



Producción de biogás con nopal

José Luis Arvizu Fernández

Abstract

In this article are described the activities undertaken following the IIE interest to use the nopal as an input for the production of biogas, as the experimentation carried on with the objectives of determining the yields of biogas per unit mass of the cactus, and the conditions under which this is possible, based on the design parameters and operation of the plant of 100 m³ built and operated by the private initiative in Camémbaro Michoacán. So far most of the questions about the real benefits of nopal farming for energy through biogas production, have not been revealed. As should continue efforts to carry out the tasks that have been postponed, and that largely they have been made by the Camémbaro private sector producers of tortilla and nopal.



Antecedentes

En el año 2010 inició el interés del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) por determinar la factibilidad de producir biogás a partir del nopal, motivado por la búsqueda de fuentes de energía renovable de acuerdo a la ley de promoción de los bioenergéticos, a la ley de energías renovables y a la ley de cambio climático aprobadas en el sexenio anterior. En el marco de estas leyes se han apoyado proyectos a través de diversos fondos como los sectoriales de CONACYT con la SAGARPA y la SENER, sobre proyectos basados en cultivos no tradicionales y poco conocidos en nuestro país como el de la *Jatropha curcas*, la higuera y la remolacha, por mencionar algunos, enfocados a la producción de bioetanol y biodiesel. Sólo uno o dos proyectos conocidos han sido apoyados para la producción de biogás a partir del nopal, el cual tiene la ventaja de ser un cultivo muy conocido históricamente en nuestro país, al menos como fuente de alimentación. El interés surgió a partir de la iniciativa empresarial surgida en Camémbaro, Michoacán, mediante la construcción y puesta en operación



de un biodigestor para la producción de biogás en 2010 (figura 1). Esta planta ha estado en operación hasta la actualidad (2015). El biodigestor tiene un volmen de 100 m³ y una capacidad de tratamiento de ocho toneladas de nopal por día, no obstante, obedeciendo a los recursos disponibles se ha operado hasta el momento a un 20% de su capacidad nominal. Con su operación al 100% se demostraría que la tecnología es factible técnica y económicamente, a través de un estudio de factibilidad que monitoree, registre y verifique la operación de la planta a plena capacidad.

Importancia comercial del nopal en nuestro país

Los altos rendimientos de biomasa del cultivo del nopal y sus bajos requerimientos de agua, nutrientes y suelos en climas desérticos y semidesérticos con poca o baja precipitación pluvial, lo sitúan como una importante fuente de bioenergéticos a través de su conversión a biogás mediante el proceso de digestión anaeróbica. El nopal tiene variadas aplicaciones, entre otras en la industria de alimentos y bebidas, en la farmacéutica, la cosmética, la textil, en el sector de la construcción, y nuevas, en el sector energético para la producción de biogás y en el ambiental como fijador de carbono. En nuestro país existen cuatro productos con valor comercial



derivados del nopal que son el nopal verdura, la tuna, el nopal forrajero y la grana cochinilla (tabla 1). Después del jitomate, el chile verde y la cebolla, el nopal ha sido, en los últimos años, la hortaliza de mayor importancia con una superficie sembrada de 84,000 hectáreas. De éstas se cosechó el 75% en 2009, del que 19.2% correspondió al nopal verdura, 73.6% a la tuna y el 7.1% al nopal forrajero.

El valor de la producción de estos tres productos en ese año fue de \$2,463 millones de pesos, correspondiendo el 58.1% al nopal verdura, el 40.2% a la tuna y el 1.6% al nopal forrajero. Los precios medio rural por tonelada fueron de \$1,925/ton de nopal verdura, \$2,877/ton de tuna y \$339/ton de nopal forrajero, este último es el de interés para producir biogás. De las 18,100 has sembradas, sólo se cosecharon 4,500 has (25%). Los principales Estados productores son Zacatecas, Coahuila y Aguascalientes con el 99.3% del volumen



Figura 1. Planta de Biogás de Nopal en Camémbaro, Michoacán.

producido y el resto Chihuahua, Jalisco, Guanajuato y Sonora. Se han registrado rendimientos de hasta 207 ton/ha/año bajo el régimen de riego. Los precios fluctuaron para el mismo año entre \$216/ton en Aguascalientes, y \$401/ton en Zacatecas. El valor de la producción fue de \$40 millones de pesos, para un volumen de 118,300 t/año.

