



Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México

Biogas as an alternative source of primary energy for the Jalisco state, Mexico

Vera-Romero Iván

Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo

Correo: ivanverar@gmail.com

Estrada-Jaramillo Melitón

Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo

Correo: mestrada@ucienegam.edu.mx

González-Vera Conrado

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Michoacán

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional

Correo: conrad4u@hotmail.com

Tejeda-Jiménez Martín

Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo

Correo: martin9301@live.com.mx

López-Andrade Xicoténcatl

Universidad Nacional Autónoma de México

Laboratorio de Catálisis Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada

Correo: xicotillo@fata.unam.mx

Ortiz-Soriano Agustina

Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo

Correo: aortiz@ucienegam.edu.mx

Resumen

En México como en muchos países en desarrollo se produce una gran cantidad de *Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*, mismos que podrían utilizarse para la generación de biogás. Por tanto, en el siguiente trabajo se presenta un análisis energético y económico para el aprovechamiento de la fracción metano contenida en el biogás, como energía primaria, proveniente de la descomposición orgánica de tres tipos de estiércoles (bovino, porcino y aviar) y de los RSU generados en todo el estado de Jalisco, esto, como una alternativa energética para la producción de energía eléctrica. Se consideraron costos de inversión para la construcción de biodigestores, de rellenos sanitarios y motogeneradores (MCI), así como la operación y mantenimiento de los mismos a lo largo de un proyecto a 21 años. Se realizó un análisis de valor presente neto acumulado y se estimó el tiempo de recuperación de la inversión sin y con bonos de carbono, para las doce regiones que comprenden Jalisco. Se observó que se obtiene mayor cantidad de energía eléctrica por parte de los biodigestores (16.977GWh) que de los rellenos sanitarios (4.373GWh), así como mayores beneficios económicos al término de la vida útil del proyecto $\$35,031 \times 10^6$ MN y $\$5,404 \times 10^6$ MN, respectivamente.

Descriptores: Biogás, energía eléctrica, energía renovable, biodigestores, rellenos sanitarios, evaluación económica, bonos de carbono.

En relación con los proyectos registrados al MDL que han obtenido RCE's al 30 de junio del 2015 (<https://www.gob.mx/inecc/>), se cuantifican en cinco los proyectos realizados por el manejo de Residuos en Establos de Ganado Vacuno, 35 para Granjas Porcícolas y diez para Rellenos Sanitarios. En ellos no se especifica si son por la quema únicamente del biogás o para la generación de energía eléctrica.

En el reporte emitido por el Instituto de Investigaciones Eléctricas y CFE (2012), existían hasta el momento tres Rellenos Sanitarios en toda la república, con proyectos de generación de energía a través de biogás proveniente de Rellenos Sanitarios (tabla 1).

Existen otros proyectos en puerta y tal vez ya puestos en marcha, sin embargo aún se carece de información específica recopilada en forma de censo y disponible de manera oficial. En el informe emitido por la SENER e IRENA (2015), para el 2013 se cuantificó un total de 44 MW instalados (261 GWh año⁻¹) que usan biogás como fuente primaria, aplicados para autoconsumo y cogeneración sin especificar si pertenecen a Rellenos Sanitarios o Biodigestores. Como se observa en la tabla 1, la captura de biogás en estos sitios y su posterior aprovechamiento para la generación de energía eléctrica (de menor costo), muestran una alternativa viable para aplicarse en las distintas regiones de los estados de la República Mexicana, con un intrínseco beneficio social y ambiental.

Por tanto, México presenta dos desafíos actuales que seguramente en un corto plazo, tendrán que cubrirse de manera inaplazable. Por un lado, la dependencia e incremento en el consumo de energéticos de origen fósil, principalmente de gas natural y carbón para la ge-

neración de energía eléctrica. Y por el otro, la falta de suficiencia en la producción interna de estos y por tanto su importación. Lo cual conlleva a no garantizar una energía eléctrica de bajo costo.

Partiendo de lo anterior, el siguiente trabajo tiene como objeto proporcionar un estudio detallado de los beneficios energéticos y económicos que se podrían obtener, al implementar Biodigestores y Rellenos Sanitarios en las doce Regiones que componen el Estado de Jalisco, aprovechando el biogás captado para la producción de energía eléctrica mediante *Motores de Combustión Interna* (MCI). Se analiza la potencia instalada por región, la generación de energía eléctrica, los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento de los MCI, Biodigestores y Rellenos Sanitarios; *Tiempo de Recuperación de la Inversión* en años (TRI), la obtención del *Valor Presente Neto* (VPN) acumulado al cabo de un análisis de vida útil del proyecto de 21 años. Se adicionan de igual manera, los beneficios por obtención de BC y su impacto en el TRI. Para el caso del análisis del Biodigestor, se consideraron tres tipos de excretas distintas provenientes de los ganados: Bovino, Porcino y Aviar; mientras que para el Relleno Sanitario, se consideraron cuatro escenarios distintos: óptimo, intermedio óptimo, intermedio pesimista y pesimista.

De esta manera, se brinda un panorama de la posible utilización del biogás como una fuente de energía primaria proveniente de fuentes renovables, que pudiera apoyar a la generación de energía eléctrica por regiones, disminuyendo así las pérdidas de energía por transmisión y distribución, así como optimizando su uso final.

