica 4, se observa claramente la necesidad y el deseo de la población de participar más activamente, tanto en la elección como en el diseño, pero sobre todo en la evaluación de los proyectos, pues al ser ellos los beneficiarios, identifican fallas y desean realizar propuestas para mejorar la implementación de éstos.

programas y proyectos existentes, más no en relación a otras posibles formas de actividad comunitaria ni a la comunidad en su totalidad.

Gráfica 4. Tipos de participación consideradas importantes por los encuestados y que no es implementada.



Fuente: Elaboración propia con datos de Encuesta a pobladores de la colonia Juanita Luna, 2014.

El interés mostrado por la población es un indicador del deseo de una participación auténtica que podría aprovecharse para dar inicio primero, al conocimiento profundo de esta comunidad y, por lo tanto, al conocimiento de sus necesidades, intereses y posibilidades. Posteriormente, a la incorporación de sus habitantes en los proyectos planeados ex profeso, como consecuencia de esa consulta y del conocimiento resultante, planteando una participación acorde a las posibilidades e intereses de la comunidad. Algunos participantes podrán contribuir solo con ideas, mientras que otros, a quienes les agradan más las actividades colectivas o tienen mejores posibilidades económicas y de tiempo disponible, podrían incorporarse de manera más integral al trabajo comunitario, pero todos tendrían oportunidad de ser partícipes de las actividades realizadas.

Existe una necesidad manifiesta de recibir información clara, precisa y oportuna para tener posibilidades de decidir sobre la participación o no en determinadas acciones o actividades comunitarias. A través de las preguntas abiertas de la encuesta se encontró



que la población solicita que se le ofrezca la información necesaria en forma clara y concreta, con la anticipación suficiente para poder decidir y planear su participación, solicita que se tomen en cuenta las condiciones económicas de la zona. Se manifiesta el deseo de opinar sobre acciones comunitarias que consideran erróneas. Manifiestan su deseo de participar, pero, con determinadas condiciones, exteriorizan su desánimo y su falta de confianza de acercarse a cualquier grupo. El 28% de la población menciona que la importancia de la participación radica en que contribuye al bien común. El 51% mencionan problemas suscitados entre la población al realizarse los repartos, lo que adjudican a la avaricia de los beneficiarios y el mal uso que dan muchos de ellos a los recursos obtenidos.

Con estos resultados, lo que se alcanza a vislumbrar son dos hechos importantes para la acción pública. Primero, el camino recorrido por las instituciones implementadoras no ha sido el más adecuado. Por un lado, han llevado ayuda material y cierta capacitación a la población. Por otro lado, se ha desarrollado la pasividad, la especulación, la decepción, el acaparamiento, el control político con su práctica clientelar y paternalista, y su consecuente relación de codependencia permanente. Segundo, se observa no solo la disposición, sino un profundo deseo de la gente de participar, siempre y cuando sean tomados en cuenta, que sean consideradas su forma de pensar y su forma de sentir. Partiendo de esta premisa, se hace necesario, por lo menos experimentalmente, considerar las necesidades sentidas de la población y sus prioridades a resolver. Tomar en cuenta sus características socioeconómicas y culturales y una metodología que incluya lo anterior, considere su experiencia y los involucre en todo el proceso de un proyecto con su respectiva toma de decisiones. Es importante señalar algunos elementos interesantes. Por una parte, como se puede observar, aunque esta investigación fue realizada en una colonia juarenses con una población de 2231 habitantes,<sup>5</sup> los resultados encontrados son muy similares a los obtenidos en otros estudios, como el realizado por Córdova y Romo (2007) sobre participación ciudadana en la gestión del agua. La mayoría de los participantes manifiesta que, aunque existe la disposición a participar, no participa por desconocimiento del problema y de las formas de participar y por la desconfianza en las instituciones públicas, entre otras razones. Los resultados

5 Información del Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), que fue recabada con el objetivo de proponer esta colonia como Polígono Hábitat en el 2009, año en el que contaba con un total de 17 manzanas y una población total de 2231 habitantes (IMIP,2009).



también indican que, es nula la información que las autoridades proporcionan a estas personas (Córdova y Romo, 2007). Otro estudio sobre el clientelismo político en el desarrollo urbano de Ciudad Juárez, concluye que los esfuerzos de administraciones panistas por promover la participación han sido infructuosos. En el estudio menciona que se observan muchas resistencias a las nuevas formas de actuación ciudadana y gubernamental, aunque estas nuevas formas pretendan profundizar en el proceso de construcción del nuevo orden político local. Explica que la marginalidad y la precariedad posibilitan la persistencia del clientelismo político (Escalona, 2004).

Otros datos con los que se cuenta sobre la participación ciudadana en la ciudad, son los del Sistema de indicadores de Calidad de Vida de Así Estamos Juárez (2017, p. 56). En los resultados del año 2017, se puede observar que solo el 15,5% de los ciudadanos participa en alguna organización y de estas, el 50,4% son organizaciones religiosas; el resto son asociaciones deportivas, de padres de familia, clubes sociales, etcétera. Por otro lado, aunque los estudios mencionados tratan en general sobre la participación en diferentes tipos de proyectos, no solo los relacionados con el medio ambiente, se puede suponer que al tratarse de proyectos o programas relativos al cuidado del ambiente los resultados serán similares o aún menos afortunados, ya que, si trabajamos con poblaciones de escasos recursos, podemos suponer que para estas poblaciones las prioridades están relacionadas con la cobertura de las necesidades más básicas, lo cual puede redundar en un menor interés por la participación.

Podemos proponer entonces que, derivado de los elementos constitutivos del concepto de participación, se puede decir que el tipo de participación requerida en este caso podría conceptualizarse como "la acción de colaborar en un proceso social de manera voluntaria e informada, con la finalidad no solo de hacer más eficientes las actividades de cualquier proyecto comunitario, sino también con el objetivo de apropiarse de estas formas de acción, propiciando el desarrollo de habilidades sociales y un mayor impacto en la calidad de vida".<sup>6</sup> Partiendo de lo antes planteado, se podría ejemplificar de esta manera, supongamos que se cuenta con cierto presupuesto para realizar algún proyecto de mejora del ambiente en una determinada zona. Al visitarla podrá ser evidente que el lugar no cuenta con

6 Conceptualización propia basada en el análisis de las ya existentes y que incorpora parte de la noción de poder ciudadano de Freire (1994) y Arnstein (1971), del espíritu cooperativo de Habermas (Healy, 1996), del capital social de Putnam (1993) y de la legitimidad y fortalecimiento de instituciones mencionado tanto por Ziccardi (2009) como por Putnam (1993) y Aguilar (2012).



parques, que las calles son de terracería, que la población de la zona utiliza leña como combustible para los calentones en invierno o hasta para cocinar, en algunos casos (estas serían las necesidades objetivas).