Potencial energético del nopal

Para estimar el potencial energético del nopal, por homologación se consideró el potencial de generación

de biogás de los residuos de frutas y legumbres experimentado por el IIE, como parte de sus proyectos de investigación histórica sobre el tema, encontrando que se puede generar como máximo 11 m³ de biogás por metro cúbico de digestor o reactor por día ($\text{m}^3_{\text{Biogás}}/\text{m}^3_{\text{Reactor}}/\text{d}$) con un contenido de metano del 72%, a cargas orgánicas en términos de sólidos volátiles (SV) por metro cúbico de reactor por día de 9.8 kg SV/m³_{Reactor}/d, a tiempos de residencia hidráulico (TRH) de dos días y temperaturas entre los 23°C y los 27°C a escala de 100 litros de volumen de reactor. Lo anterior implica que por cada kg de SV alimentado se pueden generar bajo las condiciones citadas, 0.71 m³ de biogás/kg SV alimentado o 0.41 m³CH₄/ kg SV alimentado. Este último valor es del mismo orden de magnitud que los rendimientos promedio determinados en la conversión de cultivos a CH₄ en

	Verdura	Tuna	Forraje	Grana	
Sup sembrada Ha	12,500	53,300	18,100	100	84,000
Sup cosechada Ha	12,100	46,300	4,500		62,900
Producción Ton	721,400.0	344,100.00	118,300.00		1,183,800.0
Rendimiento Ton/Ha	59.8	15.7 R/7.3 T	141R/24.5T		
Precio medio rural \$/Ton	2,571.9	2,877.4	339.0		
Valor promedio millones de pesos	1,432.9	990.0	40.1		2,463.0
Precios central de abasto \$/Kg julio	0.6	0.3			
Precios central de abasto \$/Kg enero	1.2	0.5			

Fuente: Monografías del Nopal, Financiera Riral, SIAP-SAGARPA.

Tabla 1. Producción de nopal en México 2009, 2010.



plantas comerciales en Europa, y que es de $0.431 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ que fluctúan entre $205 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ para maíz y $658 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ para cebada.

De los análisis realizados a nopales muestreados en mercados de la ciudad de Cuernavaca y los alimentados al reactor de la planta de Camémbaro, se han determinado valores que indican que cada tonelada de nopal contienen en promedio 60 kg SV/t de nopal, y una humedad que va del 90% al 95%. Por lo que el potencial de generación de biogás y metano del nopal, homologándolo con los valores de los cultivos citados, es de $25 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton nopal}$ o 40 m^3 biogás/ton nopal en promedio, ya que el contenido de SV del nopal fluctúa entre 90 kg y 30 kg por tonelada de nopal fresco. Bajo las condiciones de la conversión de residuos de frutas y legumbres a biogás, el nopal podría producir $6.5 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{m}^3_{\text{Reactor}}/\text{d}$ a tiempos de residencia de dos días, para el reactor de Camémbaro de 100 m^3 de volumen, y su capacidad máxima sería igual al doble de la de diseño, es decir, 16 ton de nopal por día. Cabe destacar que la productividad energética del nopal depende fundamentalmente de dos valores: el rendimiento de biogás, y el rendimiento del cultivo en toneladas de nopal por hectárea de superficie cosechada.