Tabla 1. Capacidad instalada en Rellenos Sanitarios. Datos adaptados (Instituto de Investigaciones Eléctricas y CFE, 2012)

Ubicación del Relleno Sanitario	Equipo instalado	Núm. de unidades	Capacidad total instalada (MW)	Uso Final
Municipio de Salinas Victoria, Nuevo León	GE Jenbacher, Modelo JGC 320 GS-L.L.	16 (1.06 MW)	16.96	Alumbrado público, edificios de Gobierno del Estado, Servicios de agua, drenaje de Monterrey, Paseo Santa Lucía, DIF y oficinas de Gobierno, líneas I y II del metro. Así como a socios
San Nicolás, Aguascalientes	Caterpillar	2 (1.35 MW)	2.7	Porteo 100% de la energía producida a la Planta NISSAN de Aguascalientes (asociada con el Municipio de Aguascalientes y ENER-G Natural Power)
Ciudad Juárez, Chihuahua	Caterpillar, Modelo G3520C	3 (1.6 MW)	4.8	Necesidades de autoabastecimiento y alumbrado público municipal de Ciudad Juárez y Nuevo Casas Grandes, Chihuahua. (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2011)
Total			24.46	

METODOLOGÍA

Se seleccionó el estado de Jalisco por ser uno de los estados más importantes en cuanto a su contribución al PIB nacional (6.54%), después de la Ciudad de México (16.52%), Estado de México (9.3%) y Nuevo León (7.29%). A su vez, se consideraron otros factores como los siguientes: es el quinto estado con mayor consumo de energía (5.9 % aproximadamente), se ubica en el cuarto lugar en población, tercero en consumo per-cápita de energía eléctrica y tercero en generación de RSU. Así también, es uno de los estados con mayor representatividad en cuanto a cabezas de ganado: vacuno, porcino y aviar. Con una representatividad nacional de cabezas de vacunos cercana al 8.2% sólo por debajo del estado de Veracruz (12% nacional), 11% aproximadamente en cerdos, por debajo de Sonora con 18.8%; siendo el principal productor de aves de corral con una participación de 14% aproximadamente (www.inegi.org.mx).

El estado de Jalisco cuenta con 125 municipios, los cuales se clasifican e incluyen en doce regiones geográficas (figura 5): Norte, Altos Norte, Altos Sur, Ciénega, Sureste, Sur, Sierra de Amula, Costa Sur, Costa-Sierra Occidental, Valles, Lagunas, Centro.

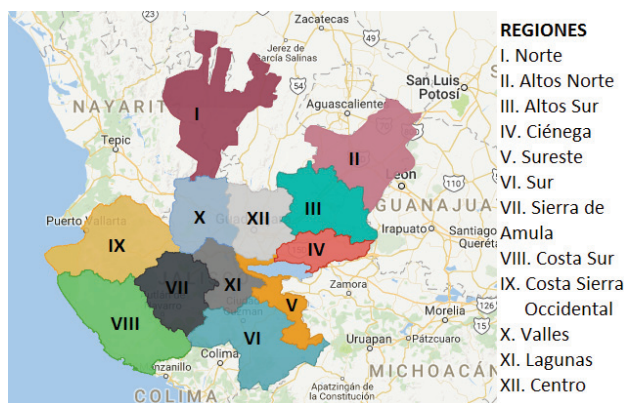


Figura 5. Regiones del estado de Jalisco

ANÁLISIS BIODIGESTOR

Para el análisis del Biodigestor, se requirió el número de cabezas por cada uno de los ganados considerados por cada municipio para posteriormente agruparlos por regiones (tabla 2). Para realizar la clasificación, se realizó una adaptación de acuerdo con los tamaños, con la finalidad de obtener un estimado de las excretas producidas por cada tamaño y tipo de ganado (Martínez, 2007; Vera-Romero *et al.*, 2014). Posteriormente, la producción de excretas se afectó por un factor de produc-

ción de biogás, para así obtener la producción por cada una de las regiones (tablas 3 y 4).

ANÁLISIS RELLENO SANITARIO

Para la estimación que comprende al Relleno Sanitario, se consideraron cuatro escenarios posibles, los cuales se clasificaron en óptimo, intermedio óptimo, intermedio pesimista, pesimista. Cada uno varía entre sí de acuerdo con las características introducidas para su simulación (tabla 5). Para estimar la generación de biogás y energía eléctrica a través de RSU se empleó el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0 (LMOP, 2009, Aguilar-Virgen *et al.*, 2011), el cual se aprecia en la ecuación 1.

$$Q_{LFG} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0.1}^1 2kl_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (1)$$

donde

- Q_{LFG} = flujo de biogás máximo esperado ($m^3 \text{ año}^{-1}$)
- i = incremento en tiempo de 1 año
- n = año del cálculo menos el año inicial menos el año de disposición de residuos
- j = incremento de tiempo en 0.1 años
- M_i = masa de residuos dispuesta en el año i (Mg)
- t_{ij} = edad de la sección j de la masa M_i dispuestas en el año i (años decimales)
- MCF = factor de corrección de metano que depende de la profundidad y el tipo de relleno sanitario
- F = factor de ajuste por incendios
- k = índice de generación de metano que depende de la humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura del relleno sanitario (1 año^{-1})
- L_0 = generación potencial de metano ($m^3 \text{ Mg}^{-1}$)
- Mg = megagramos

Los datos de los RSU son del año 2008 (www.inegi.gob.mx), por lo que para comenzar en el 2016 se aumentó 2% anual, como se sugiere en el Modelo Mexicano de Biogás v.2.0. Así también, se obtuvo la producción per-cápita ($0.9465 \text{ kg hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$) que se afectó posteriormente por el número de habitantes de las regiones (tabla 6).