Por la observación se podrían determinar dos acciones complementarias entre sí, por ejemplo, llevar árboles para plantarlos e invitar a los habitantes de la colonia para que se involucren, se sientan incluidos, se sientan responsables de los árboles y no los dejen secarse. Junto con ello, se determina darles una serie de pláticas con la intención de “concientizarlos” de la necesidad de cuidar el ambiente, que conozcan los daños que provoca la práctica de quemar leña e invitarlos a dejar de utilizar la leña como combustible y además hacer un llamado a que se hagan cargo del cuidado de los recién plantados árboles que tanto beneficio traerán a su comunidad (acciones decididas de manera unilateral, sin consultar a la comunidad, sin darles la oportunidad de dar soluciones posibles desde su perspectiva y desde su experiencia y sin considerar sus condiciones socio económicas). Esta actividad parece un proyecto bien pensado, con muchas posibilidades de tener éxito, pero, ¿se preguntó a los pobladores si tenían tiempo para atender los árboles?, ¿se investigó si existía alguna forma de organización vecinal que posibilite el cuidado organizado y eficiente de los árboles a mediano y largo plazo?, ¿se preguntó si cuentan con recursos para la compra de otros tipos de combustible para sustituir la leña? (metodología inadecuada y sin considerar las condiciones socioeconómicas), al invitarles a dejar el uso de la leña, ¿se ofreció alguna alternativa económicamente accesible a esta población? Y, ¿si la mayor parte de la población de esa zona —como en la mayoría de las zonas periféricas de las ciudades— es originaria de zonas rurales y está habituada a cocinar con leña? (características culturales). ¿Qué pasará si a vuelta de días o semanas nadie se hace cargo de los árboles? ¿Qué hace —quien queda convencido del daño al ambiente con la quema de leña—, pero no cuenta con una alternativa adecuada a sus recursos para modificar esa práctica? (características sociales, económicas, culturales).

Y, ¿si en vez de solo conocer la colonia físicamente se realizaran grupos focales? (consulta previa, ver gráficas 1 y 2). ¿Si se conocieran las habilidades y experiencias previas, tanto comunitarias como personales, de quienes viven ahí? (metodología de educación para adultos). Al saber de proyectos previos, ¿qué tal si se evalúan sus resultados con la población? (80.88% lo solicita). Si otros proyectos han fracasado en la zona, ¿sería de alguna utilidad saber la opinión de la población al respecto? ¿Y, si se escucharan sus

propuestas antes de decidir lo que se realizará? ¿Y si se investiga cuáles son las actividades, los horarios, el origen de esa comunidad? (metodología de educación para adultos). El proyecto podría cambiar. ¿Es posible que la comunidad, ante la imposibilidad de dejar de utilizar leña, se proponga realizar actividades que contribuyan a disminuir el daño que ellos mismos están causando al ambiente? Si se platica previamente sobre los horarios de actividad laboral, ¿tendrá más posibilidades de éxito el cuidado de los árboles?

### Conclusiones

En conclusión, en tanto que la participación de una comunidad en cualquier tipo de proyectos es escasa, se puede deducir que al tratarse de proyectos encaminados a la promoción del uso de energías renovables será más escasa aún, ya que para la población de escasos recursos este tipo de proyectos se podrían considerar como secundarios y, ante la carencia de los satisfactores básicos, asuntos como el cambio climático pueden no ser una prioridad y menos aún si, ni la comprensión de estos problemas ni el planteamiento de posibles soluciones les es asequible. Si la población considera que les beneficiaría más que ellos eligieran en qué proyectos participar (75.6%) o la forma de participación (73.3%), si desean opinar sobre los resultados de proyectos previos (64.4%) y consideran como factores importantes, al decidir su participación, que se les consulte antes de iniciar proyectos (80.89%) o que se les permita participar en la evaluación de estos (80.88%), entonces, habrá que tomarlo en cuenta.

Además de que no se puede soslayar que, tratándose del estudio del comportamiento humano no se pueden predecir resultados constantes e inamovibles. Sin embargo, se puede observar que hay más posibilidades de realizar un trabajo más efectivo y lograr mejores resultados en cuanto al cambio de prácticas de una población cuando se toman en cuenta los elementos metodológicos mencionados:

- Hacer un estudio para conocer a la comunidad antes de la implementación de un proyecto comunitario.
- Consultar a la población de la comunidad sobre sus intereses, sus necesidades "sentidas" (subjetivas) y sus posibilidades reales de participación.

- 
- Al planear cualquier proyecto, tomar en cuenta las necesidades subjetivas de la comunidad y sus características socio-político-económicas.
  - Identificar las posibilidades de participación (tiempo disponible, habilidades y experiencias individuales y comunitarias) y planear de acuerdo a éstas.

Es indispensable generar el diálogo entre los actores principales que trabajan en torno al uso de energías renovables, pero también es indispensable que, de este diálogo, surja la acción y que en ella se incluya a los diferentes grupos poblacionales, en especial a los sectores más numerosos de la población. Para lograrlo, se requiere un cambio en la metodología de los proyectos comunitarios. Conocer sus necesidades, objetivas y subjetivas, su experiencia, sus propuestas y sus posibilidades de acción de acuerdo a sus condiciones específicas de vida, esta nueva metodología propicia la obtención de mejores resultados y una participación más activa y comprometida de ese grupo poblacional.

Derivado de todo lo anterior se plantean las siguientes propuestas:

Realizar modificaciones tanto al determinar qué proyectos realizar en una comunidad como en la metodología de su implementación. Investigar para propiciar una sincronía entre las necesidades observadas por los implementadores y las necesidades sentidas (subjetivas) por la población-objetivo de un proyecto. Realizar adaptaciones a los proyectos al contexto local antes de implementarlos en una determinada zona. Asegurarse de que el modelo de implementación sea el de la educación comunitaria que es el requerido para este tipo de proyectos. Ofrecer información clara, oportuna y completa a la comunidad sobre el problema que se pretende resolver y las opciones de solución existentes. Propiciar opciones de participación de la comunidad que sean accesibles, de acuerdo a su experiencia, sus conocimientos y su disponibilidad de tiempo. Brindar las condiciones y recursos necesarios para posibilitar la participación. Finalmente, al incluir a la población desde que se planea la realización de alguna actividad comunitaria, podría plantearse la realización de grupos focales. En estos grupos focales podrían surgir propuestas no imaginadas por los implementadores. Además, todo proyecto, por excelente que sea, diseñado e implementado de manera exógena, es un acto de conquista.