El cultivo de la caña de azúcar es uno de los productos agrícolas más importantes en nuestro país, su generación de biomasa es del orden de

las 300 t/ha por zafra en México, si se anualiza, se tendría una producción entre 600t/ha y 800t/ha como sucede en países sudamericanos, por lo que es posible que un cultivo en general y del nopal en particular, alcance estos rendimientos bajo condiciones tecnificadas. Si se considera un rendimiento de 600 t/ha/año y 40 m^3 de biogás/t de nopal, se producirían hipotéticamente $24,000 \text{ m}^3$ de biogás/ha/año, que equivalen a 40 MWh/ha/año . En los Estados de Michoacán y Zacatecas se han citado rendimientos de nopal de 800 t/ha/año. Con estos rendimientos, el potencial energético del nopal sería de 56 MWh/ha/año .

Experimentación en la GER

En la Gerencia de Energías Renovables (GER) del IIE se han realizado de manera intermitente en los años 2010 y 2011, pruebas de laboratorio a escala de mililitros y litros, tanto a régimen *batch* como continuo (figuras 2 y 3), corridas experimentales para determinar la producción y el rendimiento de biogás del nopal. Estas pruebas se interrumpieron en 2012 y se retomaron a finales de 2013 hasta la fecha (2015). Se probaron mezclas de nopal con lodos de un digestor de una granja de cerdos a régimen *batch* en botellas de 250 ml (figura 2). El objetivo de estas



Figura 2. Pruebas de digestión anaerobia de nopal en diferentes proporciones con lodos anaerobios.



Figura 3. Cuantificación y muestreo de biogás en la digestión anaerobia del nopal.

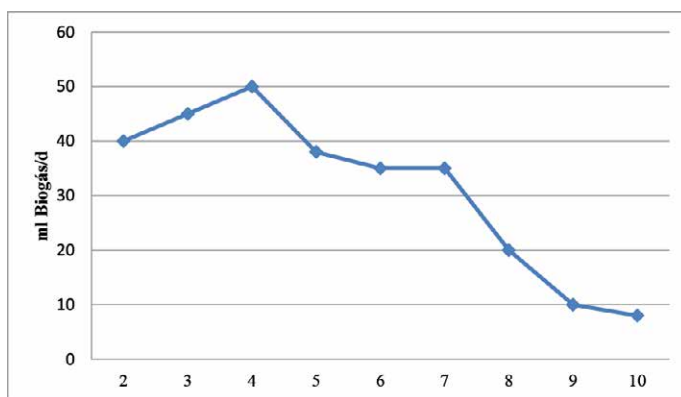


Figura 4. Producción de biogás de nopal en régimen batch.

pruebas fue el de explorar y determinar la biodegradabilidad del nopal para la producción de biogás. La producción de biogás típica se muestra en la figura 4, la cual se obtuvo de la digestión anaerobia de 20 ml de la fracción sólida (pulpa) del nopal verdura adquirido en un mercado de Cuernavaca, que se mezcló con lodos anaerobios porcinos, con adición de hidróxido de sodio para neutralizar el pH. Los mejores resultados se observan en el rango de 15% a 20% de nopal, en tanto que para las mezclas de 50%, 75%, 85% y 100% de nopal, se observó actividad microbiana en la mayoría, y en el de 100% del nopal no existió, por lo que el nopal no se biodegradó a biogás. También se probaron mezclas

en el rango bajo de 0%, 5%, 10% de nopal. En la mayoría de los casos hubo producción de biogás y disolución de la pulpa. Las experiencias anteriores muestran que el nopal se degrada en un periodo de diez a doce días, en condiciones anaerobias establecidas.

Asimismo se efectuaron corridas en reactores de un litro a régimen de alimentación “continuo” (semicontinuo) del jugo de nopal y recirculación continua (figura 5), a temperatura de 35°C. En estas corridas se alimentaron los jugos del nopal, ya que los sólidos de este ingrediente obstruyen el tubo flexible de 4 mm de diámetro de alimentación y recirculación del sistema. El objetivo de estas pruebas fue el de alcanzar las condiciones de carga de alimentación de ocho toneladas por día o su equivalente de 80 g de nopal por litro de reactor, por lo que se alimentaron 20 ml, 40 ml, 50 ml, 60 ml, 70 ml y 80 ml de jugo de nopal al reactor de un litro. En la curva de la figura 5 se puede apreciar la producción de biogás derivada de estas pruebas y como puede observarse, el promedio de este rendimiento fue de 15 ml biogás/ml de jugo de nopal.