Tabla 2. Cabezas de ganado por tamaño y región. Datos adaptados del INEGI

Región	Ganado (Núm. de cabezas)									
	Bovino				Porcino			Avícola		
	Ternero	Pequeño	Mediano	Grande	Pequeño	Mediano	Grande	Pequeño	Mediano	Grande
Norte	24,284	15,731	15,507	27,749	712	1,569	1,299	275	1,342	2,637
Altos Norte	68,555	62,076	53,737	79,966	47,895	29,690	29,602	371	243,713	11,050,360
Altos Sur	84,137	67,464	83,425	109,972	70,710	157,925	121,867	2,267	347,909	10,933,570
Ciénega	33,636	29,919	26,864	36,279	36,279	1,834	46,863	127,759	488,889	4,831,872
Sureste	24,327	15,980	15,760	28,871	2,494	3,619	3,142	629	5,067	78,719
Sur	48,455	32,417	30,687	52,304	10,709	23,685	9,779	1,713	29,837	15,380
Sierra de Amula	40,722	29,931	27,023	47,495	8,074	12,754	7,050	375	3,080	15,695
Costa Sur	56,988	39,080	35,792	67,464	1,865	2,747	2,453	421	2,567	8,152
Costa - Sierra Occidental	36,218	26,192	22,186	44,904	2,567	4,428	3,545	3,597	12,223	8,401
Valles	38,672	25,763	20,391	32,729	3,961	7,909	2,737	623	375,239	53,954
Lagunas	26,431	18,487	15,416	25,811	5,348	7,955	4,798	9,017,305	1,108,396	623,584
Centro	39,027	33,358	31,364	40,818	31,624	56,591	17,358	946,111	2,533,721	6,095,502

Tabla 3. Factor de producción de biogás por tamaño y tipo de ganado (Martínez, 2007)

Especie	Tamaño	Cantidad de excreta (Kg día ⁻¹)	Producción de Biogás (m ³ animal ⁻¹ día ⁻¹)
Bovino	Ternero	4.00	0.16
	Pequeño	8.00	0.32
	Mediano	10.00	0.40
	Grande	15.00	0.60
Porcino	Pequeño	1.00	0.07
	Mediano	1.50	0.10
	Grande	2.00	0.14
Avícola	Pequeño	0.05	0.003
	Mediano	0.10	0.006
	Grande	0.15	0.009

Tabla 4. Producción de biogás por región

Región	Biogás (m ³ día ⁻¹)									
	Bovino				Porcino			Avícola		
	Ternero	Pequeño	Mediano	Grande	Pequeño	Mediano	Grande	Pequeño	Mediano	Grande
Norte	3,885	5,034	6,203	16,649	50	157	182	1	8	24
Altos Norte	10,969	19,864	21,495	47,980	3,353	2,969	4,144	1	1,462	99,453
Altos Sur	13,462	21,588	33,370	65,983	4,950	15,793	17,061	7	2,087	98,402
Ciénega	5,382	9,574	10,746	21,767	2,540	183	6,561	383	2,933	43,487
Sureste	3,892	5,114	6,304	17,323	175	362	440	2	30	708
Sur	7,753	10,373	12,275	31,382	750	2,369	1,369	5	179	138
Sierra de Amula	6,516	9,578	10,809	28,497	565	1,275	987	1	18	141
Costa Sur	9,118	12,506	14,317	40,478	131	275	343	1	15	73
Costa - Sierra Occidental	5,795	8,381	8,874	26,942	180	443	496	11	73	76
Valles	6,188	8,244	8,156	19,637	277	791	383	2	2,251	486
Lagunas	4,229	5,916	6,166	15,487	374	796	672	27,052	6,650	5,612
Centro	6,244	10,675	12,546	24,491	2,214	5,659	2,430	2,838	15,202	54,860

Tabla 5. Consideraciones para el Modelo Mexicano de Biogás v.2.0 (LMOP, 2009)

Características del Relleno Sanitario	Parámetros			
	Óptimo	Intermedio óptimo	Intermedio pesimista	Pesimista
¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?			No	
Año de apertura del sitio			2016	
Año de disposición (arriba)			2016	
Año de clausura o año de clausura proyectado			2026	
Incremento anual estimado de la disposición			2.0%	
Profundidad promedio del relleno sanitario (m)			12	
Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario		2		1
¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?		No		Si
Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total		0%		5%
Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio		1		2
Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado)			2017	
Porcentaje del área con residuos con sistema de captura			85%	
Porcentaje del área con residuos con cubierta final		20%		25%
Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia		40%		25%
Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria		40%		25%
Porcentaje del área con residuos sin cobertura		0%		25%
Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana	100%	100%	100%	100%
¿Se compactan los residuos regularmente?		Si		No
¿La disposición de residuos se hace en un área específica?		Si		No
Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No		Si	
Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	No	Si		No
Eficiencia de captura estimada	68%	61%	48%	40%

Tabla 6. Población y RSU generados por región

Región	Habitantes	RSU (Toneladas año ⁻¹)
Norte	78,445	27,100
Altos Norte	407,417	140,747
Altos Sur	399,724	138,090
Ciénega	402,199	138,945
Sureste	163,477	56,475
Sur	300,871	103,940
Sierra de Amula	158,256	54,671
Costa Sur	152,113	52,549
Costa - Sierra Occidental	332,798	114,969
Valles	316,993	109,509
Lagunas	226,978	78,412
Centro	4,905,289	1,694,593
Total	7,844,560	2,710,000

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para realizar la evaluación económica, primero se estimó el calor desprendido por el biogás, considerando una presencia de 50% de CH₄ en volumen y una densidad promedio para el mismo CH₄ de 0.7168 kg m⁻³, donde el flujo volumétrico (m³ s⁻¹) se afectó por un poder calorífico medio (18,852 kJ m⁻³). Para la generación de energía eléctrica se seleccionó un *Motor de Combustión Interna* (MCI) de características comerciales, tanto para los Biodigestores como para los Rellenos Sanitarios (tabla 7). El número de equipos requeridos se calculó dividiendo el calor desprendido por el biogás entre la potencia unitaria de cada motor, de tal manera que, para el caso de los equipos instalados en los Rellenos Sanitarios, el número se incrementará de acuerdo con la producción de biogás. La generación de este último va en aumento cada año, hasta llegar a un máximo para posteriormente, decrecer. A su vez, se estimó el costo de inversión para los MCI, que para el caso de los Biodigestores es solo un costo inicial. El costo de inversión se obtiene de multiplicar la potencia total (sumando todos los equipos) por el costo unitario de cada kilowatt instalado (kWinst). Se incluyó, de igual forma, el costo de operación y mantenimiento anual de los MCI, con un valor medio de \$0.191 MN kWh⁻¹ generado (González, 2004).