## Referencias

- Aguilar Valenzuela, R. (2012). Conclusiones. *La sociedad civil en México*. (pp. 267-285). Gobierno del estado de Durango, Durango, México: Miguel Ángel Porrúa.
- Aguilar Villanueva, L. F. (2000). *La implementación de las políticas*. (3ª ed.). Ciudad de México, México: Miguel Ángel Porrúa Grupo Editorial.
- Arnstein, R. S. (1971). A ladder of citizen participation. *Journal of the Royal Town Planning Institute*, pp. 2-6.
- Así estamos Juárez (2017), Sistema de indicadores de calidad de vida. Proyecto de Plan Estratégico de Juárez, A. C., Ciudad Juárez, Chih., México, p. 55. <http://planjuarez.org/images/docs/informes/informeaej2017.pdf>
- Cabrero Mendoza, E. (2006). *Acción pública y desarrollo local*. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica, pp. 11-150.
- Cardozo, M. y Ziccardi, A. (2010). *Descentralización y participación ciudadana: Un análisis de las políticas sociales*. serie documentos de trabajo, programa de cohesión social y territorial Uruguay integra, área de políticas territoriales, documento de trabajo no. 7, Uruguay, p. 12.
- Córdova Bojórquez, G. y Romo Aguilar M. de L. (2007). Participación ciudadana en las colonias sin agua potable y alcantarillado en Ciudad Juárez, Chihuahua en *Identidades y fronteras: Entramado de la política local*, *Nóesis, Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, vol. 16(32), Ciudad Juárez, México: Nueva Época, pp.122-153.
- Cejudo Ramírez, G. M. (2011) *Contraloría social: Ciudadanía activa, gobierno responsable en Contraloría Social en México, Experiencias de participación ciudadana y rendición de cuentas*. Secretaría de la Función Pública, Secretaría de la Contraloría y Transparencia Gubernamental, Gobierno del Estado de Oaxaca, México.
- De Schutter, A. (1983). *Investigación Participativa: Una opción metodológica para la educación de adultos*. (2ª edición) Pátzcuaro, Michoacán, México: Centro regional de educación de adultos y alfabetización funcional para América Latina (CREFAL), pp. 59-63, Serie: Retablo de papel 3.
- Escalona Rodríguez, M. I. (2004) Desarrollo urbano y clientelismo político: el caso de la Anapra en Ciudad Juárez, Chihuahua, en Padilla Delgado, H. A. (coord.) *Cambio político y participación ciudadana en Ciudad Juárez*, Ciudad Juárez, Chih., México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, pp. 283-224.

- Fals Borda, O. (1970), *Cooperativas y desarrollo rural en América Latina*. UNRISD, Ginebra.
- Freire, P. (1975). *La educación como práctica de la libertad*. México: Siglo Veintiuno Editores, pp. 151.
- Freire, P. (1994), Educación y participación comunitaria, Extracto de la ponencia para el *Congreso Internacional de Nuevas perspectivas críticas de la educación*, Universidad de Barcelona: Paidós
- Habermas, citado en: Healy, P. (1996). The communicative turn in planning theory and its implications for spatial strategy formation. S. Campbell and D. Fainstain, *Reading in Planning theory*, pp. 237-274.
- Healy, P. (1996). *The communicative turn in planning theory and its implications for spatial strategy formation*. S. Campbell and D. Fainstain, *Reading in Planning theory*, pp. 237-274.
- Hevia, Felipe, Vergara-Lope, Samana y Ávila Landa, Homero (2011). Participación ciudadana en México: consejos consultivos e instancias públicas de deliberación en el gobierno federal. *Perfiles Latinoamericanos*, núm. 38, julio-diciembre, 2011. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. Distrito Federal, México. pp. 65-88
- Hernández Sampieri, R. Fernández-Collado, C. Baptista Lucio, P. (2006), *Metodología de la investigación*. (4ª ed.). Editorial McGraw-Hill, México.
- Krauskopf, D. (1998). *Dimensiones críticas en la participación social de las juventudes*. Documento constituye una revisión del trabajo Participación y Desarrollo Social en la Adolescencia publicado por el Fondo de Población de Naciones Unidas, San José, Costa Rica.
- López Alonso, F. J. (2008). *Participación comunitaria y diagnóstico de Necesidades*. Salud Pública y algo más, mi+d un lugar para la ciencia y la tecnología, Blogs Madrid.
- Marchioni, M. (2012). *Proyecto Juntos en la misma dirección*. Charla, en la red de Trabajo del proyecto, Tenerife, <http://www.youtube.com/watch?v=qCTYoxydw90>
- Olson, M. (1985) *La lógica de la acción colectiva: Auge y decadencia de las Naciones*. Barcelona, España: Ariel, pp. 32-55.
- Ostrom, E. (2000), *El gobierno de los bienes commune: La evolución de las instituciones de acción colectiva*. México: UNAM-CRIM-FCE, p. 395.
- Patton, M. Q. (1988), *How to Use Qualitative Methods in Evaluation*. Newbury Park-California: Sage.
- Putnam, R. (1993). *Making Democracy Work: Civic Traditions in Modern Italy*. Princeton University Press.
- Romo Aguilar, M. de L. y Córdova Bojórquez, G. (2009). Áreas verdes y participación ciudadana en Ciudad Juárez, Chihuahua, en Cervera Gómez, Luis Ernesto, *et al.*, *Ges-*



*ción ambiental y participación ciudadana en el estado de Chihuahua: Cuatro estudios de caso* (Breviarium), México: El Colegio de la Frontera Norte, Dirección Regional Noroeste, pp. 11-36.

Ruiz-Giménez Aguilar, J. L. (2008). *Participación comunitaria*. Documento sobre un modelo de participación comunitaria en el Sistema Nacional de Salud del Estado Español, pp. 62-72.

Torgerson, D. (1992). La tercera cara: una perspectiva práctica. Aguilar Villanueva, Luis F., *El estudio de las políticas públicas* México: Miguel Ángel Porrúa, pp. 218-237.

Úcar, X., Llena y Berñe, A. (Cords.), (2006). *Miradas y diálogos en torno a la acción Comunitaria*. J. A. Caride Gómez, N. Codern i Bove, F. Cortes Izquierdo, L. Íñiguez Rueda, M. Llobet Estany, K. Montenegro Quintana, M. Montenegro Martínez, M. C. Taranilla Lobato. Barcelona, España: Ed. Graó, pp. 48-49.

Vejarano Monroy, G. (comp). (1983). *La Investigación Participativa en América Latina: Antología* (pp. 59-60). Pátzcuaro, Michoacán, México: Centro regional de educación de adultos y alfabetización funcional para América Latina (CREFAL). Serie: Retablo de papel 10.

Ziccardi Contigiani, A. E. (2009). *La Participación ciudadana en los procesos de planificación y gestión del territorio*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 539-540.