Las conclusiones derivadas de estas pruebas son que el jugo alimentado produce la mitad del gas que la pulpa del nopal. Se requiere como mínimo una relación uno a uno de sólidos volátiles en el reactor a sólidos volátiles del nopal, para evitar la inhibición. Se requiere la neutralización del pH con hidróxido de sodio del jugo



Figura 5. Equipo digestión anaerobia del jugo de nopal.

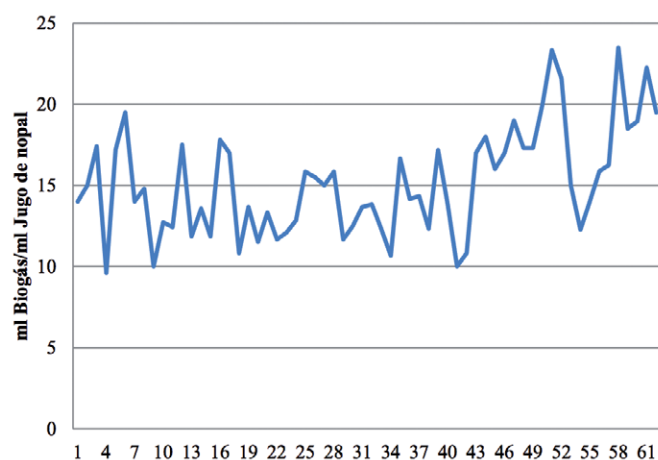


Figura 6. Digestión anaerobia "continua" del jugo de nopal 2010.

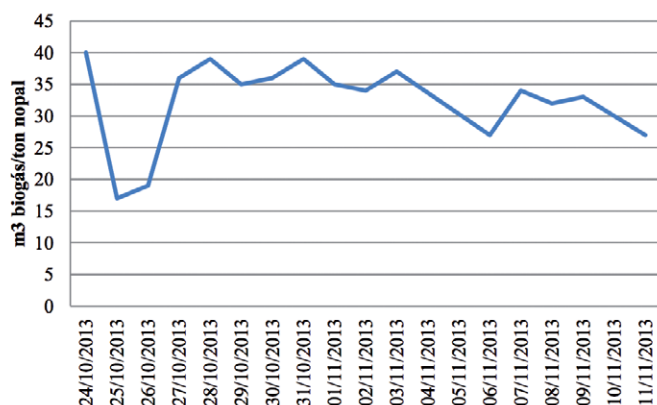


Figura 7. Digestión anaerobia "continua" del jugo de nopal 2013.



Figura 8. Equipo de producción continua de biogás del nopal 2013.

alimentado en las pruebas. Se sugiere continuar con las pruebas empleando nopal y microorganismos de la planta de Camémbaro.

En las pruebas en laboratorio se continuaron empleando nopal y lodos con microorganismos empleados en la planta de Zitácuaro a finales de 2013, y continuaron en 2014 en la misma escala de un litro o menos, con los equipos mostrados en las figuras 8 y 9. En las figuras 6 y 9 se presentan los rendimientos alcanzados en estas pruebas, donde se alimentaron el nopal molido completo y el jugo. Como se puede observar, los rendimientos fueron en promedio de 32.5 ml/ml de jugo de nopal (figura 7) y 15 ml/g de nopal molido (figura 10). Las diferencias en el rendimiento son el resultado de las



Figura 9. Equipo de digestión anaerobia "continua" del nopal 2014.

diferentes condiciones de operación de cada conjunto de experimentos, ya que en el caso del nopal molido se introducía aire una vez al día, al realizar la operación de alimentación al sistema no existiendo opción, dada la escala de las pruebas.