Para el cálculo del costo de inversión estimado para los biodigestores, se empleó la siguiente expresión (Chan *et al.*, 2016)

$$C = 0.0008 * PB + 1.0817 \tag{2}$$

donde

C = costo de inversión de un biodigestor de HDPE (geomembrana), en millones de dólares
 PB = producción de Biogás en m³ por hora

Con un costo de operación y mantenimiento de \$0.230 pesos (MN) anual por total de la inversión del Biodigestor; y un mantenimiento mayor de \$0.412 pesos (MN) anual por total de la inversión del Biodigestor, el cual se aplicará cada cuatro años de servicio (Vera, 2011).

Para el caso de los Rellenos Sanitarios, se consideró un costo global que incluye: costo de inversión, operación y mantenimiento y clausura, de \$8.89 USD por cada tonelada tratada (Chong *et al.*, 2005). Afectando este costo unitario por el número de toneladas de RSU tratadas por año, durante los primeros 11 años.

Para el análisis del *Valor Presente Neto* (VPN), se emplearon las siguientes expresiones

$$FD_{año\ i} = \frac{1}{(1+TD)^i * (1+INF)^i} \tag{3}$$

$$VPN = \sum_{i=0}^n \frac{FNE}{(1+TD)^i + (1+INF)^i} \tag{4}$$

donde

TD = Tasa de Descuento (promedio del 2012 al 2015) en (% 100⁻¹)

INF = Inflación (promedio anual del 2010 al 2015) en (% 100⁻¹)

FNE = Flujo Neto de Efectivo (MN año⁻¹)

FD = Factor de Descuento

Empleando una tasa de descuento de 3.49% y una inflación de 3.67% (www.banxico.org.mx). Se consideró un costo de tarifa eléctrica a reemplazar 5-A de CFE como ahorro. Dicha tarifa se tomó como el promedio de media y baja tensión para el 2015 (\$2.615 MN kWh⁻¹), proyectándose en lo sucesivo para cada año y considerando un incremento de 6% anual (Vera-Romero *et al.*, 2015). El proyecto se evaluó con un inicio y termino comprendido del 2016 al 2036, el primer año solo se consideró la construcción del sitio y los equipos a emplearse al año inmediato.

Tabla 7. Características de los motores seleccionados

Motogenerador (MCI)	Características comerciales		
	Tipo 1 Solo para Biodigestores	Tipo 2 Rellenos Sanitarios	Tipo 3 Relleno Sanitario Únicamente Región Centro
Potencia (kW)	850	25	1794
Eficiencia	0.402	0.348	0.433
Energía Suministrada (kW)	2117	72	4142
Costo (USD kWinst ⁻¹)	1000	1500	1000

Para asignar el beneficio de los BC en la evaluación económica, se tomó el costo del valor medio de los RCE's para el año 2015, con un valor de 0.39 Euros (www.senedeco2.com). Con una paridad del peso mexicano (MN) frente al dólar (USD) y al euro (€) de \$17.5669 MN y \$19.867 MN, respectivamente (www.banxico.org.mx). El beneficio de los BC total, se distribuyó por cada año de la vida útil del proyecto.

RESULTADOS

BIODIGESTORES

Todos los proyectos, sin apoyo de los BC, se pagan dentro de los tres primeros años de su puesta en marcha (TRI). Se observa que el beneficio por BC (tabla 8), aunque se trate de una cantidad considerable en comparación con la inversión inicial (entre 16% y 19%), no es significativo en relación con el VPN acumulado a lo largo de la vida útil del proyecto (tabla 9); esto se refle-

ja en que los proyectos se siguen pagando dentro del tercer año.

Para este caso, la potencia instalada total sería de 96.9 MW, representando 0.18% de la capacidad total instalada para la generación de energía a nivel nacional. Significando 0.23% para CFE y 0.75% para los PIE's. En cuanto a la generación de energía, se obtendría una producción máxima anual de 848.84 GWh, representando 0.34% del total nacional, 0.51% respecto a CFE y 0.99% para los PIE's. Para el consumo total de Jalisco (12.000 GWh año⁻¹ aprox.), la energía producida representaría 7.10% aproximadamente. Se mitigarían 0.388 t de CO₂e por habitante, representando 9.96% de la producción de t de CO₂ per-cápita nacional (3.9 t año⁻¹). Con un consumo anual de energía eléctrica por habitante de 108.21 kWh, que representa 5.26% del consumo per-cápita nacional (2.057 kWh año⁻¹) y un 7.10% para el consumo per-cápita estatal (1.524 kWh año⁻¹), aproximadamente (www.bancomundial.org).