# La educación ambiental y las energías renovables en la adaptación al cambio climático en la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji

*Sonia Hernández González,<sup>1</sup> Erick Hidalgo Martínez,<sup>2</sup> y Blanca Estela Gutiérrez-Barba<sup>3</sup>*

## Resumen

Como motor de cambio social las Instituciones de Educación Superior juegan un papel preponderante en la reconstrucción de las sociedades actuales, consideradas como un escenario clave para asentar las bases de una educación para la sustentabilidad frente al cambio climático. Es así que a partir de la adopción del protocolo de Kioto, se ha tenido por objetivo disminuir el aumento constante en el consumo de energía; así, la mejora de la eficiencia energética de los edificios públicos es importante para la promoción de una cultura sobre el tema entre la población local y más aún la eficiencia energética en los edificios escolares, porque son los lugares donde los jóvenes y profesionistas de hoy y del mañana son educados y tienen la oportunidad de aprender cómo llegar a ser ciudadanos con una conciencia ambiental. Por ello, la Universidad Tecnológica de Tula- Tepeji en su compromiso para la adaptación al cambio climático ha realizado un diagnóstico del consumo total en kWh, consumo por persona, consumo en kWh/ m<sup>2</sup>, así como un estudio para validar el ahorro energético para sustituir la

1 Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji, Programa de Ingeniería Ambiental.

2 Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji, Programa de Ingeniería Energías Renovables.

3 Instituto Politécnico Nacional-CIEMAD.



tecnología en iluminación de los pasillos por energía renovable. Se estructuró un programa de educación ambiental no formal enfocado bajo el modelo de enseñanza basado en competencias, a partir del cual los sujetos que participen puedan tener un aprendizaje a partir de la reflexión, acción y la construcción de aprendizajes significativos. Es decir, con un *enfoque cognoscitivo constructivista*, centrado en el sujeto, con el cuál pueda contribuir a modificar los valores, comportamientos, conocimientos y actitudes ambientales, esto es, la cultura ambiental de sus estudiantes y personal administrativo en primera instancia y posteriormente influenciar a la población aledaña y de la región, para con ello incursionar en la sociedad y promover el uso de las energías renovables, así como brindar herramientas para incursionar en la adaptación al cambio climático.

**Palabras clave:** educación ambiental, energías renovables, Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji, cultura ambiental.

## Introducción

Desde principios del siglo xx ha prevalecido un estilo de desarrollo caracterizado por la búsqueda de la máxima rentabilidad económica a corto plazo, la sobreexplotación de los recursos naturales y la carencia de políticas ambientales lo que ha originado una crisis ambiental que se presenta en todo el mundo (Semarnat-Coede, 2009), planteando problemas urgentes y transversales que se manifiestan de forma local y global, lo que socava el sustento de la humanidad y amenaza con desestabilizar los ecosistemas y colapsar la civilización global (Complexus, 2006). México no es ajeno a esta problemática, el progresivo deterioro y agotamiento de la base de sus recursos naturales, altos niveles de contaminación ambiental y graves procesos de degradación ecológica (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2006) debido principalmente a la expansión de las actividades productivas agrícolas, ganaderas, forestales y pesqueras, las cuales se han desarrollado buscando obtener el mayor retorno económico posible sin considerar los daños ocasionados al ambiente, los impactos sociales y económicos así como la permanencia de la producción en el tiempo (Sosa, *et. al.*, 2010). En segundo lugar (solo mención, no de importancia) está el tema del desarrollo económico y social en México se ha asociado a crecientes condiciones de pobreza, marginación y exclusión social (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2006). En este sentido, la sustentabilidad de México es posiblemente el mayor desafío que enfrenta



hoy en día, se requiere por lo tanto lograr una sociedad que tenga las competencias para enfrentar este reto y encontrar soluciones (Sosa, *et. al.*, 2010). Por lo que transitar hacia modelos de desarrollo más sustentables se ha convertido en una necesidad impostergable para el país (Plan Nacional de Desarrollo, 2007).

Ante estos escenarios, la educación ambiental representa una vía importante para recomponer la relación sociedad-naturaleza. Para la educación superior se hace necesario replantear el papel de la universidad frente a la sustentabilidad, recuperando la premisa de que ninguna de las áreas del conocimiento se encuentra al margen de esta nueva visión. Así la universidad y el universitario deben asumir su papel de promotores y agentes de cambio hacia la sustentabilidad. La visión hacia la sustentabilidad pone en entredicho los enfoques epistémicos tradicionales y da relieve a la educación transformadora, centrada en el alumno, en el aprendizaje significativo, en la formación de la ciudadanía, el pensamiento complejo y creativo, en la necesidad de aprender a aprender y aprender a enseñar, así como en el aprender-enseñando (Agüero, 2009). Especialmente porque en las sociedades actuales se requiere diseñar las rutas que permitan contar con una ciudadanía consciente y actuante, con la convicción de que no hay futuro si no existe una estrategia de sustentabilidad, y que para ubicarse correctamente en los procesos globalizados se deben de crear espacios que defiendan el interés y beneficio de las sociedades y pueblos (Cordera y Sheinbaum, 2008).

El reto está entonces en re-construir en ese intercambio de saberes disciplinares y comunitarios, los conocimientos que permitan hacer frente a una problemática tan compleja e impulsar en materia educativa distintos procesos de formación ambiental que dejen a la humanidad transitar a una relación hombre-naturaleza basada en el respeto y responsabilidad del ser humano para consigo mismo, los demás y su entorno (Camarena Gómez, 2006). Importante es señalar entonces que la educación fortalece la independencia y autonomía de las personas y permite la toma de decisiones informadas y responsables, es fundamental para el proceso del desarrollo humano sustentable, al contribuir a la formación de ciudadanos conscientes de su contribución a los procesos de degradación del medio ambiente y comprometidos con la protección, la conservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y es importante en la construcción de una cultura ambiental; es así que algunas perspectivas de la Educación ambiental vinculan la cultura con los sistemas de creencias, con los valores, con las relaciones sociales y con las instituciones que se generan en los grupos sociales, para



conectar de esta manera la crisis global con una crisis cultural (Hernández y Tilbury, 2006), más aún en estos tiempos de evidencia crítica de las afectaciones que surgirán por el cambio climático, haciendo mucho más evidente la necesidad de formación no solo de alumnado y profesorado consiente de las consecuencias de las acciones derivadas del estilo de vida de la sociedad, sino de la formación de una cultura ambiental en pro de la mitigación al cambio climático.

En México según datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la emisión total en 2010 fue cercana a 748 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente, 33.4% mayor que la de 1990. Esta cifra, equivalente al 1.4% de la emisión total global, colocó al país entre los primeros quince países por su volumen de emisión. Del total de gei emitidos en ese año, el sector energético contribuyó con poco más del 67%, siendo el consumo de combustibles fósiles la principal fuente. Las emisiones derivadas de los desechos contribuyeron con 5.9%, mientras que la agricultura, los procesos industriales y el cambio de uso del suelo y silvicultura fueron responsables del 12.3%, 8.2% y 6.3% del total nacional, respectivamente (Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

Es así que a partir de la adopción del protocolo de Kioto en 1997 se ha tenido por objetivo abatir el aumento constante en el consumo de energía en todo el mundo y, como consecuencia, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Si bien, el consumo de energía en los edificios públicos pudiera no representar directamente un porcentaje importante en las emisiones, si representa una oportunidad relevante para el cambio cultural entre la población en general y es aún más importante en la población escolar, ya que jóvenes y profesionistas de hoy y del mañana tienen la oportunidad de aprender cómo llegar a ser ciudadanos con una conciencia ambiental, por lo tanto, la investigación de soluciones para la reducción de consumos de la energía en los edificios escolares debe ser prioritario.