El objetivo fundamental de estas pruebas fue el de obtener rendimientos similares al teórico de 40 m^3 biogás/ton de nopal, equivalentes a 40 ml biogás/g de nopal. Hasta el momento esto no ha sido posible, entre otras causas debido a la escala de las pruebas que limita la simulación física de las condiciones de operación de la planta de 100 m^3 de Camébaro, así como la posible influencia de la pectina, que es un polímero orgánico que pudiera limitar la conversión del carbono a biogás, por la acción de los microorganismos

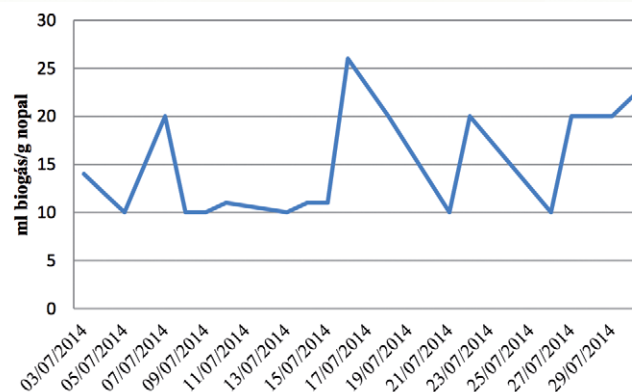


Figura 10. Rendimiento de biogás por unidad de masa del nopal 2014.

correspondientes, y que es un elemento que le da valor al nopal como protector del aparato digestivo cuando es ingerido como alimento por la población. Por lo que en futuras pruebas deberán tomarse en cuenta estos factores, para alcanzar el rendimiento teórico esperado de biogás para el nopal.

Sustentabilidad del nopal

Los impactos positivos y beneficios derivados de la producción de nopal como fuente de energía renovable son de orden social, económico y ambiental. Será posible la creación de empleos permanentes en el campo y empleos indirectos en los sectores energético y comercial afines, aprovechar superficies de cultivo ociosas, desérticas o semidesérticas en el sector agrícola, revalorar el cultivo del nopal en general y del forrajero en particular, mejorando las prácticas de cultivo. Se podrá sustituir diésel por biogás en las labores del campo, así como de electricidad, mitigando el impacto de emisiones a la atmósfera, entre otros, de gases sulfurosos y orgánicos volátiles, brindando una atmósfera menos contaminada en beneficio de la salud de los pobladores del campo y del planeta; generación de combustibles y energía a costos competitivos con los combustibles derivados del petróleo, con lo cual se reducirá en este sector agropecuario la dependencia del diésel y la electricidad, en la medida que los subsidios a estos energéticos disminuya.



La generación de empleos para la producción de nopal es muy significativa, baste citar como ejemplo que en el Estado de Puebla se dedican a la producción de tuna y nopal verdura más de dos mil familias, se tienen establecidas 4,150 hectáreas para la tuna y 1,000 hectáreas para la producción de nopal verdura, esta producción requiere un millón 500 mil jornales por cosecha. Los ingresos por el cultivo del nopal fluctúan entre \$50 y \$60 mil pesos anuales por hectárea, en promedio cada familia posee 2.5 hectáreas, lo cual en 2011 representaba seis veces más los ingresos de lo que se obtiene quien produce maíz y frijol en el mismo espacio de terreno. El nopal forrajero tiene menor precio de \$216.0/ton, que se puede compensar con un rendimiento de 300 ton/ha, lo que implicaría ingresos superiores a los \$60 mil pesos por hectárea.

Observaciones y conclusiones

El nopal tiene muchas aplicaciones y sus productos principales son el nopal verdura, la tuna, el nopal forrajero y la grana cochinilla. Por las características de su cultivo difieren sobre todo en el tiempo de su cosecha. El insumo para la producción de biogás es el nopal forrajero y los desechos derivados de los otros productos que tienen mejor precio, que puede ser compensado por el volumen de su producción tecnificada.