Tabla 8. Beneficios totales por BC para el Biodigestor

Región	Total de toneladas de CO ₂ e	Monto económico por RCE-BC (Pesos MN Proyecto ⁻¹)
Norte	1,768,758	13,704,570
Altos Norte	11,630,829	90,117,174
Altos Sur	14,983,076	116,090,818
Ciénega	5,689,651	44,084,156
Sureste	1,887,263	14,622,756
Sur	3,658,812	28,348,952
Sierra de Amula	3,208,000	24,856,001
Costa Sur	4,244,742	32,888,811
Costa - Sierra	2,817,004	21,826,512
Occidental		
Valles	2,550,206	19,759,326
Lagunas	4,008,287	31,056,730
Centro	7,535,853	58,388,770
Total	63,982,480	495,744,575

Nota: CO₂e, es el Dióxido de Carbono equivalente

Tabla 9. Concentrado de características técnicas y evaluación económica para Biodigestores (en millones de pesos)

Región	Biogás producido m ³ s ⁻¹	Núm. de MCI	Capacidad instalada (kW)	Máxima energía anual producida (GWh)	Costo del biodigestor (MN)	Costo de MCI instalado (MN)	Inversión total (MN)	VPN acumulado a 21 años (MN) sin BC	TRI sin BC	VPN acumulado a 21 años (MN)BC	TRI con BC
Norte	0.3726	3	2,550	22.338	37.85	44.80	82.65	862.84	3	869.94	3
Altos Norte	2.4501	21	17,850	156.366	142.96	313.57	456.53	6,498.37	3	6,545.06	3
Altos Sur	3.1563	28	23,800	208.488	178.69	418.09	596.78	8,709.30	3	8,769.46	3
Ciénega	1.1986	10	8,500	74.460	79.64	149.32	228.96	3,051.00	3	3,073.85	3
Sureste	0.3976	3	2,550	22.338	39.12	44.80	83.91	858.09	3	865.67	3
Sur	0.7708	6	5,100	44.676	58.00	89.59	147.59	1,792.23	3	1,806.92	3
Sierra de Amula	0.6758	6	5,100	44.676	53.19	89.59	142.78	1,810.28	3	1,823.16	3
Costa Sur	0.8942	7	5,950	52.122	64.24	104.52	168.76	2,103.79	3	2,120.83	3
Costa - Sierra	0.5934	5	4,250	37.230	49.02	74.66	123.68	1,490.91	3	1,502.22	3
Occidental											
Valles	0.5372	4	3,400	29.784	46.18	59.73	105.91	1,166.57	3	1,176.81	3
Lagunas	0.8444	7	5,950	52.122	61.72	104.52	166.24	2,113.26	3	2,129.35	3
Centro	1.5875	14	11,900	104.244	99.32	209.05	308.36	4,317.17	3	4,347.43	3
Total	13.4784	114	96,900	848.844	909.93	1,702	2,612	34,774	---	35,031	---

RELLENOS SANITARIOS

En el caso de la evaluación de los Rellenos Sanitarios se observa que el más rentable, por tener una mayor producción de biogás, es el escenario óptimo (tablas 10 y 11). Sin embargo, esto no quiere decir que sea una alternativa económicamente atractiva, ya que el análisis del TRI muestra tiempos que rondan entre los diez y doce años, incluso cuando se consideran los BC (tabla 11). A su vez, para que los proyectos en general fueran técnica y económicamente más factibles, se propusieron Rellenos Sanitarios que concentraran más de una región y así obtener costos de inversión más bajos para reducir los TRI.

Para el análisis de los resultados, solo se consideró el escenario óptimo por ser el más rentable. Por presentar características de un comportamiento no lineal en la producción de biogás (figura 6), se tomaron solo pro-

medios de los resultados (totales entre 20 años) para poder comparar los beneficios (tabla 11). El resto de los resultados se pueden observar en el Anexo.

Con una capacidad instalada promedio, sumatoria de la capacidad total instalada por región entre 20 años, de 2.13MW, representando 0.004% del total nacional, un 0.005% y un 0.017% respecto a CFE y PIE's, respectivamente. Con una generación de energía promedio de 218.7 GWh año⁻¹, representando 0.09% del total nacional, 0.13% para CFE y 0.26% para los PIE's. Su porcentaje estatal de producción de energía eléctrica correspondería a 1.63% aproximadamente. Con un consumo per-cápita de 27.9 kWh año⁻¹, representando 1.36% nacional y para el Estado de Jalisco 1.83%. Se dejarían de arrojar anualmente 0.099 t de CO₂e por habitante, lo que significaría una reducción del 2.53% de CO₂ per-cápita.

Tabla 10. Beneficios totales por BC para los Rellenos Sanitarios

Región	Escenarios							
	Óptimo		Intermedio Óptimo		Intermedio Pesimista		Pesimista	
	Total de toneladas de CO ₂ e	Monto económico(MN) por RCE (BC)	Total de toneladas de CO ₂ e	Monto económico (MN) por RCE (BC)	Total de toneladas de CO ₂ e	Monto económico (MN) por RCE (BC)	Total de toneladas de CO ₂ e	Monto económico (MN) por RCE (BC)
Norte	162,538	1,259,364	145,806	1,129,724	114,733	888,963	92,423	716,109
Altos Norte	843,871	6,538,421	757,002	5,865,348	595,674	4,615,356	479,848	3,717,926
Altos Sur	827,809	6,413,973	742,593	5,753,711	584,336	4,527,510	470,715	3,647,161
Ciénega	710,691	5,506,525	637,532	4,939,677	588,220	4,557,602	520,825	4,035,419
Sureste	338,933	2,626,100	304,043	2,355,766	239,247	1,853,717	192,727	1,493,272
Sur	623,016	4,827,211	558,882	4,330,293	439,776	3,407,443	354,264	2,744,885
Sierra de Amula	328,014	2,541,496	294,248	2,279,872	231,539	1,793,997	186,518	1,445,165
Costa Sur	315,267	2,442,729	282,813	2,191,271	222,541	1,724,279	179,269	1,389,003
Costa - Sierra	689,239	5,340,313	618,288	4,790,575	486,522	3,769,633	391,920	3,036,649
Occidental								
Valles	656,614	5,087,533	589,022	4,563,817	463,492	3,591,200	373,369	2,892,911
Lagunas	585,974	4,540,200	525,653	4,072,827	413,628	3,204,847	267,452	2,072,254
Centro	10,160,001	78,721,011	9,114,119	70,617,377	7,171,766	55,567,772	5,777,256	44,762,928
Total	16,241,968	125,844,877	14,570,000	112,890,257	11,551,474	89,502,321	9,286,587	71,953,680