## Objetivos

Para emprender acciones, es necesario contar con el diagnóstico del consumo de energía; en su sentido, el objetivo de esta contribución es realizar el diagnóstico del consumo total en  $\text{kWh}$  en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji durante el 2014, y sentar las bases para la evaluación del cambio cultural.

## Metodología

### Localización de la UTTT

Como se observa en la ilustración 1, las instalaciones de la universidad cuentan con una gran infraestructura que abarca no solo los programas educativos, además se cuenta con áreas administrativas, laboratorios pesados y tecnológicos. En el momento en que se realizó el estudio el total de individuos fueron 9280 de los cuales 400 eran administrativos y 2467, 2036 así como 3555 alumnos respectivamente en cada uno de los cuatrimestres.

Ilustración 1. Distribución de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji.



**Fuente:** Adaptación de vista aérea descargada de Google Earth (fecha de imagen: 7/1/2013). Nomenclatura: B: Biblioteca; C: Cafetería; ZRE: Zona de reserva ecológica; vi: Vinculación; R: Rectoría; Re: Residencias; PP: Procesos de producción; TI: Tecnologías de la Información y Comunicación; QA: Química área Tecnología Ambiental; MI: Mantenimiento Industrial; ID: Idiomas; co: contaduría; ME: Mecánica; DE: Negocios y Logística; LC: Laboratorio de Cómputo; Lab I, II, III, IV: Laboratorios de Ciencias y Tecnología; E1,2,3: zonas de estacionamiento, PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

## Ruta metodológica

Se midió el consumo para cada mes en el año y de igual forma se calculó el consumo por persona, considerando la matrícula en cada uno de los tres cuatrimestres y el personal tanto administrativo como docentes; además se calculó el consumo de energía a través del índice de utilización de energía en  $\text{kWh}/\text{m}^2$ , de acuerdo a la metodología establecida por Alajmi (2012), que menciona que éste índice se obtiene dividiendo el consumo anual de energía por la superficie bruta construida, cabe mencionar que se seleccionó este índice ya que es utilizado para comparar el consumo de energía de edificios de la misma naturaleza.

## Resultados y discusión

El consumo de energía eléctrica medido en pago económico varía mensualmente desde los \$110,00.00 hasta los \$138,000.00; realizándose anualmente un pago aproximado a \$1,488, 000.00. El consumo total de Kilowatts/hora por mes durante el año 2013 se muestra en la tabla 1, donde se puede observar que el mes con menor consumo fue diciembre y el de mayor consumo fue septiembre con 51 018 y 64 038  $\text{kWh}$  respectivamente.

De igual forma en la tabla 1, se presenta el consumo per cápita en la universidad por cada mes, considerando la matrícula de cada cuatrimestre más los administrativos y docentes.

Tabla 1. Kilowatts por hora consumidos en la UTTT.

Mes	Individuos por cuatrimestre	Demanda máxima kw	Consumo total $\text{kWh}$	Consumo por persona
Enero	2867	154	55 131	0.62
Febrero		162	62 724	0.78107143
Marzo		159	59 814	0.69533333
Abril		158	52 551	0.69580645

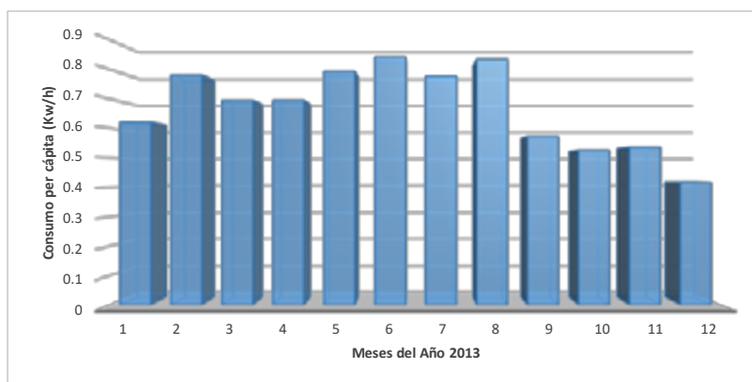
Continúa.

Mayo		134	59 895	0.79290323
Junio	2436	136	61 575	0.84233333
Julio		137	58 626	0.77612903
Agosto		143	63 006	0.83419355
Septiembre		164	68 034	0.57333333
Octubre	3955	166	64 500	0.52580645
Noviembre		184	63 558	0.53566667
Diciembre		183	51 018	0.41580645

**Fuente:** Hernández-González, 2014.

Los resultados anteriores se pueden observar en forma de gráfica en la figura 1, tanto de consumo mensual como de consumo por persona en cada mes.

Figura 1. Consumo per cápita de energía eléctrica en el año 2013 en la UTTT.



**Fuente:** Hernández-González, 2014.

El consumo total de energía eléctrica en la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji en el año 2013, fue de 720,432 kw/h (0.720432 gwh), donde el mes de mayor consumo fue el mes de septiembre con 68 034 kw/h y el de menor consumo fue diciembre con 51 018 kw/h (figura 1); si se observa detenidamente la tabla 1., se puede identificar que los meses de mayor consumo están en el último cuatrimestre del año, esto puede ser explicado en relación a que este es cada año el cuatrimestre que mayor población estudiantil (3476 en 2013) y el mes de diciembre es el de menor consumo a pesar de



estar dentro de este cuatrimestre, lo cual puede ser debido a que hay un periodo vacacional de 15 días; dato que se relaciona con lo encontrado por Hussain (2013) donde los consumos eléctricos para los meses donde hubo periodos vacacionales cercanos a los 12 días fueron menores al resto del año. Cabe mencionar que como el esquema de trabajo de la Universidad es intenso, donde el periodo vacacional más largo es en el mes de diciembre (2 semanas), semana santa una semana y en julio una semana de igual forma, teniendo 44 semanas efectivas de clases; laborando normalmente sin alumnos en los periodos intercuatrimestrales. La demanda máxima es en diciembre y es la segunda más grande durante el año a pesar de que este mes es el que presenta una suspensión de actividades durante dos semanas, esto puede ser debido a adornos navideños que están prendidos durante 18 horas aproximadamente; la demanda mínima fue en los meses de mayo, junio y julio, esto puede ser debido a que la incidencia solar se incrementa en estos meses y la cantidad de luz que penetra en los edificios es mayor, lo que hace que las luces se enciendan mucho más tarde que en los meses invernales, aunado a que en estas fechas no se colocan adornos que consuman energía y son meses que poseen una menor matrícula.