La producción tecnificada del nopal trae impactos positivos y beneficios del orden social, económico, ambiental y energético entre otros, ya que no compite con su producción como alimento, por lo que cumple con esta condición básica establecida en la ley sobre bioenergéticos vigente en nuestro país.

El potencial energético del nopal depende de dos rendimientos importantes: el primero se refiere a su producción en campo, la cual debe ser superior a las 300 ton/ha/año, y por homologación con el cultivo de la caña de azúcar esto es posible al doble. El segundo rendimiento a que se hace referencia tiene que ver con los m³ de biogás generados por tonelada de nopal, lo cual también por homologación con las experiencias en el IIE y rendimientos

reportados en plantas industriales con otros cultivos en Europa, es en promedio 40 m³_{biogás}/ton de nopal. Por lo cual se pueden esperar idealmente poco más de 50 MWh/año/ha, convirtiendo el nopal a biogás y éste a electricidad exclusivamente.

Los objetivos de la experimentación en la GER han sido principalmente, determinar los rendimientos de biogás por unidad de masa del nopal, así como las condiciones bajo las cuales esto es posible, tomando como base los parámetros de diseño y operación de la planta construida y operada por la iniciativa privada en Camémbaro, Michoacán y proporcionados bajo convenio de colaboración con el IIE. La meta es llevar esta planta de 100 m³ de volumen de reactor a su capacidad de diseño, para lo cual se requieren fondos como el de sustentabilidad energética que han sido solicitados, ya que hasta el momento se opera a un 20% de su capacidad. El financiamiento permitirá determinar su factibilidad técnica y económica y la transferencia de la tecnología.

Hasta el momento, gran parte de las interrogantes sobre los beneficios reales del cultivo del nopal con fines energéticos a través de la producción de biogás, permanecen, por lo que resulta importante continuar con los esfuerzos para llevar a cabo las tareas que han sido pospuestas, y que en buena medida han sido realizadas por la iniciativa privada de los productores de nopal y tortilla de Camémbaro.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento por la información, materiales y confianza proporcionada por la empresa “El Manjar del Campo”, al Sr. Rogelio Sosa López y al Maestro Miguel Aké Madera, propietarios de la planta de nopal de biogás de Camémbaro.

Referencias

Aké, M. (2014). *El Oro Verde de México, El Santo Grial de las Energías Renovables*. México, D.F.

Monografía del Nopal y la Tuna; Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial; Financiera Rural. Julio 2011.

Arvizu, J. L. y Martínez A. M. (1990). *Obtención de gas combustible a partir de desechos de frutas y legumbres*. Memorias de la 1ª Semana de Ingeniería en Energía y Recursos Energéticos; Universidad de San Luis Potosí.

Murphy, J., Braun, R., Weiland, P., Wellinger, A. *Biogas from crop digestion*. IEA Bioenergy, Task in 2010-2012 Work Programme.

Vázquez, L. (2011). *Nopal, seis veces más rentable que el maíz y frijol: SAGARPA*. Publicado en El Universal: jueves 28 de julio. México.

Currículum vitae



José Luis Arvizu Fernández
[jlarvizu@iie.org.mx]

Ingeniero Químico por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1980. Investigador de la Gerencia de Energías Renovables del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) desde 1983. Autor de metodologías, procesos y sistemas para la evaluación y transformación energética de los residuos sólidos, aguas residuales y residuos agropecuarios vía procesos térmicos y biológicos. Autor del Inventario Nacional de Emisiones de metano como gas de efecto invernadero sector desechos en 1995, 2000 y 2006. Actualmente es investigador y Jefe de Proyecto. Autor del Inventario Estatal de GEI del sector desechos para el Estado de Puebla. Coautor de los libros: “La Bioenergía en México” y “Cambio climático: una visión desde México”, con el tema: registro histórico de los principales países emisores, así como del “Libro del Maíz” (2010), con el capítulo: biocombustibles derivados del maíz. Coautor y coordinador asociado del libro: “La Bioenergía en México” (2005).