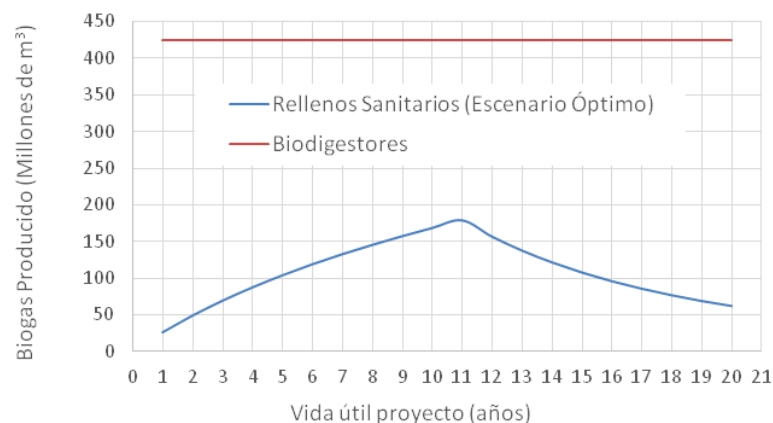


Figura 6. Producción de biogás total para las 12 regiones

Tabla 11. Resultados concentrados para el escenario óptimo (Montos económicos en millones de pesos)

Concepto	Norte	Altos Norte	Altos Sur	Ciénega	Sureste	Sur	Sierra de Amula	Costa Sur	Costa - Sierra Occidental	Valles	Lagunas	Centro	Total
Biogás total producido a 21 años (Millones de m ³)	21.60	112.12	109.99	94.43	45.03	82.78	43.58	41.89	91.58	87.24	77.86	1,349.92	2,158
Núm. de MCI totales	14	77	76	65	31	57	30	29	63	60	53	16	571
Capacidad total Instalada (kW)	350	1,925	1,900	1,625	775	1,425	750	725	1,575	1,500	1,325	28,704	42,579
Energía total producida a 21 años (GWh)	37.89	202.14	197.98	170.16	80.37	148.92	77.53	74.46	164.91	156.80	139.07	2,923.07	4,373
VPN acumulado a 21 años (MN)	38.80	212.50	207.58	178.70	83.50	156.13	80.20	76.90	173.05	164.23	175.28	3,794.33	5,341
Sin BC													
TRI sin BC (años)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	10	---
VPN acumulado a 21 años (MN)	39.43	215.75	210.77	181.44	84.80	158.53	81.47	78.11	175.71	166.76	177.54	3,833.54	5,404
Con BC													
TRI con BC (años)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	---

Tabla 12. Comparativa general de todas las regiones a 21 años de vida útil del proyecto

Concepto	Propuestas tecnológicas	
	Biodigestores	Rellenos Sanitarios (escenario óptimo)
Toneladas de CO ₂ e	63,982,480	16,241,968
Monto económico de CO ₂ e (MN)	492,744,575	125,844,877
Biogás producido (Millones de m ³)	8,501	2,158
Máxima energía producida (GWh)	16,977	4,373
Inversión inicial (millones de pesos)	2,612	1,217
VPN acumulado sin BC (millones de pesos)	34,774	5,341
VPN acumulado con BC (millones de pesos)	35,031	5,404
Mínimo TRI (años)	3	10
Máximo TRI (años)	3	12

DISCUSIÓN GENERAL

Los beneficios para los Biodigestores son 4 veces más sobre los beneficios que presentan los Rellenos Sanitarios. Sin embargo, en cuestión de costo capital o inversión inicial, los Rellenos Sanitarios representan 47% aproximadamente del costo de inversión de los Biodigestores. Este último valor, hace que los *Tiempos de Recuperación de la Inversión* (TRI) sean considerablemente distintos para ambas propuestas tecnológicas, donde es más atractiva la construcción de biodigestores que la realización de los propios rellenos sanitarios (tabla 12). Sin embargo, el hecho de que los RSU deban tratarse o confinarse por cuestiones de salud, bienestar ambiental y responsabilidad social, hace que la propuesta de generación de energía eléctrica a través de la captura del biogás sea más rentable, ya que los Rellenos Sanitarios deben construirse por necesidad, por tanto, el beneficio secundario de la producción de energía eléctrica es un beneficio originalmente no contemplado.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluaron dos tipos de fuentes de generación de biogás para la producción de energía eléctrica, contemplando las doce regiones que comprenden el estado de Jalisco. La primera, a través de la construcción de un Biodigestor por cada región, con la finalidad de tratar excretas de tres diferentes tipos de ganado; en donde todos ellos presentaron beneficios económicos atractivos para su realización, obteniendo un TRI no mayor a tres años. La segunda, a través de la implementación de Rellenos Sanitarios, donde el escenario más rentable (óptimo) mostró un TRI entre los diez y doce años, incluso considerando el beneficio económico de los BC. La diferencia entre los TRI de ambas propuestas tecnológicas es considerable, donde es más atractiva la propuesta de la construcción de biodigestores. Se observa que los beneficios por BC no impactan de manera significativa en la reducción de los TRI, debido a su bajo costo en el mercado actual.