A través de estos datos de demanda máxima y consumo total en kw/h (tabla 1), podemos inferir que la carga principal corresponde al sistema de alumbrado público o exterior y a que los edificios pueden quedar con aparatos eléctricos conectados principalmente computadoras en las áreas administrativas y equipos pesados en los laboratorios; como lo reportaron para otras Instituciones mexicanas como Ciudad Universitaria de la UNAM (Escobedo, *et.al.*, 2014); en el caso de Kuwait donde el consumo de energía durante y después de las horas laborales mostró que muchos de los accesorios de iluminación se quedaron prendidos después de las horas de trabajo (Alajmi, 2012) y de Arabia Saudita donde se encontró que el mayor consumo se da fuera de las horas de trabajo donde la central de aire acondicionado sigue funcionando y las luces se dejan encendidas (Hussain, 2013). Es interesante ver que estudios como el de Hussain, (2013), infiere que el factor humano es importante ya que durante el periodo laboral están al pendiente de dejar apagados o desconectados los aparatos electrónicos o las luces, sin embargo, al finalizar las horas de trabajo y dejar encendidos los equipos pasan más de 18 horas consumiendo energía contra las seis horas laborales en la universidad donde se realizó el estudio. Para el caso de la UTTT, hay que considerar además del alumbrado y los equipos de las zonas administrativas, en cada edificio de



los programas educativos se cuenta con una aula de cómputo, a excepción de Negocios y Gestión Empresarial y Tecnologías de la Información y Comunicación, que cuentan con dos aulas y el nuevo edificio llamado Laboratorio de multimedios que posee cuatro aulas de cómputo y de las cuales los equipos y los servidores no son desconectados, eso explicaría un mayor consumo en estas áreas, como sucedió en los Institutos de Investigaciones Antropológicas y el Instituto de Química de la UNAM (Escobedo, 2009).

Posteriormente se identificó el indicador como consumo en kw/h per cápita que durante el diagnóstico (2013) en promedio fue de 0.674; se observa que en el año el consumo no sufre grandes variaciones (tabla 3.7), esto puede ser traducido a que a pesar de la que la población estudiantil de un cuatrimestre a otro puede variar de 400 hasta 1400 estudiantes, el consumo individual representa un mínimo consumo a comparación del consumo que representa la iluminación de las instalaciones ya que independientemente de que haya o no alumnos, todos los edificios son iluminados durante un periodo mínimo de 8 horas por 5 días a la semana durante 44 semanas al año mínimo. Utilizando este indicador, la UTTT tuvo un consumo en el 2013 de 0.674 kw/h/per cápita promedio, que es superior si se compara con el consumo per cápita de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería (Universidad Equinoccial), Quito Ecuador (0.4342) (Viteri, 2013), inferior a la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) con un consumo per cápita de 499 kw/h (Ramírez, 2003) y de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UNAL) con 589.4 kw/h en el 2013 (<http://sds.uanl.mx/energia/>). Cabe mencionar que pocas universidades nacionales e internacionales cuentan con datos publicados sobre el indicador de kw/h/per cápita, a pesar de que muchas IES cuentan con información de la huella ecológica, huella de carbono y elaborados Planes Ambientales Institucionales, no se cuenta con cifras sobre el consumo, únicamente se dan sugerencias o recomendaciones de reducción y ahorro de energía. Lo anterior da cuenta de la necesidad de estudios de diagnóstico de consumo, así como la construcción de una metodología que sienta bases sólidas de comparación y acciones de ahorro.

Se encontró que el indicador más utilizado para comparar el consumo de energía es el índice de utilización de energía en kWh/m<sup>2</sup> por año, ya que con este índice se puede comparar el consumo entre edificios de la misma naturaleza, motivo por el cual se calculó este indicador. Necesario es mencionar que hay estudios que refieren que en América Latina los estudios en edificaciones están dirigidos a el diseño arquitectónico y si impacto en el consumo de energía eléctrica, no se encontraron datos de universidades

latinoamericanas para el rubro. Según el índice de consumo de energía la UTTT en el 2013 tuvo un consumo de 53.72 kWh/m<sup>2</sup>/año. Si se observa la tabla 2, se verá que el consumo de la Universidad Tecnológica es mayor al del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM (37), de la Universidad de Ucrania (33.7) y los edificios universitarios de Guangdong (30.61), sin embargo, tiene un menor consumo que el Instituto de Química de la UNAM (96.6) y que el Edificio de la Facultad de Ingeniería de Arabia (266). El mayor consumo de la UT en este caso puede ser debido al mayor tiempo de utilización de las áreas de la UT; en comparación con las IES de Ucrania y China hay que considerar que estos consumos son arrojados posterior a la implementación de programas de ahorros de energía. En el caso Instituto de Química de la UNAM hay que resaltar que además de los requerimientos académicos, en este Instituto se realiza gran cantidad de trabajos de investigación que requieren de equipos especializados y servidores o procesadores de información que no pueden ser desconectados y que su vez incrementan el consumo de energía y para el caso de las escuelas europeas y de Arabia, la mayor parte del consumo energético es derivado del uso de aire acondicionado, representando en algunos casos hasta el 91% del consumo total de energía.

El consumo de la UTTT es menor que en comparación con escuelas secundarias de Chipre (62.75) y que en escuelas secundarias de Italia y Alemania (93 respectivamente), escuelas de Eslovenia (192) y primarias de Irlanda (96); donde el consumo energético es mayor por el uso del aire acondicionado y la UTTT tiene un mayor consumo que en lo reportado para escuelas de Grecia (14.31) y escuelas primarias de Luxemburgo (26), donde habrá que analizar el tiempo de utilización de las instalaciones.

Tabla 2. Índice de utilización de energía en diversas Instituciones de Educación.

Tipo de la edificación	Ubicación	Consumo en kWh/m <sup>2</sup> /año
Instituto de Investigaciones Antropológicas (Escobedo, 2009)	Ciudad Universitaria, México, D.F.	37
Instituto de Química (Escobedo, 2009)	Ciudad Universitaria, México, D.F.	96.6
Universidad (Deshko y Shevchenko, 2013)	Ucrania	33.7

Continúa.

Edificio de la Facultad de Ingeniería (Hussain, 2013)	Rabigh, Arabia Saudita	266
Edificios de Universidades (Xuan, et. al., 2013)	Guangdong, China	30.61
Escuelas secundarias (Katafygiotou, 2014)	Chipre	62.75 promedio
Escuelas secundarias (Dall’O y Sarto, 2013)	Italia	93
Escuelas (Dimoudi y Kostarela, 2009)	Grecia	14.31
Escuelas (Beusker, et.al., 2012)	Alemania	93 promedio
Escuelas viejas (Butala y Novak, 1999)	Eslovenia	192
Escuelas primarias (Hernández, et. al., 2008)	Irlanda	96 promedio
Escuelas primarias (Thewes, et. al., 2014)	Luxemburgo	26

**Fuente:** Hernández-González, 2014.

Cabe destacar que los edificios escolares se caracterizan por su uso peculiar, es decir, las horas diarias y semanales de ocupación, los usos diferentes durante el día, y los diferentes volúmenes de uso (aulas, oficinas, laboratorios, gimnasios, cafeterías, sanitarios y almacenes de aseos,) como menciona Umberto (2002), aunado a que el problema de un uso racional de la energía en los edificios escolares está además relacionado a una gestión y mantenimiento continuo y calificado.

Para las escuelas europeas el consumo de energía eléctrica ha disminuido en gran medida, esto porque a nivel europeo se han desarrollado estrategias especialmente para este sector mediante una legislación específica y se ha dirigido a proyectos con apoyo económico (Butala y Novak 1999, Dalló y Sarto, 2013, Katafygiotou, 2014), por lo que se han realizado, como se observó anteriormente, mediciones al respecto en escuelas de diversos niveles, lo que obliga y a su vez conduce a las escuelas a sentar

nuevas bases al interior y exterior de las mismas para el consumo de estos recursos y contribuir a un cambio cultural.

Aunado a lo anterior, durante el 2012 se llevó a cabo un estudio en la Universidad para validar el ahorro energético que se tendría si se sustituyera la tecnología en iluminación de las lámparas de los pasillos, las cuales en esos momentos las que se empleaban eran de vapor de mercurio. En el análisis se consideró a las lámparas de LED y a las lámparas de inducción magnética como las que brindarían mejores costos-beneficios. En el estudio se consideró la potencia consumida en Kilowatts/hora por tecnología en cada mes del 2012, siendo que cada lámpara de vapor de mercurio consume 260 watts, las de LED 60 watts y las de inducción magnética 50 watts. En la tabla 3 se muestran el gasto mensual con cada una de las tecnologías que se pudieran emplear para iluminar los pasillos, que en este caso, para iluminar los pasillos de la UTTT se tienen instaladas 35 lámparas y estas operan durante 12 horas en promedio al día.

Tabla 3. Comparación del gasto mensual que generarían las 35 lámparas de: Vapor de mercurio, LED's e Inducción Magnética que iluminarían los pasillos de la UTTT en el periodo 2012.

Tipo de Lámpara	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Vapor de Mercurio	\$6121	\$5733	\$5807	\$4829	\$5085	\$5154	\$5495	\$5535	\$5065	\$5203	\$5066	\$5613	\$64704
LED'S	\$1238	\$1158	\$1174	\$1035	\$1044	\$1057	\$1126	\$1133	\$1040	\$1067	\$1082	\$1166	\$13320
Inducción Magnética	\$979.3	\$917.2	\$929.1	\$805.4	\$813.5	\$824.7	\$879.2	\$885.6	\$810.4	\$832.4	\$854.1	\$913.3	\$10444

Fuente: Hidalgo, E. 2013.

El ahorro del gasto que se generaría si se emplearan las lámparas de LED sería del 79.5%, mientras que las de inducción magnética 83.85%. Con estos ahorros, el tiempo de recuperación de la inversión sería en 15 y 14 meses respectivamente.

Si este tipo de cambio de tecnologías se hiciera también en los edificios, los ahorros por consumo de energía eléctrica serían bastante considerables en cualquier institución. Por lo que este tipo de estudios y de indicadores sientan las bases para establecer normatividad en materia de ahorro y uso eficiente de energía en la UT, lo que puede a su vez conducir en la disminución en gastos operativos. Un cambio de tecnología es ya



un cambio cultural, pero además de ello es de suma importancia el establecimiento de medidas educativas para lograr el apagado de las luminarias y equipos electrónicos por el personal al abandonar su área de trabajo y sus aulas en el caso de los alumnos. Siendo esta una gran área de oportunidad ya que a nivel mundial las tendencias actualmente están en la disminución del consumo energético para la calefacción o el aire acondicionado como lo mencionan (Kazanasmaz, *et. al.*, 2014; Paudel, *et. al.*, 2014; Kim, *et. al.*, 2014), en el caso de la UTTT se pueden implementar programas de reducción de energía y además programas de adopción de energías renovables solar y fotovoltaica, esto porque la UTTT cuenta con el capital intelectual a través de los profesores y alumnado de la Ingeniería en Energías Renovables para conducir dichos programas.

Otra vertiente es la responsabilidad universitaria en el manejo de sus residuos, los generados por el uso de las lámparas fluorescentes que contienen vapor de mercurio y a las cuales se les deberán de dar una adecuada disposición final ya que se han observado en la parte más posterior de la universidad que se mantienen a la intemperie, por lo que se sugiere que se puedan almacenar en un área más adecuada en la que se eviten reacciones con otros elementos como el agua, contratar el servicio de empresas autorizadas para disponer de dichos residuos; además de lo anterior, es sumamente importante mencionar que se debe evitar a toda costa utilizar lámparas que tengan contenido de bifenilos policlorados por los altos impactos ambientales y a la salud humana que pueden provocarse; por lo que además se sugiere que puedan realizar inventarios para identificar las áreas donde se deben separar los interruptores para las lámparas para así evitar el encendido de lámparas de forma innecesaria, así como convenios con empresas específicas de la región o del país para la sustitución de las lámparas más eficientes y con menor consumo eléctrico y ambiental del mercado. Haciendo énfasis que en el campo de la educación ambiental, los resultados deseados y los impactos de los programas en contextos formales y no formales son a menudo algún tipo de conocimiento, actitudes, valores, habilidades y comportamientos relacionados con el ambiente (Ardoin, *et al.* 2014), de ahí la importancia de entender las actitudes y el comportamiento de los estudiantes hacia el ambiente y el encontrar formas efectivas de influenciar este comportamiento a través de la educación (Zsóka, Szerényi, Száchy and Kocsis, 2013). Es así que la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji en su compromiso con la sustentabilidad como punto focal de la Carta de la Tierra en el estado de Hidalgo y como uno de los mayores centros educativos en la Región se ha propuesto estructurar



un programa de educación ambiental no formal con el cuál pueda contribuir a modificar los valores, comportamientos, conocimientos y actitudes ambientales, es decir, la cultura ambiental de sus estudiantes y personal administrativo y directivo en primera instancia y posteriormente influenciar a la población aledaña y de la región. Por tal motivo, se realizó el Programa de educación ambiental de ámbito no formal, enfocado bajo el modelo de enseñanza basado en competencias, a partir del cual los sujetos que participen en el programa puedan tener un aprendizaje a partir de la reflexión, acción y la construcción de aprendizajes significativos, diseñado con un enfoque cognoscitivo constructivista, centrado en el sujeto. Es importante resaltar que cada una de las lecciones y actividades que se han construido en el programa pueden ser acopladas para otras Instituciones de Educación Superior o para cualquier otra situación, actividad específica y más aún que pueda ser trasladada a la sociedad circundante de la universidad y a la sociedad en general para propiciar una cultura ambiental y energética en la misma, contribuyendo así a la adaptación al cambio climático.