ANEXO

Tabla 13. Resultados concentrados para el resto de escenarios analizados (Montos económicos en Millones de pesos)

Concepto	Norte	Altos Norte	Altos Sur	Ciénega	Sureste	Sur	Sierra de Amula	Costa Sur	Costa - Sierra Occidental	Valles	Lagunas	Centro	Total
Intermedio Óptimo													
Biogás total producido (Millones de m ³)	19.37	100.58	98.67	84.71	40.40	74.26	39.10	37.58	82.15	78.26	69.84	1,210.95	1,936
Núm. de MCI totales	13	69	68	58	27	51	27	26	56	54	48	14	511
Capacidad total Instalada (kW)	325	1,725	1,700	1,450	675	1,275	675	650	1,400	1,350	1,200	25,116	37,541
Energía total producida (GWh)	32.85	181.11	177.61	152.42	70.96	133.15	68.99	66.80	147.39	140.38	125.27	2,561.62	3,859
VPN acumulado (MN). Sin BC	27.65	167.20	163.76	140.58	63.35	122.16	61.71	60.41	135.44	128.76	145.52	2,991.67	4,208
TRI sin BC (años)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	11	11	---
VPN acumulado (MN). Con BC	28.21	170.12	166.63	143.04	64.52	124.32	62.85	61.50	137.83	131.03	147.55	3,026.84	4,264
TRI con BC (años)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	11	11	---
Intermedio Pesimista													
Biogás total producido (Millones de m ³)	15.24	79.14	77.64	78.15	31.79	58.43	30.76	29.57	64.64	61.58	54.96	952.88	1,535
Núm. de MCI totales	10	54	53	54	22	40	21	20	44	42	38	11	409
Capacidad total Instalada (kW)	250	1,350	1,325	1,350	550	1,000	525	500	1,100	1,050	950	19,734	29,684
Energía total producida (GWh)	26.06	142.13	139.07	139.72	55.63	104.46	54.31	51.25	115.63	109.72	98.11	1,995.86	3,032
VPN acumulado (MN). Sin BC	13.18	83.22	80.86	112.97	30.05	60.35	30.23	26.95	67.01	62.82	86.89	1,739.36	2,394
TRI sin BC (años)	15	15	15	13	15	15	15	15	15	15	13	13	---
VPN acumulado (MN). Con BC	13.63	85.52	83.12	115.24	30.98	62.05	31.12	27.81	67.01	64.61	88.49	1,767.03	2,437
TRI con BC (años)	15	15	15	13	15	15	15	15	15	15	13	13	---
Pesimista													
Biogás total producido (Millones de m ³)	12.28	63.76	62.54	69.20	25.61	47.07	24.78	23.82	52.07	49.61	35.54	767.60	1,234
Núm. de MCI totales	8	44	43	47	17	32	17	16	36	34	24	9	327
Capacidad total Instalada (kW)	200	1,100	1,075	1,175	425	800	425	400	900	850	600	16,146	24,096
Energía total producida (GWh)	20.37	113.88	112.13	123.30	44.24	83.22	43.14	41.17	92.20	88.04	62.63	1,602.97	2,427
VPN acumulado (MN). Sin BC	0.87	22.22	22.76	77.83	5.71	14.58	6.11	5.33	16.25	16.04	10.64	865.68	1,064
TRI sin BC (años)	21	19	19	15	19	19	19	19	19	19	19	15	---
VPN acumulado (MN). Con BC	1.23	25.05	25.55	79.84	6.45	15.95	6.83	6.02	17.76	17.48	11.67	887.97	1,102
TRI con BC (años)	20	18	18	14	19	19	19	19	19	19	19	15	---

Sin embargo, por la parte energética, ambas propuestas son atractivas, ya que se puede apreciar un aporte importante en cuanto a la generación de energía eléctrica, representando una seria alternativa proveniente de una fuente renovable, la cual puede contribuir a ayudar a la creciente demanda eléctrica de este estado y del país, ofreciendo a su vez autonomía energética.

Para este estudio preliminar no se contemplaron los costos de pre-tratamiento y selección de residuos, así como el tratamiento de los lixiviados ni la limpieza del biogás antes de someterse a la combustión.