### **Conclusión**

El diagnóstico del desempeño ambiental es un paso obligado para sentar la línea base de evaluación ante la implementación de acciones de gestión, educativas u otras que modifiquen la cultura ambiental de las organizaciones y las personas. En este estudio se documenta el consumo de energía eléctrica en la UTTT, sentando las bases las señaladas. Un hallazgo importante fue el hecho de que no existe suficiente información disponible respecto a este tipo de consumo en otras Instituciones de Educación Superior que permitan la comparación entre ellas, también quedó en evidencia la necesidad de construir y validar una metodología que permita realizar mediciones replicables y comparables.

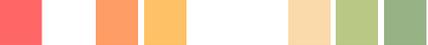
## Referencias

- Agüero, J. C. (2009). Universidad para la sustentabilidad: el reto actual, en Primer Foro Universitario Construyendo juntos nuestro futuro, Universidad Veracruzana, Orizaba-Córdoba.
- Alajmi Ali (2012) *Energy audit of an educational building in a hot summer climate*. *Energy and buildings* 47. pp. 122-130.
- Ardoin, N. M., DiGiano, M., Brundy, J., Chang, S., Holthuis, N. y O'Connor, K. (2014) Using digital photography and journaling in evaluation of field-based environmental education programs. *Studies in Educational Evaluation* 41 (2014) 68-75.
- Beusker, E., Stoy, C. y Pollalis, S.N. (2002) Estimation model and benchmarks for heating energy consumption of schools and sport facilities in Germany. *Building and Environment* 49 324-335.
- Butala, V y Novak, P. (1999) Energy consumption and potential energy savings in old school buildings. *Energy and Buildings* 29 (3) 241-246.
- Camarena Gómez, B. O. (2006). La educación ambiental en el marco de los foros internacionales: una alternativa de desarrollo. *Revista Estudios Sociales*. Julio- Agosto 2006. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/estsoc/v14n28/v14n28a1.pdf>. Consultado 30 de agosto de 2017.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2007). *Regionalización*. Autor. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/regionalizacion.html> Consultado el 18 de mayo de 2013.
- Cordera, R. y Sheinbaum, D. (2008). Los retos de la autonomía universitaria en la sociedad del conocimiento. *Universidades*. Vol. 58 (36), pp.83-910.
- Dall'O, G. y Sarto, L. (2013). Potencial and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy. *Energy and Buildings* 67 pp298-308.
- Deshko, V.I. y Shevchenko, O.M. (2013). University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach. *Energy and Buildings* 66 pp.582-590.
- Diario Oficial de la Federación. (2013). Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018. Disponible en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5326214&fecha=12/12/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5326214&fecha=12/12/2013). Consultado el 5 de julio de 2014.
- Escobedo, A., Briceño, S., Juárez, H., Castillo, D., Imaz, M., & Sheinbaum, C. (2014). Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico. *Energy*

*for Sustainable Development*, 18, 49-57.

- Escobedo Izquierdo Manuela Azucena. (2009). *Análisis y modelación del consumo de energía eléctrica en edificios universitarios con base a usos finales y parámetros arquitectónicos; Caso UNAM-CU*. (Tesis doctoral). Maestría y Doctorado en arquitectura.
- Hernández-González, Sonia (2014). *Diagnóstico de la dimensión física de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji como base para un Programa de Educación Ambiental*. (Tesis de Maestría. No publicada). CIIEMAD-IPN, México.
- Hernández, M.J. y Tulbury, D. (2006). Educación para el Desarrollo Sostenible ¿Nada nuevo bajo el Sol?, consideraciones sobre cultura y sostenibilidad. *Revista Iberoamericana de Educación*. (40) pp. 99-109.
- Hernandez, P., Burke, K. y Lewis, J.O. (2008). Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: an example for Irish primary schools, *Energy and Buildings* 40 (3) 249-254.
- Hidalgo, E. (2013). *Análisis y tendencias de las tecnologías actuales en iluminación aplicadas en el ahorro de energía eléctrica* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Chihuahua, Chi.
- Hussain Sait Hani (2013). Auditing and an analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conservation and Management* 66. pp 143-152.
- Katafygiotou, M. C. y Serhides, D. K. (2014) Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus; Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school. *Energy and Buildings* 72 pp. 8-16.
- Kazanasmaz, T., Erlalelitepe, I., Güiden, G. A., Turhan C. y Evren K. E. (2014). One the relation between architectural considerations and heating energy performance of Turkish residential buildings in Izmir. *Energy and buildings*. 72, pp. 38-50.
- Kim, Y.W., Ramousse, J., Fraise, G., Dalicieux, P. y Baranek, P. (2014). Optimal sizing of a thermoelectric heat pump (TPH) for heating energy efficient buildings. *Energy and buildings*. 70 pp. 106-116.
- Paudel, S., Elmtiri, M., King, W.L., Le Corre, O. y Lacarriere, B. (2014). Pseudo dynamic transitional modeling of building heating energy demand using artificial neural network. *Energy and buildings*. 70. pp. 81-93.
- Plan Nacional de Desarrollo (2007). *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*. Disponible en: <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/> Consultado el 18 de enero de 2013.
- Ramírez Piris Nerea. (2003). Ahorro energético en la enseñanza. Estudio técnico y social de la UNAM. Propuesta de ahorro. (Resumen de proyecto del fin de carrera de la Licenciatura de Ciencias Ambientales). Junio 2003.

- 
- Semarnat – Consejo Estatal de Ecología del Estado de Hidalgo. (2009). Programa de Educación Ambiental del Estado de Hidalgo.
- Sosa, S.B., Isacc-Márquez, R., Eastmond, A., Ayala, M.E. y Arteaga, M.A. (2010). Educación Superior y Cultura Ambiental en el Sureste de México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 26(1) pp. 33-49.
- Thewes, Andreas, Maas Stefan, Scholzen Frank, Waldmann Daniele y Zürbes Arno. (2014). Field study on the energy consumption of school buildings in Luxemburg. *Energy and Buildings* 68 pp. 460-470.
- Universidad Autónoma de Nuevo León. Secretaría de Desarrollo Sustentable. Diagnóstico eléctrico. Disponible en: <http://sds.uanl.mx/energia/> Consultado el 23 de febrero de 2014.
- Viteri Moya, Fausto René. (2013) cálculo de la huella de carbono de la facultad de ciencias de la ingeniería de la Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador. (Tesis de Maestría no publicada), Escuela Politécnica del Ejército. Agosto 2013.
- Xuan Zhoua,B., Junwei Yana,b, Junwen Zhuc, Panpan Cai. (2013), Survey of energy consumption and energy conservation measures for colleges and universities in Guangdong province. *Energy and Building* 66 pp. 112-118.
- Zsóka, A., Szerényi, Z. M., Széchy A. and Kocsis, T. (2013) Greening due to environmental education? Environmental knowledge, attitudes, consumer behavior and everyday pro-environmental activities of Hungarian high school and university students. *Journal of Cleaner Production* 48 (2013) 126-138.



La versión digital de Medio ambiente y sociedad:  
Potencial de la energía renovable en México, terminó de editarse  
en noviembre de 2018.