REFERENCIAS

- Aguilar-Virgen Q., Armijo-De Vega C., Taboada-González P. Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería Revista Académica*, volumen 15, 2011: 37-45.
- BP. Statistical Review of World Energy [en línea], 2015 [fecha de consulta: 18 de mayo 2015]. Disponible en: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.
- CFE. Informe Anual 2014 [en línea], 2015 [fecha de consulta: 17 de mayo 2016]. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/inversio-nistas/Style%20Library/assets/pdf/InformeAnual.pdf>.
- Chan G.E., Xia A., Murphy J. Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico? *Renewable Energy*, volumen 95, 2016: 22-30.
- Chong T.L., Matsufuji Y., Hassan M.N. Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in Developing Countries: A malasia cost analysis. *Waste Management*, volumen 25, 2005: 702-711.
- Committee on the Toxicological Effects of Methylmercury, Board on Environmental Studies and Toxicology, National Research Council. *Toxicological Effects of Methylmercury*, Washington, DC, National Academy Press, 2000, pp. 37-41.
- Gobierno del Estado de Chihuahua. Foro: Soluciones para el desarrollo de energía renovable y eficiencia energética en regiones fronterizas, Chihuahua, México, Gobierno del Estado de Chihuahua, 2011 [en línea] [fecha de consulta: 17 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1431/en015.pdf?sequence=1>.
- González-Longatt F.M. Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia, 1er. Seminario de Ingeniería Eléctrica, UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela, 2004, p. 11.
- Hower J.C., Senior C.L., Suuberg E.M., Hurt R. H., Wilcox J.L., Olson E.S. Mercury capture by native fly ash carbons in coal-fired power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, volumen 36, 2010: 510-529.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas y CFE. Guía de usuario Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos, primera edición, México, IIE y CFE, 2012 [en línea] [fecha de consulta: 17 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.iie.org.mx/docu/Guia-RSU.pdf>.
- Johari A., Ahmed S.I., Hashim H., Alkali H., Ramli M. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 16, 2012: 2907-2912.
- LMOP, 2009. Modelo mexicano de biogás v.2.0. [Programa ordenador], Washington, DC, [Usado: 03 de mayo 2016]. Disponible en: <http://www.epa.gov/lmop/international/mexicano.html>.
- Martínez C.C. Volumen de biodigestores. *Energía y tú* [en línea], (número 39), julio-septiembre, 2007 [fecha de consulta: 17 de 05 de 2016]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia39/HTML/articulo04.htm>.
- Rawat M. y Ramanathan A.L. Assessment of methane flux from municipal solid waste (MSW) landfill areas of Delhi, India. *Journal of Environmental Protection*, volumen 2, 2011: 399-407.
- SENER. Balance Nacional de Energía 2014 [en línea], 2015 [fecha de consulta: 17 de mayo 2016]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf.
- SENER e IRENA. Renewable energy prospects: Mexico, REmap 2030 analysis [en línea]. Abu Dhabi, IRENA, 2015 [fecha de consulta: 17 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf
- Senior C.L., Sarofim A.F., Zeng T., Helble J.J., Mamani-Paco R. Gas-phase transformations of mercury in coal-fired power plants. *Fuel Processing Technology*, volumen 63, 2000a: 197-213.
- Senior C.L., Helble J.J., Sarofim A.F. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion sources. *Fuel Processing Technology*, volumen 65-66, 2000b: 263-288.
- USEPA. *Global anthropogenic Non-CO2 greenhouse gas emissions: 1990-2020*, Washington DC., USEPA, 2006, pp. 155-178.
- USEPA. Mercury study report to Congress. Volume III: Fate and Transport of Mercury in the Environment, Research Triangle Park NC, EPA, 1997a, EPA-452/R-97-005.
- USEPA. Mercury study report to Congress. Volume V: Health effects of mercury and mercury compounds, Research Triangle Park NC, EPA, 1997b, EPA-452/R-97-007.
- Vera R.I. *Desarrollo metodológico para el análisis de la viabilidad de un proyecto de microgeneración*, tesis (maestría en ingeniería), México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011, 166 pp.
- Vera-Romero I., Martínez-Reyes J., Estrada-Jaramillo M., Ortiz-Soriano A. Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen 15 (número 3), julio-septiembre 2014: 429-436.
- Vera-Romero I., Estrada-Jaramillo M., Martínez-Reyes J., Ortiz-Soriano A. Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: Residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen 16 (número 3), julio-septiembre 2015: 471-478.

Citación sugerida:

Citación estilo Chicago

Vera-Romero, Iván, Melitón Estrada-Jaramillo, Conrado González-Vera, Martín Tejeda-Jiménez, Xicotencatl López-Andrade, Agustina Ortiz-Soriano. Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII, 03 (2017): 307-320.

Citación estilo ISO 690

Vera-Romero I., Estrada-Jaramillo M., González-Vera C., Tejeda-Jiménez M., López-Andrade X., Ortiz-Soriano A. Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 3), julio-septiembre 2017: 307-320.

SEMBLANZAS DE LOS AUTORES

Iván Vera-Romero. Realizó los estudios de licenciatura en el Instituto Tecnológico de Orizaba (ITO), donde obtuvo el grado de ingeniero mecánico en 2001. Asimismo el grado de maestro en energía, sistemas energéticos: procesos y uso eficiente de la energía por la Universidad Nacional Autónoma de México en 2011. Actualmente labora como profesor-investigador T.C. de la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo.

Melitón Estrada-Jaramillo. Realizó los estudios de licenciatura en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en donde obtuvo el grado de ingeniero mecánico en 2002. Asimismo, el grado de maestro en ciencias en ingeniería mecánica en el área de termofluidos: sistemas de postcombustión para la disminución de contaminantes, por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en 2004. Actualmente labora como profesor-investigador en la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo.

Conrado González-Vera. Realizó los estudios de licenciatura en la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en donde obtuvo el grado de oceanólogo en 1992. Asimismo obtuvo el grado de maestro en ciencias (acuicultura) por la University of Stirling UK en 1995 y el grado de doctor en filosofía con el estudio de la fisiología de crustáceos en la misma universidad en el año 2000. En el 2006 obtuvo el grado de maestro en administración de empresas por la University of Durham UK. Actualmente labora como profesor-investigador titular C (T.C.) en el CIIDIR-IPN, Unidad Michoacán.

Martín Tejeda-Jiménez. Realizó sus estudios de licenciatura en la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo (UCEM) del 2012-2016.

Xicotencatl López-Andrade. Realizó la licenciatura en ingeniería química, la maestría en ingeniería ambiental y el doctorado en ingeniería de procesos en la UNAM. Posteriormente, obtuvo un posdoctorado en Barcelona España, en un laboratorio de nanotecnología aplicada a las Ciencias Ambientales. Durante 3 años trabajó en el Programa de Ingeniería Química y Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM. Es profesor investigador en varias instituciones públicas (UNAM, UCEM, UPVM, UAQ).

Agustina Ortiz-Soriano. Realizó los estudios de licenciatura en filosofía en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Obtuvo el grado de maestra en ciencias de la educación por el Instituto Superior de Ciencias de la Educación del Estado de México en 2009 y el grado de maestra en humanidades (filosofía política) en la UAM en 2010. Actualmente labora como profesor-investigador de tiempo completo en la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo.