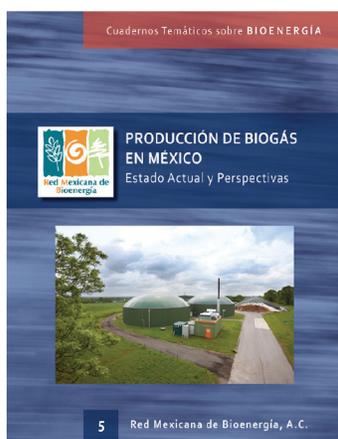




PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN MÉXICO

Estado Actual y Perspectivas





Título del cuaderno:
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN MÉXICO
Estado actual y perspectivas

Cuaderno Temático No. 5, 2012

Edición: Diciembre 2012

© Edición original publicada por
RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, A.C.

www.rembio.org.mx
redmexbioen@gmail.com



Fotografía de portada: Planta de Biogás
Götzberg (Alemania) de BioConstruct GmbH

MESA DIRECTIVA REMBIO 2012

Dr. Iram Mondaca Fernández
PRESIDENTE

Dra. Georgina Sandoval Fabián
SECRETARIA GENERAL

Ing. Julián Vega Gregg
TESORERO

Coordinación general de la obra: Iram Mondaca Fernández

Coordinación editorial: Omar Masera Cerutti

Diseño editorial: Imagia Comunicación

Revisión técnica: Julián Vega Gregg
Iram Mondaca Fernández
Georgina Sandoval Fabián
Óscar Aguilar Juárez

Corrección de estilo: Imagia Comunicación

Autores:

Bernd Weber

Marcelo Rojas Oropeza

Miguel Torres Bernal

Liliana Pampillón González

Esta publicación fue co-financiada por FIRCO, la Fundación Guanajuato Produce A.C. y REMBIO. Agradecemos el apoyo del Banco Mundial y el Global Environment Facility.



Las ideas, opiniones y conclusiones contenidas en el presente documento, son de exclusiva responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Red Mexicana de Bioenergía, A.C.

Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta, del contenido de este cuaderno, ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin contar con el permiso previo, expreso y por escrito de los editores, en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor.

ISBN: 978-607-96084-1-5

Este cuaderno se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2012 por Imagia Comunicación, con un tiraje de 500 ejemplares.

Impreso en México. Printed in Mexico.

PRESENTACIÓN

Estimados Lectores:

Tengo el gusto de poner a su consideración el Cuaderno Temático (CT) *Producción de biogás en México*, redactado por el Dr. Bernd Weber, experto en el tema y con la colaboración del Dr. Marcelo Rojas Oropeza, la M.C. Liliana Pampillón González y del Maestro Miguel Torres Bernal.

El biogás es una fuente de energía renovable, que al ser aprovechada reduce las emisiones de gases de invernadero a la atmósfera apoyando las estrategias nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático.

Las tecnologías para la producción de biogás están bien establecidas y son muy flexibles, pudiendo ser utilizadas por pequeños productores agropecuarios o bien en sistemas altamente tecnificados para la producción de energía eléctrica, calor e incluso productos como hidrógeno (H_2). Esto permite reducir la deforestación en áreas rurales y la dependencia de los productores de la energía eléctrica producida a partir de combustibles fósiles. La producción de biogás presenta muchas ventajas con base en su alta relación beneficio/costo y sustentabilidad ambiental, lo que permite justificar los esquemas de apoyo para su implementación mediante estímulos fiscales, fondos gubernamentales y la venta de bonos verdes. Estas características permiten visualizar el área de producción de biogás como de gran potencial para nuestro país.

En este cuaderno la REMBIO busca brindar una referencia sucinta y actualizada sobre las tecnologías para la producción de biogás, la distribución en México de las materias primas necesarias para su generación, así como las políticas públicas de estímulos para el aprovechamiento de esta fuente de energía, sus perspectivas de desarrollo en México y los retos y oportunidades que presenta en términos de sustentabilidad.

El presente volumen forma parte de la colección Cuadernos Temáticos, mediante la cual la Red Mexicana de Bioenergía inicia su Proyecto Editorial. El proyecto persigue brindar materiales de calidad sobre los distintos aspectos de la problemática bioenergética, tanto a nivel internacional como de nuestro país. Con este esfuerzo, procuramos también difundir las actividades de la REMBIO y ofrecer herramientas útiles a los socios y al público en general. La colección Cuadernos Temáticos incluirá diversos volúmenes que tratarán aspectos centrales de la bioenergía en México, en términos tecnológicos, económicos, ambientales o de política pública y legislación.

Espero que este volumen y otros títulos de la colección sean de su interés.

Iram Mondaca Fernández
Presidente
Red Mexicana de Bioenergía, A. C.



ÍNDICE

PRESENTACIÓN	1
ÍNDICE	2
RESUMEN EJECUTIVO	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. SUSTRATOS	5
2.1 Clasificación de los sustratos	5
2.2 Nutrientes necesarios para la digestión anaerobia	5
2.3 Rendimiento de biogás a partir de los diversos sustratos	6
3. FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DE LA METANOGÉNESIS	8
3.1 Hidrólisis	8
3.2 Acidogénesis y acetogénesis	9
3.3 Metanogénesis	9
3.4 Condiciones ambientales	10
3.5 Inhibición	11
4. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	13
4.1 Digestión en el rumen de res	13
4.2 Digestión de biomasa	13
4.2.1 Digestores de operación en lote (discontinuos o régimen estacionario)	13
4.2.2 Digestores sencillos con implementación en zonas rurales	13
4.2.3 Digestores con tecnología de punta	14
4.3 Digestión de residuos sólidos	15
4.4 El relleno sanitario como reactor de digestión anaerobia	16
4.5 Digestión de aguas residuales	17
4.6 Operación de digestores	18
4.7 Mantenimiento y seguridad	18
4.8 Eficiencia de los distintos procesos en operación	19
5. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	22
5.1 Poder calorífico y calidad del biogás como combustible	22
5.2 Uso en sitio	23
5.2.1 Generación de calor	23
5.2.2 Generación de electricidad	23
5.2.3 Depuración del biogás	24
5.3 Depuración del biogás al grado equivalente al gas natural	24
5.4 Hidrógeno	25
6. USO DE LOS RESIDUOS DE LA DIGESTIÓN	27
7. DISTRIBUCIÓN EN EL PAÍS DE LAS FUENTES POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	29
7.1 Sector Ganadero	29
7.2 Granjas Porcícolas	30
7.3 Sector ganadero bovino productor de leche	31
7.4 Rellenos Sanitarios	32
7.5 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	33
7.6 Observaciones Finales	34
8. USOS ACTUALES Y POTENCIALES DEL BIOGÁS EN EL CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL	36
8.1 El biogás en el contexto nacional	36
8.2 El biogás en el contexto internacional	39
9. POLÍTICAS NACIONALES PARA EL ESTÍMULO DEL USO DE TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	44
9.1 Financiamiento para materias primas de la SAGARPA	45
9.2 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	46
9.3 Otros apoyos: Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía	46
9.4 Incentivos	46
LISTA DE UNIDADES	47
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	48

RESUMEN EJECUTIVO

El desarrollo de las economías modernas conlleva la generación de altas cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, que junto con otros gases de efecto invernadero, están contribuyendo al incremento en la temperatura media de la atmósfera, con impacto en el equilibrio climático mundial. Se hace necesario, pues, buscar mecanismos de reducción de emisiones a través de acuerdos y acciones efectivas por parte de los gobiernos de los distintos países del orbe.

En un escenario de bajas emisiones de carbono, para el año 2050, las bioenergías en conjunto con otras fuentes de energía renovable podrían mitigar al menos el 14% de emisiones de gases de invernadero en el planeta. De estas bioenergías, y a pesar de estar limitada a una actividad regional, la producción de biogás ocupa un lugar importante por tener un desarrollo aplicable de manera comercial y una relación beneficio/costo favorable.

Basado en el estudio de procesos de descomposición natural de biomasa que llevan a la producción de biogás, el hombre ha desarrollado tecnologías que le permiten, por un lado, deshacerse de cantidades importantes de residuos orgánicos y por otro, aprovechar el biogás generado, como biocombustible. La generación y uso de este biocombustible permite, al sustituir parte de los energéticos fósiles, reducir la emisión neta de dióxido de carbono en forma directa y en forma equivalente por la combustión del metano contenido en el biogás.

Nuestro país es eminentemente agrícola y con una actividad pecuaria importante en algunas zonas, lo que permite identificarlo como una nación con potencial para el desarrollo de proyectos de producción de biogás.

En este número, se abordan los fundamentos bioquímicos y microbiológicos de la producción de biogás, los sustratos necesarios para su producción, así como su origen; las condiciones ambientales necesarias para que los microorganismos degradadores de materia orgánica, así como los productores de biogás, tengan una mayor productividad. Se discuten también las tecnologías sencillas que se han aplicado a nivel rural, utilizando estiércoles y otros sustratos, principalmente residuos agropecuarios, así como se comentan otras tecnologías más avanzadas, incluyendo las que llevan a la producción de hidrógeno, H_2 , como coproducto del sistema bioquímico-microbiológico de producción de biogás. También se contemplan otros sistemas de producción, como los que encontraríamos en el tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios. El poder calorífico y la calidad del biogás producido se abordan también llevando de esta forma a los usos que el biogás pudiera tener en forma práctica.

Se comenta en este número también, la distribución de las fuentes potenciales para la producción de biogás en nuestro país, con el fin de identificar las zonas que serían idóneas para la implementación de proyectos de producción de biogás. Se continúa con los usos actuales y potenciales del biogás en el contexto internacional y nacional, comentando, entre otros temas, las ventajas y desventajas en el uso del biogás como fuente de calor, electricidad o como combustible para sistemas de transporte. Al final, se aborda la producción de biogás como una tecnología que permitiría reducir las emisiones de carbono al reemplazar parte de los combustibles fósiles utilizados actualmente y que está incluida en las diversas estrategias nacionales e internacionales relativas a la mitigación y adaptación al cambio climático. Se abordan, finalmente, estrategias de estímulo a la implementación de estas tecnologías, como los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio, que incluyen la compra de reducciones de emisiones o bonos de carbono.

El uso de estas tecnologías requiere adicionalmente de estrategias para el manejo seguro del biogás, por presentar explosividad bajo condiciones específicas, así como de advertir del riesgo de fugas que se presentan en confinamientos de residuos sólidos urbanos, contemplando también el manejo de subproductos como el sulfuro de hidrógeno, que por sus características corrosivas puede dañar los generadores en sistemas de producción de energía eléctrica. Se habla también de la generación de coproductos como el hidrógeno y su posible generación en los sistemas de producción de biogás, así como de su utilización futura.

Las políticas y estímulos para el uso de tecnologías que permitan el aprovechamiento del biogás, brindan un apoyo elemental para cumplir con las metas que adquirió México en la reducción de Gases de Efecto Invernadero y que se encuentran enmarcadas en el Programa Especial de Cambio Climático.

Algunas acciones que serían útiles para estimular la utilización de biogás son: implementar impuestos sobre la emisión de CO_2 de los combustibles y la aplicación de certificados verdes o subsidios a los establecimientos que generen energía basada en fuentes renovables.

1. INTRODUCCIÓN

Bernd Weber ^a

El biogás es un producto de la descomposición anaerobia de materia orgánica, el cual está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano y es el producto final de una serie de reacciones en distintas etapas de degradación, relacionadas con la actividad de un consorcio microbiano de diversas bacterias y arqueas (productoras de metano).



Así la tecnología que se aplica para su aprovechamiento recae en el dominio de la ingeniería de bioprocesos, donde en un biodigestor se establecen condiciones favorables para el crecimiento de los microorganismos, dicho crecimiento es proporcional a la producción del biocombustible. Por ende, en la producción de biogás se deben controlar parámetros relevantes como temperatura, pH y concentración de sustratos, entre otros, para la optimización del mismo. Un resumen de los fundamentos bioquímicos para la producción de biogás se presentan en el capítulo 3.

El inicio del aprovechamiento técnico del biogás data desde principios del siglo pasado con el alumbrado público de Exeter (Reino Unido) que utilizaba biogás derivado del tratamiento de aguas residuales (Wellinger, 1991).

En paralelo, durante la misma época se iniciaba la construcción de digestores anaerobios en China con el propósito de obtener biogás para uso doméstico a partir de desechos agrícolas (Deublein y Steinhäuser, 2008). El desarrollo tecnológico de la digestión anaerobia por el alemán Imhoff fue también muy importante, el cual consistió en la incorporación del biogás como combustible para el transporte en vehículos municipales en Alemania antes de la segunda guerra mundial (Wellinger, 1991). Actualmente, la digestión anaerobia de lodos producidos durante el tratamiento de aguas residuales en países desarrollados es un requisito indispensable para plantas de tratamiento a gran escala, ofreciendo además el beneficio de que la energía generada puede disminuir el consumo de electricidad de la planta.

Este tipo de iniciativas deberían servir como modelo para países en vías de desarrollo, como aquellas observadas en la implementación de múltiples digestores en zonas rurales de India y China desde los años setenta. Dichos digestores son de construcción sencilla y en promedio cuentan con un volumen entre 3 y 10 m³, lo que permite brindar suficiente energía a una familia campesina para cocinar, alumbrar e incluso emplearlo en calefacción. Por ende, se debe de considerar la tecnología de producción de biogás como un instrumento necesario para la conversión eficiente de bioenergéticos, requisito para el desarrollo sustentable. Para el caso de México, un panorama de la situación nacional se presenta en el capítulo 8.

Así, este cuaderno contiene información básica y sucinta sobre los sustratos adecuados para la producción, microbiología involucrada en el proceso de conversión, tecnologías de procesos de biodigestión, utilización y aprovechamiento del biogás así como su potencial de aplicación.

Bibliografía

Wellinger, A. (1991): Biogas-Handbuch. Grundlagen - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. 2. Edition, Aarau, Wirz.

^a Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Facultad de Ingeniería, Toluca, Estado de México.

2. SUSTRATOS

Bernd Weber ^a

La producción de biogás es el resultado de una serie de procesos que se realizan en condiciones anaerobias por consorcios de microorganismos, por lo que es muy importante considerar la composición del material a utilizar como insumo, ya que aporta los nutrientes para el metabolismo de los microorganismos implicados y tiene una influencia directa en la producción de biogás.

2.1 Clasificación de los sustratos

Los sustratos actualmente utilizados en este proceso comprenden los campos de cultivos energéticos, residuos agrícolas, residuos orgánicos secundarios derivados de procesos industriales, desechos sólidos y aguas residuales. La generación de biogás a partir de cultivos energéticos (utilizado en Europa) compete por el terreno agrícola que es necesario para la producción alimenticia, esto ocasiona que el costo del sustrato sea considerablemente mayor que las otras opciones mencionadas.

Los residuos de origen agrícola por su naturaleza se generan en el campo, lo que favorece en muchas ocasiones su procesamiento en digestores a pequeña escala que, dependiendo de la entidad de producción, no generan costos de logística. De igual forma, los residuos orgánicos secundarios, que también se generan paralelamente en el campo, como el estiércol, se usan convenientemente en codigestión (digestión simultánea de dos o más sustratos) para obtener una relación adecuada entre el carbono y nitrógeno en el digestor. Esto es necesario porque las células microbianas necesitan una fuente tanto de carbono como de nitrógeno para la formación de nueva biomasa celular.

En la industria alimentaria se generan efluentes orgánicos secundarios de gran variedad con elevados flujos máxicos y diferente contenido de agua (en los casos donde éste es elevado, se les puede considerar aguas residuales). Es muy común el uso de digestores anaerobios para el tratamiento de estos residuos secundarios, por ejemplo, en el procesamiento de jugos de frutas, en rastros y en las centrales lecheras. Sin embargo, esta tecnología se ha extendido incluso a distintas industrias como la biotecnológica y de procesamiento.

Debido a la contaminación microbiológica, orgánica e inorgánica característica de los desechos municipales y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, estos residuos requieren un trato especial y no se recomienda su uso en codigestión con sustratos libres de contaminación. La digestión en condiciones termofílicas lleva a cabo una higienización del sustrato que puede ser utilizada para reducir la contaminación microbiológica en estos residuos.

2.2 Nutrientes necesarios para la digestión anaerobia

Para poder garantizar un crecimiento significativo de microorganismos, es indispensable la presencia de nutrientes en el medio, los cuales en la mayoría de los casos son aportados por el sustrato. Sin embargo, es aún más importante la relación entre las masas de carbono y nitrógeno en el sustrato, la cual debe encontrarse entre 16:1 y 25:1. Esta relación tiende a disminuir durante la digestión debido a la remoción del carbono, mejorando de esa manera la calidad de los residuos para su uso como fertilizante, debido a su contenido nitrogenado y de otros minerales. En el caso particular del uso de estiércol de ganado como sustrato, la relación es de sólo 8:1 e incluso esta relación es aún menor con estiércol porcino y aviar, por lo que se encuentra fuera del intervalo óptimo para la digestión.

Una forma de obtener la relación carbono-nitrógeno deseada es realizar una cofermentación añadiendo un sustrato secundario. Tal es el caso de la paja de trigo, cuya relación C:N es de 80:1. Otros nutrientes también deben encontrarse en cierta proporción, por ejemplo, el fósforo y el azufre deben de tener una relación C:P:S de (500-1000):5:3.

^a Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Facultad de Ingeniería, Toluca, Estado de México.

Si el desempeño de un digestor se reduce después de varios meses, una causa probable es la falta de algún nutriente. Esto suele pasar cuando el digestor se alimenta con un único sustrato (monosustrato). Como medida preventiva, se puede solicitar a laboratorios especializados un análisis de nutrientes y así determinar la causa de la disminución del desempeño y así poder hacer ajustes en la operación y agregar el o los nutrientes faltantes al digestor.

2.3 Rendimiento de biogás a partir de sustratos diversos

Antes de introducir los sustratos al digestor se requiere en la mayoría de los casos una preparación previa, la cual consiste básicamente en la trituración del sustrato y su mezclado con agua. El contenido de sólidos dentro del digestor anaerobio puede variar entre 3 y 10% dependiendo si éste cuenta con un dispositivo de mezclado en el interior, lo que permite mantener una concentración mayor de sólidos. En el caso de digestores mesofílicos y termofílicos, además del pretratamiento mencionado, también es recomendable precalentar el sustrato antes de introducirlo al reactor.

Se sabe por experiencia que un proceso de ensilado para residuos agrícolas, que con buenas prácticas causa poca pérdida de materia, mejora la digestibilidad de la materia orgánica; lo que en consecuencia permite una mayor producción de biogás. La cantidad de biogás producida no sólo depende el sustrato sino también de las condiciones ambientales del digestor, particularmente la temperatura y pH, pero por lo general se encuentra en intervalos registrados en la práctica como los listados en la TABLA 2.1. Las variaciones de producción de biogás que se encuentran en la tabla se deben a las condiciones operativas del digestor. Por tal motivo se especifican parámetros de diseño para un biodigestor mezclado y a una temperatura de 36 °C. Estos valores se ubican entre paréntesis.

Según la relación de Symons y Buswell, al ocurrir la mineralización completa de la materia orgánica en un ambiente anaerobio, la producción del biogás estará sujeta al consumo de agua y su composición puede predecirse con la ecuación mostrada en la Figura 2.1 (Symons *et al*, 1933).

Sustrato	DM % de materia fresca	oDM % de materia fresca	Biogás m ³ /kg oDM	Metano % de m ³ CH ₄ /m ³ Biogás
Estiércol de ganado bovino en base húmeda	7.5 - 13	6.4 - 10	0.17 - 0.63 (0.38)	53 - 62 (55)
Estiércol de cerdo "cerdaza" en base húmeda	2.3 - 11	1.3 - 7.1	0. - 0.88 (0.42)	47 - 68 (60)
Estiércol de ganado bovino seco con paja	25	21	(0.45)	55
Estiércol de caballo sólido seco con paja	27	23	0.3 - 0.4 (0.44)	52
Estiércol de pollo de engorda "Pollinaza"	25	22	0.15 - 0.53 (0.50)	42 - 68 (55)
Estiércol de borrego seco con paja	-	-	0.4 - 0.5	50 - 60
Estiércol de cerdo "cerdaza" con paja	15 - 25	12 - 20	0.45	
Paja de trigo			0.25 - 0.4 (0.4)	52
Zacate de maíz			0.5	
Suero de leche	5		(0.75)	(53)
Hoja de cultivo de papa			0.5 - 0.6	52
Ensilado de pasto	27 - 57	25 - 46	0.21 - 0.7 (0.60)	52 - 56
Lucerna	14 - 35	12 - 31	0.55 - 0.8 (0.53)	55

Tabla 2.1. Característica de diversos sustratos y la ganancia de biogás de su digestión (Primera Parte).

Sustrato	DM % de materia fresca	oDM % demateria fresca	Biogás m ³ /kg oDM	Metano % de m ³ CH ₄ /m ³ Biogás
Ensilado de maíz	25 - 37	24 - 36	0.3 - 1.13 (0.65)	47 - 69
Ensilado de cereal (centeno)	25 - 61	23 - 58	0.49 - 0.68 (0.60)	59 - 62 (52)
Pasto Sudán	33 - 46	14 - 36	0.33 - 0.38 (0.33)	54 - 62 (63)
Ensilado de remolacha	10 - 11	9.3 - 9.9	0.7 - 1.13 (0.70)	52
Grasa derivada de trampas	48	85	0.7 - 1.3	60 - 77
Contenido de mondongo	11 - 19	9 - 16	0.2 - 0.4	60
Contenido de rumen			0.45 - 0.55 (0.48)	44 - 55 (50)
Harina animal			0.5 - 0.8	
Glicerina	100		(0.85)	50
Ojuelo de malta	21 - 25	20 - 24	0.42 - 0.85 (0.52)	55 (50)
Residuos de producción de etanol (origen trigo)	4.6 - 76	4.3 - 71	0.39 - 0.72 (700)	53 - 55 (55)
Cáscara de papa	25		(0.61)	50
Melazas	5		(0.68)	54
Residuo de cantinas	14 - 19	12 - 16	0.15 - 0.68 (0.68)	43 - 77 (60)
Aceite de freír usado	95		0.874 (1.00)	(68)

Tabla 2.1. Característica de diversos sustratos y la ganancia de biogás de su digestión (Segunda Parte).

(DM = materia seca por sus siglas en inglés; oDM = materia orgánica seca).

Valores en paréntesis son parámetros de diseño en digestores de tecnología de punta.

(KTBL, 2012)

De aquí se observa que conociendo la composición elemental del sustrato, es posible calcular la producción teórica de biogás cuyo valor es mayor que los valores prácticos establecidos en la TABLA 2.1. Con excepción del metano, los productos de la digestión tienen una considerable solubilidad en agua, por lo que también son extraídos parcialmente del digestor a través de los residuos de digestión (el amoníaco es extraído casi en su totalidad en estos residuos).

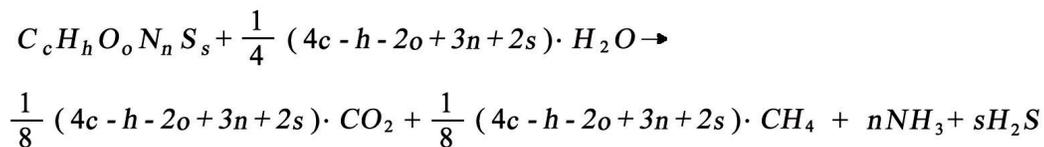


Figura 2.1. Relación de Symons y Buswell.

(Symons and Buswell, 1993)

Bibliografía

KTBL (2012): Biogasrechner. Online verfügbar unter <http://daten.ktbl.de/biogas/navigation.do?selectedAction=Startseite#start>, acceso 03.07.2012.

Symons, G. E.; Buswell, A. M. (1933). The methane fermentation of carbohydrates. In: J. Am. Chem. Soc 55 (5), S. 2028–2036.

3. FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DE LA METANOGÉNESIS

Marcelo Rojas Oropeza ^a

Bioquímica y microbiología de la digestión anaerobia

El conocimiento y aprovechamiento de los procesos naturales de producción de biogás, a través del desarrollo de tecnologías prácticas, han permitido desarrollar un método probado para la conversión de materia orgánica compleja mediante digestión anaerobia con fines de obtener un gas con un alto poder calorífico.

El proceso anaerobio involucra una compleja serie de reacciones bioquímicas y se puede dividir en cuatro etapas que se desarrollan de manera simultánea y secuencial: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Batstone *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2008). La digestión anaerobia es una interacción compleja y especializada de una comunidad microbiana constituida por los dominios *Bacteria* y *Archaea*, unidos en una red alimenticia sintrófica¹ y simbiótica² en dos procesos muy importantes: la acidogénesis y metanogénesis (Nielsen *et al.*, 2004).

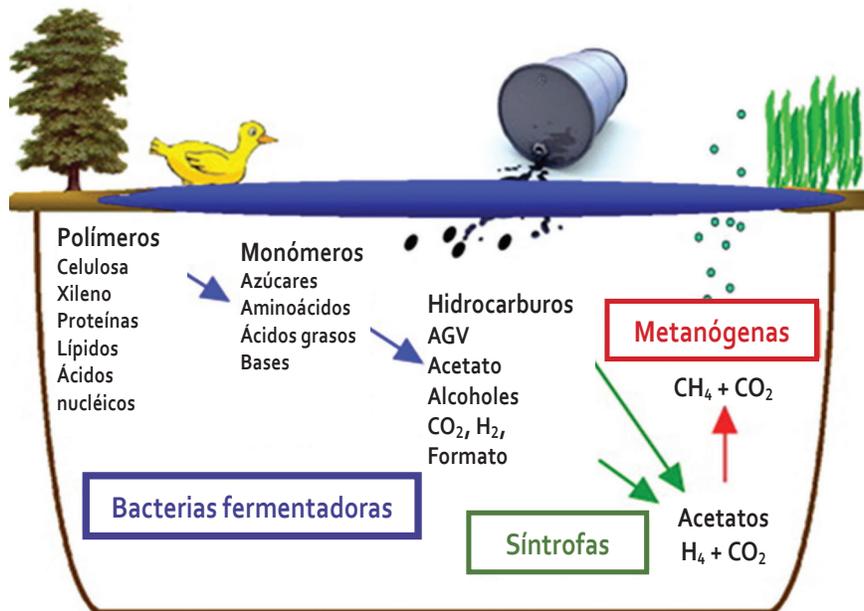


Figura 3.1. Cadena alimenticia anaerobia para la conversión de materia orgánica en CH₄ adaptada de McInerney y colaboradores (2009); ácidos grasos volátiles (AGV).

3.1 Hidrólisis

Los conceptos de desintegración, solubilización e hidrólisis enzimática son usualmente expresados por el término cinético general de hidrólisis. Durante esta etapa las moléculas o grandes polímeros (MW 10³ - 10⁹) son reducidos de tamaño, pasan de ser moléculas complejas solubles e insolubles como carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos (MW 100 - 350) que no pueden ser directamente metabolizados por los microorganismos anaerobios, a ser monómeros o moléculas más pequeñas y simples. La hidrólisis de polímeros orgánicos es llevada a cabo por enzimas extracelulares

^a Doctor en Biología. Profesor de Asignatura A, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

¹ Ocurre cuando dos organismos se complementan mutuamente en términos de factores nutricionales (Atlas y Bartha, 2002).

² Ocurre en una asociación interactiva obligatoria entre miembros de dos poblaciones distintas, que produce una condición estable en la que ambos viven juntos físicamente obteniendo ventajas mutuas (Atlas y Bartha, 2002).

(proteasas, celulasas, lipasas y amilasas), producidas por bacterias fermentativas primarias. Esto facilita el transporte a través de la membrana celular para el metabolismo de los monómeros liberados (aminoácidos, monosacáridos, ácidos grasos de cadena larga y glicerol) (Vavilin *et al.*, 2008). Algunos de los microorganismos más representativos son los pertenecientes a los géneros *Acidaminobacter*, *Acetovibrio*, *Bacillus*, *Bifidobacterium*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Desulforomonas*, *Desulfobacter*, *Escherichia*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas*, *Propionibacterium*, *Smithella*, *Streptococcus*, *Butyrivibrio* y otros géneros pertenecientes a los phyla *Proteobacteria* y *Firmicutes* (Díaz *et al.*, 2006; Ariesyady *et al.*, 2007).

3.2 Acidogénesis y acetogénesis

En esta etapa los monómeros liberados anteriormente son degradados mediante reacciones fermentativas, en donde los compuestos orgánicos funcionan como aceptores y donadores de electrones. Los principales productos de esta etapa son ácidos grasos volátiles (AGV), que funcionan como intermediarios degradativos, como son alcoholes, ácido propiónico, *n*-butírico, *n*-valérico, caprónico y láctico. Así como los precursores directos para la formación de metano (CH₄), que son el ácido fórmico, metilaminas, ácido acético, metanol, hidrógeno (H₂) y CO₂ (Grady *et al.*, 1999; Baserba *et al.*, 2012). Los monómeros son degradados por *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptococcus* (Mara y Horan, 2003).

El ácido acético es el mayor intermediario en la cadena alimenticia anaerobia. Diversos sustratos como CO₂, H₂, carbohidratos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, compuestos aromáticos y algunos sustratos halogenados pueden ser oxidados y producir reductores utilizables para la reducción de CO₂ a acetato, por medio de la ruta del acetyl-CoA mejor conocida como ruta heterofermentadora. Cuando las hexosas (azúcares de seis carbonos) son convertidas exclusivamente a acetato, la reacción fermentativa es llamada homoacetogénesis (Müller, 2003; Baserba *et al.*, 2012). Son bacterias estrictamente anaerobias, los géneros más representativos en digestores anaerobios son *Clostridium*, *Acetoanaerobium*, *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Butyribacterium*, *Paleobacter*, *Treponema* y *Halophaga*. Existe otro tipo de bacterias acetógenas que se caracterizan por la producción obligada de H₂ y por su participación en la degradación de compuestos aromáticos, se denominan OHPA (*Obligate Hydrogen Producing Acetogens*): *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Syntrophospora* y *Syntrophus* (Drake *et al.*, 2002; Müller, 2003).

3.3 Metanogénesis

La formación de CH₄, el cual es el último producto de la digestión anaerobia está limitado a tres tipos de precursores: CO₂, compuestos que contengan un grupo metilo y acetato (Liu y Whitman, 2008). Todos los metanógenos son estrictamente arqueas (dominio Archea) anaerobias oxígeno-sensibles, que pertenecen al phylum *Euryarchaeota* (Liu y Whitman, 2008). Aunque las arqueas son organismos muy antiguos, su existencia fue evidenciada cuando Béchamp y Popoff descubrieron su existencia en el siglo XIX gracias a la formación de gas metano debido a la actividad microbológica (Jetten, 1992).

Cuando la metanogénesis es mediada por el CO₂ como precursor se denomina hidrogenotrófica o hidrogenófila y se utiliza H₂ como principal donador de electrones (Liu y Whitman, 2008; Baserba *et al.*, 2012).

Reacciones de la metanogénesis hidrogenotrófica

A partir de dióxido de carbono	$4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
A partir de formiato	$4 \text{ HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
A partir de isopropanol	$\text{CO}_2 + 4 \text{ CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_4 + 4 \text{ CH}_3(\text{CO})\text{CH}_3 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
A partir de monóxido de carbono	$4 \text{ CO} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{ CO}_2$

El segundo tipo es la metanogénesis metilotrófica, que incluye metanol, metilaminas y sulfatos metilados como precursores para la formación de CH₄ (Liu y Whitman, 2008; Baserba *et al.*, 2012).

Reacciones de la metanogénesis metilotrófica

A partir de metanol	$4 \text{ CH}_3\text{OH} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
A partir de metanol e hidrógeno	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
A partir de dimetilsulfuro	$2 (\text{CH}_3)_2\text{-S} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{S}$
A partir de metilamina	$4 \text{ CH}_3\text{-NH}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{ NH}_3$
A partir de dimetilamina	$2 (\text{CH}_3)_2\text{-NH} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ NH}_3$
A partir de trimetilamina	$4 (\text{CH}_3)_3\text{-N} + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 9 \text{ CH}_4 + 3 \text{ CO}_2 + 4 \text{ NH}_3$
A partir de cloruro de metilamonio	$4 \text{ CH}_3\text{NH}_3\text{Cl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{ NH}_4\text{Cl}$

El tercer tipo es la metanogénesis acetotrófica o acetoclástica, donde el precursor principal es el ácido acético. En ambientes naturales dos terceras partes del CH_4 generado biológicamente deriva del acetato (Liu y Whitman, 2008; Baserba *et al.*, 2012).

Reacción de la metanogénesis acetotrófica

A partir de ácido acético	$\text{CH}_3\text{CO OH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
---------------------------	-----------------------------------------------------------------

Las arqueas metanógenas son un grupo filogenéticamente diverso. Están clasificadas en 5 ordenes bien establecidos *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales* y *Methanopyrales*, pero sólo algunos géneros se encuentran representados en digestores anaerobios *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanothermobacter*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Methanocolleus*, *Methanofollis*, *Methanospirillum*, *Methanocorpusculum*, *Methanosarcina*, *Methanosaeta* (Liu y Whitman, 2008; Thauer *et al.*, 2008).

3.4 Condiciones ambientales

Temperatura

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes ya que mejora o inhibe a grupos microbianos específicos, esto debido a que las actividades implican reacciones enzimáticas, donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura. Otra razón son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia (McKeown *et al.*, 2009).

Por ello es importante que la temperatura se mantenga constante ya que cada grupo bacteriano posee un grado de temperatura óptimo de crecimiento. Si la temperatura fluctúa, no se podrá mantener ninguna población metanógena en forma estable y una disminución en la población de un determinado grupo puede afectar al proceso de digestión anaerobia, reduciendo el grado de estabilización del lodo y con ello la formación de CH_4 (Chen *et al.*, 2008).

Los reactores con régimen termófilo necesitan un control de temperatura para mantener una producción constante de CH_4 , mientras que los que se encuentran bajo régimen mesófilo pueden operar en un rango de temperatura más amplio. En este último caso, en latitudes donde se alcanzan temperaturas de congelación, se hace necesario utilizar parte de la energía producida en el calentamiento del reactor.

pH y AGV

En cuanto al pH se establece que el funcionamiento óptimo de la digestión anaerobia esta alrededor de la neutralidad, este se ubica entre 6.8 y 7.4. Está íntimamente relacionado a la concentración de AGV y su relación con la alcalinidad

del sistema. Esta condición es imperante en cualquier condición de temperatura, aunque se puede recurrir a un sistema de dos fases, en donde las dos primeras etapas del proceso se establecen como un sistema de condición acidógena y las dos últimas como la condición metanógena. Se debe destacar la importancia de las bacterias sulfatorreductoras y acetógenas pues estas poblaciones microbianas son quienes mantienen los niveles ideales de pH mediante el consumo óptimo de AGV, y también mantienen un equilibrio perfecto entre los productores y consumidores de H₂. Éste equilibrio es conocido como asociación sintrófica o transferencia interespecie de H₂ (Kalia *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2008).

3.5 Inhibición

La operación estable de la digestión anaerobia requiere de un equilibrio dinámico entre tres principales comunidades microbianas funcionales: fermentadora, acetógena y metanógena, integradas por los dominios *Bacteria* y *Archaea* (Ariesyady *et al.*, 2007). Estas comunidades microbianas por lo general están organizadas en gránulos o flóculos (Sekiguchi *et al.*, 1998; Satoh *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Abram *et al.*, 2011). Esto les permite el acceso inmediato a los productos que utilizan como fuentes de energía, ya que el proceso de digestión anaerobia se caracteriza porque los productos de desecho de unas bacterias son la fuente de energía de otras.

El hidrogeno es muy importante para el adecuado funcionamiento del proceso anaerobio, ya que de no encontrarse en los niveles óptimos puede producir fallas. Presiones menores a las adecuadas provocarían que todas las reacciones que utilizan hidrogeno como aceptor en forma de H⁺ o donador de electrones en forma de H₂ no se llevaran a cabo. El último tiene su función como donador en la primera reacción presentada dentro del grupo de las hidrogenotróficas. Sin embargo las altas presiones parciales de H₂ inhiben el crecimiento celular para la acetogénesis (Cirne *et al.*, 2007; Kalia *et al.*, 2008).

Por lo tanto, las sustancias inhibitoras son compuestos que o están presentes en los residuos a tratar antes de su digestión o bien se forman durante el proceso de digestión anaerobia. Estas sustancias inhiben el proceso de la digestión e incluso pueden llegar a causar la desestabilización completa de la comunidad microbiana en cualquier de las etapas.

A determinadas concentraciones de AGV o presencia de compuestos difíciles de degradar (polímeros como celulosa, lignina o compuestos xenobióticos, es decir sintéticos), se generan serios problemas de inhibición. Otros problemas de inhibición son los causados por el amoniaco (presente en gallinaza, vinazas, etc.), el ácido sulfhídrico, o los ácidos grasos de cadena larga. Dependiendo del pH presente, dichos inhibidores puedan estar ionizados y de esa manera perder el carácter de ser un inhibidor. Para el ácido acético la concentración mínima para detectar un efecto de inhibición es de 2000 mg/L a un pH de 7 con efecto que crece conforme el pH disminuye. La metanogénesis tolera una concentración de amonio de 4000 mg/L a pH 7 que corresponde a una concentración de amoniaco de aproximadamente 20 mg/L. Para un pH mayor de 7, el equilibrio está al lado del amoniaco, con mayor peligro de intoxicación para las bacterias metanogénicas. El estado de disociación del ácido sulfhídrico aumenta con incrementos de pH, con el efecto de ya no ser toxico. Para el pH de 7 la concentración donde se observa una inhibición es de 200 mg H₂S /L (Böehneke, 1993).

También pueden llegar a afectar el proceso según su concentración, la presencia de compuestos ajenos a la dinámica de la digestión anaerobia, tal como los pesticidas, desinfectantes, metales pesados o antibióticos (Chen *et al.*, 2008). Por lo tanto, la alimentación de un digestor anaerobio requiere en términos de eficiencia energética, definir la temperatura a la cual se desarrollará el proceso, permitir preservar el equilibrio entre los microorganismos sintróficos, el cual se puede promover con el control del sustrato con que se alimenta el digestor y el monitoreo de la relación alfa (relación de equilibrio entre los carbonatos y bicarbonatos con los ácidos grasos).

Bibliografía

- Abram F., Enright A.-M., O'Reilly J., Botting C.H., Collins G., O'Flaherty V. 2011. A metaproteomic approach gives functional insights into anaerobic digestion. *Journal of Applied Microbiology*. 110. 1550-1560.
- Ariesyady, H.D., Tsukasa, Ito, T., Okabe, S. 2007. Functional bacterial and archaeal community structures of major trophic groups in a full-scale anaerobic sludge digester. *Water Research*. 41: 1554-1568.
- Atlas, R.M.; Bartha, R. 2002. *Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental*. 4a. ed. Prentice Hall.
- Baserba, M.G., Angelidaki, I., Karakashev, D. 2012. Effect of continuous oleate addition on microbial communities involved in anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*. 106. 74-81.

- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V.A.** 2002. Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1). Scientific and Technical Report No. 13. IWA Publishing, Cornwall, UK.
- Böhnke, B., Bischofsberger, W., Seyfried C.F.** 1993. Anaerobtechnik. Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm. Editor: B. Böhnke, Berlin, Springer, 837 pp.
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S.** 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 99: 4044-4064.
- Cirne, D.G., Lehtomäki, A., Björnsson, L., Blackall, L.L.** 2007. Hydrolysis and microbial community analysis in two-stage anaerobic digestion of energy crops. *Journal of Applied Microbiology*. 103: 516-527.
- Díaz, E.E., Stams, A.J.M., Amils, R., Sanz, J.L.** 2006. Phenotypic properties and microbial diversity of methanogenic granules from a full-scale upflow anaerobic sludge bed reactor treating brewery wastewater. *Applied and Environmental Microbiology*. 72: 4942-4949.
- Drake, H.L., Küsel, K., Matthies, C.** 2002. Ecological consequences of the phylogenetic and physiological diversities of acetogens. *Antonie van Leeuwenhoek*. 81 (1-4): 203-213.
- Grady, C.P.L., Daigger, G.T., Lim, H.C.** 1999. Biological wastewater treatment, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc. U.S.A., 1076 pp.
- Kalia, V.C., Purohit, H. J.** 2008. Microbial diversity and genomics in aid of bioenergy. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 35: 403-419.
- Lee Ch., Kim J., Gu Shin S. G., Hwang S.** 2008 Monitoring bacterial and archaeal community shifts in a mesophilic anaerobic batch reactor treating a high-strength organic wastewater. *FEMS Microbiology Ecology* 65 (3): 544-554.
- Liu, Y., Whitman, W.B.** 2008. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. *Annals of the New York Academy of Science*. 1125: 171-189.
- Mara, D., Horan, N.J.** 2003. The handbook of water and wastewater microbiology. Academic Press. U.K.
- McInerney, M.J., Sieber, JR., Gunsalus, RP.** 2009. Syntrophy in anaerobic global carbon cycles. *Current Opinion in Biotechnology* 20:623-632.
- McKeown, RM., Scully, C., Enright, AM., Chinalia, FB., Lee, C., Mahony, T., Collins G., Müller, V.** 2003. Energy conservation in acetogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 69(11): 6345-6353.
- Nielsen, H.B., Mladenovska, Z., Westerman, P., Ahring, B.K.** 2004. Comparison of two-stage thermophilic (68 degrees C / 55 degrees C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55 degrees C) digestion of cattle manure. *Biotechnology and Bioengineering*. 86(3): 291-300.
- Sekiguchi, Y., Kamagata, Y., Syutsubo, K., Kazuaki, S., Ohashi, A., Harada, H., Nakamura, K.** 1998. Phylogenetic diversity of mesophilic and thermophilic granular sludges determined by 16S rRNA gene analysis. *Microbiology*. 144 (Pt 9): 2655-2665.
- Thauer, R.K., Kaster, A.K., Seedorf, H., Buckel, W., Hedderich, R.** 2008. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews Microbiology*. 6: 579-591.
- Vavilin, V.A., Fernández, B., Palatsi, J., Flotats, X.** 2008. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*. 28 (6): 939-951.

4. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Bernd Weber ^a

4.1 Digestión en el rumen de res

El rumen de los animales rumiantes, un sistema optimizado por la evolución, logra digerir, dependiendo del alimento, hasta un 80% del contenido lignocelulósico de la biomasa, pudiendo superar la tasa de bioconversión de muchos digestores. Debido a ello, la caracterización nutrimental de forrajes de Weender y van Soest es un parámetro alternativo a las referencias de la tabla 1 para la estimación de la producción de biogás a partir de algún sustrato (van Soest *et. al.*, 1967). Resulta impresionante que el sistema digestivo del ganado logra dicha conversión en un lapso de tan solo 2 a 3 días, mediante la producción de saliva, el masticado y un consorcio microbiano con concentración de 50×10^9 microorganismos/mL residiendo a una temperatura constante en el rumen. Para digerir materia lignocelulósica suspendida en un digestor se necesitan más de 60 días, e incluso hay casos como los rellenos sanitarios que tienen actividad metanogénica durante varias décadas. Sólo los digestores con sistemas de retención de biomasa para el tratamiento de aguas residuales, donde la materia orgánica ya está disuelta sin la necesidad de ser hidrolizada, tienen tasas de conversión de pocas horas.

4.2 Digestión de biomasa

4.2.1 Digestores de operación en lote (discontinuos o de régimen estacionario)

La digestión en lote se caracteriza por un tanque que contiene el sustrato, sin flujos en la entrada o la salida durante el proceso. El contenido del tanque incluye también un mínimo de 10% de inóculo, utilizando como inóculo en muchos casos materia orgánica digerida en el lote anterior. La digestión es efectuada durante un mínimo de 4 semanas a temperatura constante. Esta configuración de digestores puede ser una alternativa para la digestión de residuos que se generan por temporadas en grandes cantidades como ocurre en la industria de procesamiento de frutas.

Recientemente, la digestión en lote se ha utilizado para la fermentación en fase seca, la cual se explica en el punto 4.3. Dado que la producción de biogás no es constante durante una digestión en lote, es conveniente operar simultáneamente varios digestores con ciclos desfasados.

Estas operaciones de digestión también son muy comunes en los laboratorios de investigación, ya que permite operar varios digestores bajo diferentes condiciones a la vez. Incluso hay diferentes métodos de prueba estandarizados para evaluar la digestibilidad de sustratos.

4.2.2 Digestores sencillos con implementación en zonas rurales

Sin duda la mayor experiencia en construcción de biodigestores para pequeños agricultores está en China. Los materiales que se emplean para la construcción de tanques subterráneos son principalmente concreto y ladrillo. La hermeticidad se garantiza con mortero en ambos lados de los muros, al cual se le agregan aditivos para un mejor sellado. Sin embargo, los sistemas son propensos a fugas de biogás, sobre todo cuando operan a presión elevada, por lo que es necesario darles mantenimiento. Por esa razón, hoy en día se diseñan también digestores construidos en acrílico reforzado con fibra de vidrio que requieren un menor mantenimiento y mantienen una mejor hermeticidad. Un modelo de este tipo de biodigestores lo muestra la FIGURA 4.1.

También existen otras opciones como digestores de hule y polietileno, cuya principal ventaja es una inversión inicial baja, pero la experiencia ha demostrado que tienen menor durabilidad. Debido a que no pueden ser enterrados en su

^a Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Facultad de Ingeniería, Toluca, Estado de México.

totalidad, estos biodigestores están expuestos a la intemperie, lo que conlleva mayores cambios de temperatura externa, y cuando dichos cambios o el gradiente dentro del reactor son mayores de $\pm 2^\circ\text{C}$ durante un día hay una reducción en la producción de biogás de hasta un 30%.

Además de lo anterior en temporadas con bajas temperaturas, como en invierno, a una temperatura de 17°C la producción de biogás se reduce hasta $0.12 \text{ m}^3_{\text{Biogás}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, mientras que en el verano a una temperatura de 29°C es de $0.35 \text{ m}^3_{\text{Biogás}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (Hamad, 1981).

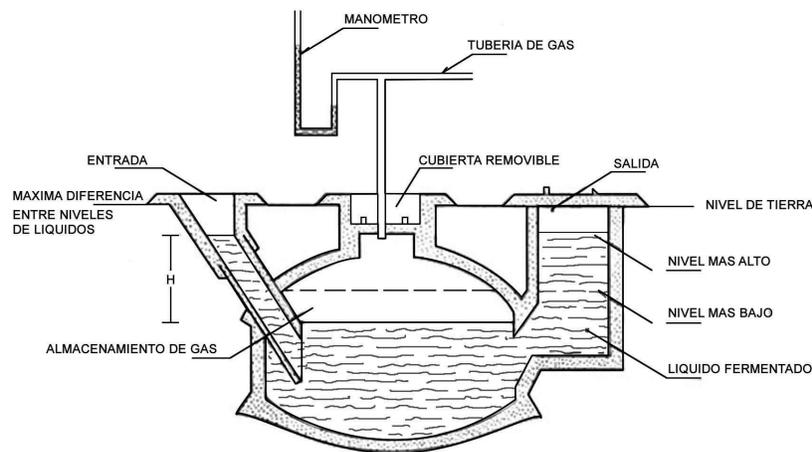


Figura 4.1. Digestor tipo chino.
(Insam et. al., 2010)

4.2.3 Digestores con tecnología de punta

Una planta de biogás tiene el objetivo de ser eficiente, por lo que en su diseño se deben implementar tecnologías de punta para garantizar una producción sostenible y segura que permita recuperar la inversión en el menor tiempo posible. La FIGURA 4.2 muestra un digestor con calefacción, aislamiento y domo inflable. El domo alberga el biogás que posteriormente es utilizado para generar electricidad en los motogeneradores, cuya potencia de operación es controlada por la presión del gas en el interior del domo o por la altura del domo inflable. A su lado está el contenedor que alberga el motogenerador y una antorcha de emergencia en el techo.



Figura 4.2. Planta de biogás con tecnología de punta.
(Foto: Haase Energietechnik Neumünster)

En la FIGURA 4.3 se ilustra el esquema de una planta de biogás diseñada para la cofermentación de residuos del sector alimentario (4.7% cáscara de papa, grasas 19%), residuos agrícolas (estiércol de gallina 6%) y cultivos energéticos (ensilado de maíz 16%, entre otros). El sustrato derivado de las diversas fuentes se mezcla en una batería de 3 tanques de preparación. Los 3 tanques de preparación, se alternan para alimentar los dos digestores principales por medio de una bomba centrífuga, apta para sustratos con una concentración de sólidos de hasta el 25% en este caso. En comparación al volumen efectivo del digestor principal de 708 m³, cada uno de los tanques de preparación corresponden al 10% del volumen total de la planta de biogás. En doce ciclos diarios, el sustrato precalentado y mezclado con un contenido de 24.5% de sólidos es introducido a los dos digestores principales en forma paralela, donde permanece por 55 días a 36.5 °C en el primer digestor y 55 °C en el segundo digestor. Los digestores reciben una carga de materia orgánica de aproximadamente 3 kg_{SV}/ (m³·d) (SV= sólidos volátiles) y tienen una producción específica de 1.5 m³_{Biogás}/ (m³_{Digestor}·d) por día. La postfermentación es realizada en el tanque de almacenamiento cerrado con mezclador que no cuenta con calefacción, donde la materia orgánica es degradada por 100 días más con una producción específica de 0.8 m³_{Biogás}/ (m³_{Digestor}·d). El balance de la materia orgánica muestra una degradación del 88%, con un residuo que tiene una materia orgánica residual de 2.4 kg_{oDM}/m³_{FM} (FM=fresh matter, materia fresca). Esto resulta en una producción específica de biogás de 580 m³/ (t_{oDM alimentado}) con una concentración de metano del 55.7%. La relación NH₄/N del sustrato es de 0.22; mientras que la del residuo es 0.8, reflejando la alta tasa de mineralización (FAL, 2005).

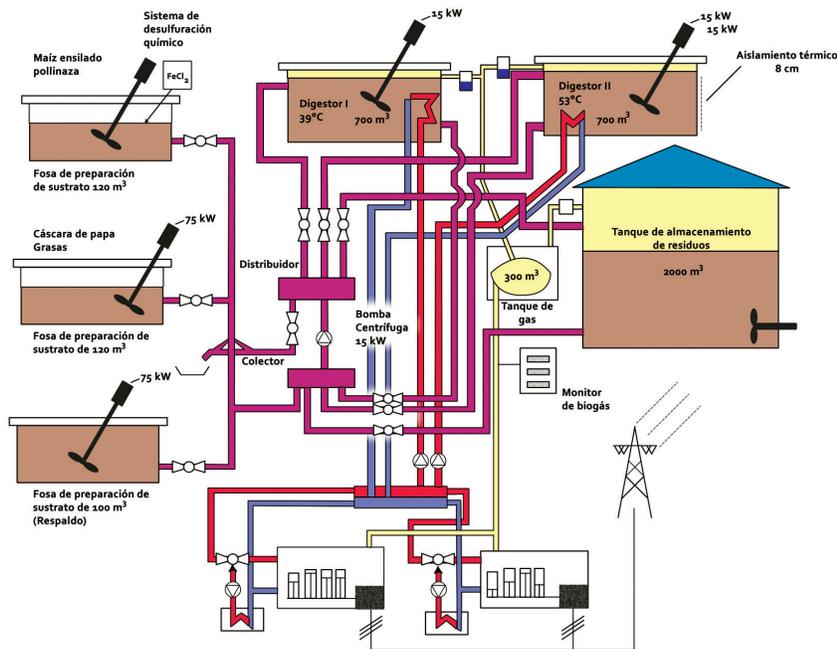


Figura 4.3. Diagrama de planta de biogás con tecnología de punta.

(FAL, 2005)

4.3 Digestión de residuos sólidos

La digestión de residuos sólidos municipales o biosólidos requiere de tecnologías más sofisticadas debido a la poca homogeneidad de los sustratos, particularmente en el pretratamiento de sólidos, que consiste en sistemas de trituración, clasificación (criba) y separación de metales. Aún así, el manejo de los sólidos dentro del digestor es problemático debido a los fenómenos de sedimentación y formación de capas flotantes de mucha rigidez, que incluso han llevado muchos proyectos demostrativos a su fracaso en el pasado. Sin embargo, hoy en día las tecnologías disponibles han demostrado la factibilidad de dar un tratamiento más sustentable a los residuos. Aparte de la digestión de la materia orgánica en fase suspendida como detalle en el párrafo anterior, existe la tecnología de la fermentación en fase seca,

la cual se denomina de esta manera porque el contenido de humedad es considerablemente menor que en otros tipos de digestión. La principal diferencia entre la fermentación en fase seca y la fermentación convencional es el uso de sustratos apilables que no permiten su transporte por bombeo. Como detalle adicional cabe hacer notar que en fase seca se trabaja con un sólido de un contenido de humedad menor al 70%. La FIGURA 4.4 muestra una línea de proceso de tratamiento de sólidos en un proceso de fermentación en fase seca, con el digestor en posición horizontal, lo que permite un flujo secuencial sin cortocircuitos en los residuos.

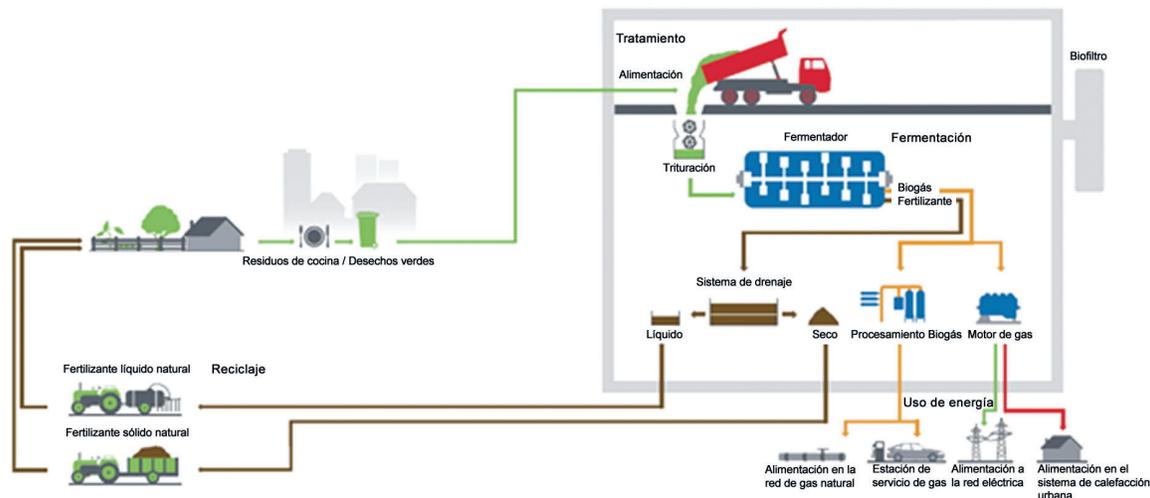


Figura 4.4. Digestión anaerobia seca de residuos municipales.
(Compañía: Compogas)

4.4 Relleno sanitario como reactor de digestión anaerobia

En un relleno sanitario se observará una mineralización completa, que es la eliminación de la materia orgánica en su totalidad, mientras que éste disponga de agua, por el consumo que define la relación de Symons & Buswell y por la pérdida a través de los lixiviados (solución acuosa saliendo del punto más bajo del relleno sanitario, que debido a la contaminación orgánica e inorgánica requiere un tratamiento). Como regla general se producen 1800 m³ de biogás por tonelada de carbono orgánico depositado (Lechner, 2004). La producción de biogás en un relleno sanitario se presenta a lo largo de varias décadas, pero durante poco tiempo la producción es lo suficientemente abundante para ser aprovechada con fines energéticos; el resto del biogás se escapa por las fugas contribuyendo al calentamiento global con emisiones de gases de efecto invernadero. Estudios sobre varios rellenos sanitarios en EUA demostraron que el potencial de producción de biogás es de 210 m³ por tonelada de residuos municipales depositados con una tasa de captación del 35% (Themelis, 2010). Por tal razón, un relleno sanitario como biodigestor no es una opción para la disposición de residuos en países desarrollados.

No obstante, la captación del biogás generado en los rellenos sanitarios en México es un tema prioritario. En la actualidad, sólo el 20% de los rellenos sanitarios en nuestro país cuenta con sistemas de captación de biogás, por lo que se emiten un total de 50 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono a la atmósfera. La implementación de sistemas de captación de biogás en rellenos sanitarios es urgente, no sólo por el aprovechamiento energético sino también por la reducción de la emisión del gas metano, cuyo efecto de calentamiento global es 25 veces mayor que el dióxido de carbono (IPCC, 2008).

Los residuos depositados en los rellenos sanitarios pasan por varias etapas de distinta duración antes de que se transformen en biogás, siendo que al final el relleno sanitario queda inactivo (FIGURA 4.5). El proceso de oxidación biológica, en el que se respira el oxígeno en el sistema, toma poco tiempo. Posteriormente inician las etapas de fermentación que reducen el pH dentro del cuerpo a valores que inhiben la actividad metanogénica. Al paso de algunos años, se incrementa la actividad metanogénica a una velocidad muy baja, mientras los lixiviados alcanzan valores máximos de carbono orgánico total (TOC, "total organic carbon" por sus siglas en inglés). Una vez finalizada la fase ácida de la degradación, aumenta rápidamente la actividad metanogénica y a consecuencia la concentración de metano en el biogás se incrementa y es cuando puede ser aprovechado con fines energéticos. La siguiente etapa estable de producción de biogás puede durar hasta 3 décadas. La razón por la cual la degradación es lenta se debe a la producción paralela de varios inhibidores como el amoníaco, el ácido sulfhídrico y el mismo ácido acético, principal sustrato de la metanogénesis. Otro inhibidor en la producción de biogás es la temperatura, ya que esta aumenta en el interior debido a la misma actividad microbiológica.

La experiencia ha demostrado que una vegetación abundante sobre el cuerpo del relleno y condiciones favorables en el suelo para el crecimiento de microorganismos, permiten la oxidación microbiológica del gas metano saliendo del interior (Humer, 2001). Dicha oxidación del gas metano lo convierte en dióxido de carbono el cual se considera de origen biogénico (libre de emisiones) si es derivado de un relleno sanitario. Cabe mencionar que debido a hundimientos en el cuerpo del relleno, la capa superficial es afectada a tal grado que se forman grietas y es común la aparición de fugas puntuales, requiriendo mantenimiento constante a los sellos hasta que el relleno sanitario se clasifique como inactivo (ver FIGURA 4.5).

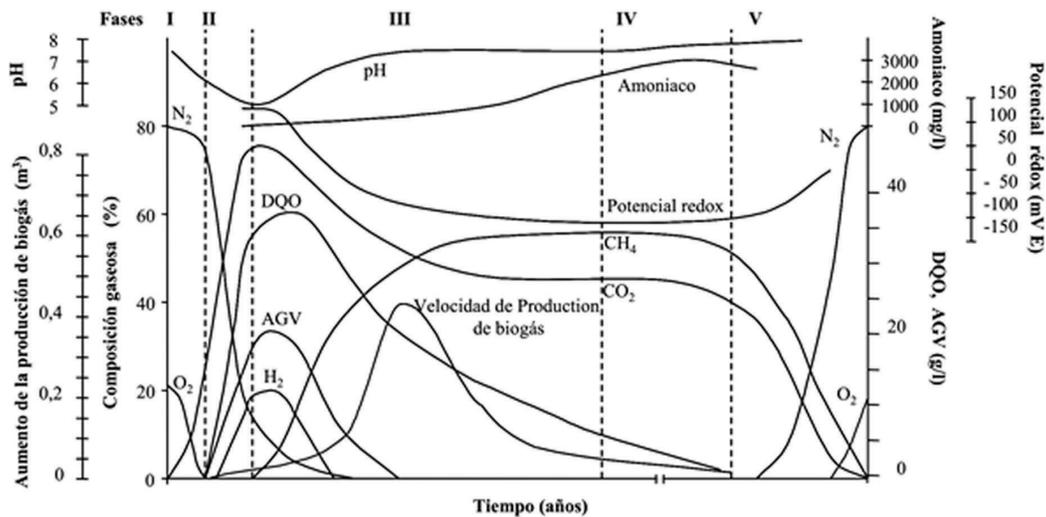


Figura 4.5. Fases de un relleno sanitario (AGV: Ácidos grasos volátiles; DQO: Demanda química de oxígeno).

4.5 Digestión de aguas residuales

En la depuración de aguas residuales mediante procesos anaerobios, es indispensable el desacoplamiento del crecimiento de las bacterias anaerobias, que tienen una tasa de reproducción hasta 5 días, del tiempo de retención hidráulica del reactor; ya que es la única forma de evitar la pérdida total del consorcio microbiano por la dilución constante. La digestión de aguas residuales con un tanque de hidrólisis para acidificación rápida, y un reactor con empaques (filtros

anaerobios), es decir, en dos etapas, es muy eficiente, ya que brinda una superficie apta para el crecimiento de los microorganismos, permitiendo así tiempos de retención hidráulica de hasta sólo 6 horas. Los reactores de tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* por sus siglas en inglés) retienen la biomasa en forma de gránulos a través de campanas de separación en la parte superior del reactor. La formación de dichos gránulos está sujeta al tipo de sustrato, el cual debe tener un bajo contenido de materia orgánica sedimentable. La principal condición de factibilidad para el uso de la digestión anaerobia como operación de tratamiento de aguas residuales es que la demanda química de oxígeno (COD, por sus siglas en inglés) sea mayor que 800 mg/L en el agua residual a tratar.

4.6 Operación de digestores

Para la operación de los digestores anaerobios se debe tener en mente que la degradación de la materia orgánica se lleva a cabo en pasos consecutivos por el consorcio microbiano donde un microorganismo depende de otro. Esto se debe a que subproductos generados por algún microorganismo son el sustrato para otro grupo de microorganismos, pero a su vez, podrían causar inhibición, cuando se presentan con concentraciones muy elevadas. Para llevar a cabo una operación correcta de los digestores, es importante cuidar los eslabones más débiles de la cadena, que son la acetogénesis y la metanogénesis cuyo estabilidad se evalúa con la concentración de los ácidos grasos volátiles y la concentración del dióxido de carbono en el biogás. Recientemente se desarrolló el método FOS/TAC, que permite evaluar el desempeño de un digestor de manera sencilla, eficiente y a un bajo costo, que determina por medio de titulación la relación entre el total de los ácidos grasos y la alcalinidad (Brambilla, 2011; Lili, 2011).

La determinación del dióxido de carbono en el biogás es también un procedimiento muy sencillo vía absorción en una solución alcalina. No es necesario contar con este equipamiento en una planta de biogás pero es muy recomendable porque un manejo inadecuado puede poner en peligro la estabilidad del digestor, lo cual tendría efectos negativos en la producción de biogás y se necesitaría de un periodo prolongado para la recuperación del equilibrio.

4.7 Mantenimiento y seguridad

El biodigestor se tiene que considerar como un equipo industrial que necesita de un mantenimiento periódico para garantizar una operación segura y planificada (considerar una bitácora).

El mantenimiento diario consiste en la revisión del exterior del digestor en busca de fugas, vaciado de las trampas de agua, funcionamiento de válvulas de alivio, y limpieza de pozos de alimentación y descarga para evitar el ingreso de sólidos sedimentables y formadores de natas.

Los digestores que no cuentan con un sistema de mezclado tienden a sedimentar las impurezas contenidas en el sustrato, por lo que requieren periódicamente del vaciado completo para retirar los lodos en el fondo. El ingreso de personal a los tanques de digestión es riesgoso por el peligro de asfixia, intoxicación, fuego y explosión, en particular aquellos tanques con acceso por la parte superior, ya que el dióxido de carbono se acumula en el fondo por tener una mayor densidad que el aire. Mientras que el rango de explosión del biogás es menor que el rango del gas natural, el rango de explosión para el hidrogeno es mucho más amplio y dado que el hidrogeno es un producto de degradación en la acidogénesis suele presentarse en altas concentraciones en los tanques de hidrólisis (TABLA 4.1). También es posible la formación de una mezcla explosiva aire-biogás al momento de bombear el contenido de un digestor en tanques y desplazar sólo parcialmente el aire, por lo que se deben extremar precauciones para estos casos.

	Biogás	Gas natural	Propano	Hidrógeno
Relación Densidad Gas / Densidad Aire	0.85 – 1.06	0.54	1.51	0.07
Temperatura de ignición [°C]	700	650	470	585
Velocidad máxima de la flama [m/s]	0.25	0.369	0.42	0.43
Rango explosivo [% de volumen]	6 - 22	4.4 – 15	1.7 – 11	4 - 77

Tabla 4.1. Características técnicas del biogás en comparación con otros gases.

No se debe subestimar la exposición al sulfuro de hidrógeno, que es perceptible para los seres humanos en una concentración de tan sólo 0.02 ppm y rápidamente satura el olfato, haciéndose imperceptible en exposiciones prolongadas. Las normas de seguridad en México (NOM-010-STPS-1999) establecen una concentración máxima permisible de 10 ppm para lugares de trabajo. En concentraciones mayores a 100 ppm existe peligro de muerte por exposición en algunas horas, mientras que concentraciones mayores de 1000 ppm son mortales en minutos e incluso segundos.

4.8 Eficiencia de los distintos procesos de operación

El bajo consumo energético del metabolismo indica una excelente eficiencia energética para la conversión de bioenergéticos a través la metanogénesis. Es también la razón de por qué el autocalentamiento del proceso biológico, como en el caso del compostaje, en los digestores anaerobios suceda muy raramente. Una excepción serían los rellenos sanitarios donde el calor liberado por el metabolismo puede ser retenido debido a la poca conductividad térmica y al gran volumen de los mismos. En la TABLA 4.2 se muestra el desempeño de diferentes tipos de biodigestores.

Con respecto a la biomasa, sólo la lignina puede no sufrir una degradación relevante y obstaculiza la actividad de las enzimas microbianas. Por tal razón, la materia lignocelulósica es degradada con una velocidad mucho menor que los monosacáridos o el almidón. Sólo los hongos en ambiente aerobio han desarrollado con la enzima peroxidasa una herramienta efectiva para la degradación de la lignina. Sin embargo, hay poco provecho energético en ese proceso, su importancia radica en facilitar el acceso a material biodegradable. Para estimar la biodigestibilidad de un material a partir del contenido de la lignina la ecuación de Chandler *et. al.*, (1980) puede ser aplicable:

$$\text{Fracción biodegradable de la pared celular} = 100 - 5.41 \cdot (C_{\text{Lignina de pared celular}})$$

La concentración de la lignina de la pared se deriva de la materia orgánica que es parte de la pared celular y se obtiene de la ecuación a continuación:

$$C_{\text{Lignina de pared celular}} = \left(\frac{C_{\text{lignina}}}{C_{\text{materia orgánica pared celular}} / 100} \right)$$

Los factores que caracterizan el desempeño de un biodigestor son la carga de materia orgánica diaria que recibe cada metro cúbico de la fase líquida del digestor ($B_R = m_{\text{ODM}} / V_{\text{Digestor}}$) y la retención hidráulica, que es la relación del volumen de la carga diaria entre el volumen de la fase líquida del digestor ($\text{HRT} = V_{\text{Materia Orgánica}} / V_{\text{Digestor}}$). En el caso de aguas residuales la carga de materia orgánica es expresada generalmente por medio de la demanda química de oxígeno, COD (chemical oxygen demand).

	Digestor estiercol (sin calentamiento)	Digestor estiercol (calentado a 36° C)	Digestor cofermentación (estiercol con pasto)	Agua residual derivada de una cervecera
Carga orgánica [kg _{ODM} /m ³ ·d]		1.0 - 3.0	1.3 - 4-1	6 -10
Retención hidráulica [d]	45 -90	20 -60	86 -140	0.5 - 1
Producción de biogás por unidad de volumen [m ³ _{Biogás} / (m ³ ·d)]	< 1	0.6 - 1.6	1.2 - 2	6.5 - 11

Tabla 4.2. Desempeño de diferentes tipos de biodigestores empleados para la conversión de biomasa y tratamiento de aguas residuales.

(Böhnke, 1993; Wellinger, 1991; Neumann, 2007).

Al balance de materia orgánica que entra y sale del digestor y su relación con el biogás que se genera, se le conoce como producción específica de biogás; para la cual, en la TABLA 2.1 se establecen datos de referencia para muchos tipos de biomasa.

Un análisis de desempeño de 438 plantas de biogás, operando en condiciones mesofílicas y termofílicas, para la digestión de residuos agrícolas y cultivos energéticos instaladas en Alemania determinó que el 96% de las plantas estudiadas alcanzaron valores de producción específica de biogás como los establecidos en la tabla 2.1. En promedio, el tiempo de retención hidráulica se estableció en 61 días con una carga orgánica de $4.26 \text{ kg}_{\text{ODM}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. El sustrato se constituyó con 38.8% de ensilado de maíz, 31.3% de estiércol de ganado de res, 13.8% de estiércol de porcino, 6.3% de ensilado de pasto y el 3,4% de ensilado de cereal, entre otros (Neumann, 2010).

El biogás producido puede ser aprovechado en el mismo sitio para la generación de energía eléctrica, ya sea para autoconsumo o para venta. La eficiencia eléctrica del motogenerador está en función de su potencia. Para generadores con una potencia menor a 150 kW la eficiencia eléctrica está por debajo del 35%, menor al 40% para una potencia de 500 kW y de 40% para motogeneradores con una potencia arriba de los 500 kW. El calor de los motores también puede ser aprovechado en un sistema de cogeneración con calentadores que condensen el agua de los gases de escape, lo que permite aumentar la eficiencia combinada hasta el 95%. El calor generado puede aprovecharse para el calentamiento de los digestores o para el secado de residuos, indispensable para el transporte de éstos últimos a grandes distancias. Sin embargo, en muchos casos, la energía térmica no es aprovechada.

La depuración de biogás a una calidad equivalente al gas natural, está sujeta a un consumo de energía de procesos que alcanza el 4% del contenido energético del biogás. Además se tiene que contemplar la pérdida de metano en los procesos de separación, que es menor del 2% (Urban *et al.*, 2009). Los beneficios radican en la mayor posibilidad de utilizar sistemas de cogeneración y en el abastecimiento al sector transporte. Estudios han demostrado que la eficiencia energética de la conversión de plantas como el *Miscanthus* o *Panicum virgatum*, a biogás, es de 13.1, con una relación de energía obtenida sobre el consumo de energía del proceso, incluyendo la producción del bioenergético; por lo que la eficiencia de la depuración del biogás es superior a la del bioetanol de segunda generación que sólo es de 11.5 (Insam *et al.*, 2010).

La FIGURA 4.6 muestra la integración de un biodigestor en una biorefinería. Mientras que la producción de bioetanol requiere como sustrato los carbohidratos del grano de centeno, la planta de biogás es alimentada con un sustrato lignocelulósico, residuos de fermentación de etanol y residuos de la producción de biodiesel. La biorefinería produce 200,000 toneladas de bioetanol, 250,000 toneladas de biodiesel y 25,000 toneladas de glicerina de grado farmacéutico y biogás equivalente a una energía de 250 GWh.

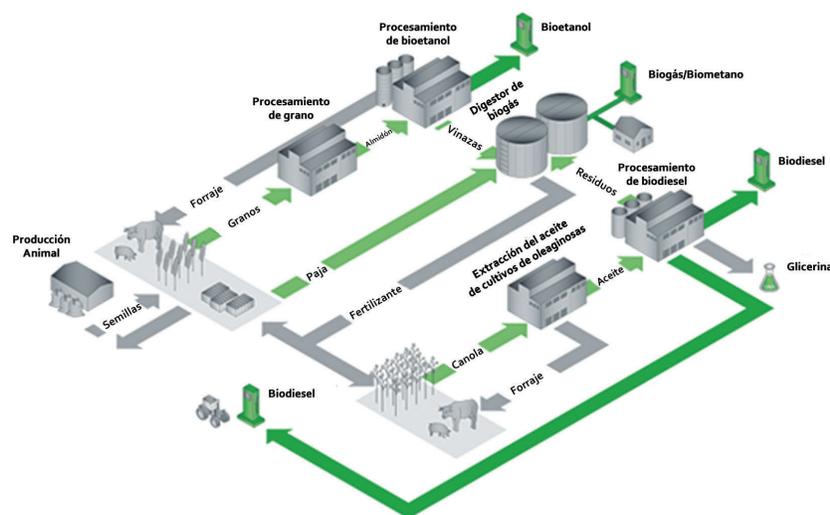


Figura 4.6. Estado del arte de una Biorefinería para la producción de bioetanol, biodiesel y biogás.

Bibliografía

- Böhnke, B.**, Bischofsberger, W., Seyfried C.F. (1993): Anaerobtechnik. Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm Edt.. B. Böhnke Berlin: Springer, 837 pp.
- Brambilla, M.**; Araldi, F.; Marchesi, M.; Bertazzoni, B.; Zagni, M.; Navarotto, P. (2012): Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. In: *Biomass and Bioenergy* 36, S. 439–446.
- Chandler, J.A.**; Jewell, W.J.; Gossett, J.M.; Van Soest P.J.; Robertson, J.B. (1980): Predicting methane fermentation biodegradability. *Biotechnology and Bioengineering Symposium* 10, S. 93–107
- FAL** (2005): Ergebnisse des Biogasmessprogrammes. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow. <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/suchergebnis/?cx=009520282834934443859%3A2c84bwnwsgk&cof=FORID%3A11&ie=UTF-8&q=biogasmessprogramm&siteurl=www.fnr.de%2F&ref=&ss=5356j2241794j18&sa.x=0&sa.y=0>, acceso 20.07.2012.
- Hamad, M.A.**; Abdel Dayem, A.M.; El Halwagi, M.M (1981 - 1983): Evaluation of the Performance of two Rural Biogas Units of Indian and Chinese Design. In: *Energy in Agriculture* 1, S. 235–250.
- Humer, M.H.**; Lechner P.: Design of a landfill cover layer to enhance methane oxidation; results from a two year field investigation. In: *Proceedings of Sardinia 2001- Eight International Waste Management and Landfill Symposium*. Leachate and Landfill Gas, Vol. II. Cagliari, S. 541–550.
- Insam, H.**; Franke-Whittle, I.; Goberna, M. (2010): *Microbes at Work. From Wastes to Resources*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- IPCC** (2008): *Climate change 2007. Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III and Synthesis report*. Cambridge: Cambridge University Press. <http://www.worldcat.org/oclc/226372525> acceso 20.07.2012.
- Lechner, P.** (2004): *Kommunale Abfallentsorgung*. Wien: Facultas.
- Lili, M.**; Biro, G.; Sulyok, E.; Petis, M.; Borbely, J. Tames Janos (2011): Novel Aproach on the Basis of FOS/TAC Method. *Analele Universităţii din Oradea, Fascicula Protecţia Mediului* 17 (713 - 717).
- NOM-010-STPS-1999**. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. DOF:1999.
- Neumann, H.** (2007): Jede zweite Biogasanlage hat Defizite. In: *Top Agrar* (10), S. Special Issue.
- Themelis, N. J.**; Ulloa, P. A. (2007): Methane generation in landfills. In: *Renewable Energy* 32 (7), S. 1243–1257.
- van Soest, P.J.**; Wine, R. H. (1967): Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. IV. Determination of Plant Cell Wall Constituents. In: *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 50 (50-55).
- Urban, W.**; Lohmann, H.; Girod, K. (2009): BMBF-Verbundprojekt Biogaseinspeisung. Edt. v. Fraunhofer-Institut fuer Umwelt-Sicherheits- und Energietechnik. Oberhausen. http://www.biogaseinspeisung.de/download/2008_UMSICHT_Technologien_und_Kosten_der_Biogasaufbereitung_und_Einspeisung_in_das_Erdgasnetz.pdf, acceso 02.06.2012.
- Wellinger, A.** (1991): *Biogas-Handbuch. Grundlagen - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. 2. Edition, Aarau, Wirz.

5. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Bernd Weber ^a



Figura 5.1. Generación de energía eléctrica a partir de biogás.
(Compañía Ain_Tech, España).

Mientras que biocombustibles como el bioetanol requieren un proceso de separación que en su caso es la destilación la cual se lleva a cabo con un consumo energético, el biogás es liberado a la fase gaseosa sin algún esfuerzo en el momento de formarse. Una gran ventaja es que en muchas ocasiones ya se puede aprovechar sin la necesidad de un proceso de depuración. No obstante, con los diferentes grados de depuración se ampliarán las posibles aplicaciones que son elegidas para obtener el mayor beneficio para cada proyecto específico. El hecho de que el biogás introducido a la red de gas natural se ha convertido en un producto comercial igual que otros biocombustibles renovables, ha inducido al mercado a actuar como un catalizador para incrementar el número de biodigestores, dependiendo de la demanda de energía renovable. Los siguientes subcapítulos darán una descripción breve de las características del biogás, las tecnologías de depuración y sus diferentes aplicaciones.

5.1 Poder calorífico y calidad del biogás como combustible

El poder calorífico del biogás es determinado por la fracción del metano, que puede variar entre 50% hasta 80%, siendo dióxido de carbono, gas inerte, el principal componente del gas restante; aunque es importante mencionar que se tienen compuestos traza en composiciones menores al 2%. Con una concentración de 40% de metano, el poder calorífico equivale a 14.3 MJ/m³, y puede alcanzar 28.6 MJ/m³ con una concentración de 80% de metano. El biogás, al salir del digestor, está saturado de vapor de agua, lo cual reduce el poder calorífico. Dependiendo de la temperatura del digestor, el contenido de vapor agua puede llegar hasta el 6%, por lo que el poder calorífico del biogás en el sitio es hasta un 15% menor que el valor determinado en laboratorio, refiriéndose al estado seco. Ver la TABLA 5.1 para comparaciones. Mientras que pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno sólo reducen el poder calorífico del biogás, otros compuestos traza, como el ácido sulfhídrico y los siloxanos, son particularmente dañinos para los sistemas de combustión, aún cuando estos últimos aparecen con una concentración muy baja, de pocas ppm, pueden causar daños severos en los motogeneradores debido a la transformación en silicatos abrasivos durante la incineración.

Se debe de mencionar que los siloxanos son compuestos traza encontrados principalmente en el biogás proveniente de rellenos sanitarios. Como los rellenos sanitarios son el eslabón final en el ciclo de vida de una gran variedad de productos, éstos contaminan el biogás con compuestos de menor concentración, como los clorofluorocarbonados (CFCs). Por ende, es indispensable considerar el análisis exhaustivo de la composición en proyectos de aprovechamiento de biogás en rellenos sanitarios.

^a Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Facultad de Ingeniería, Toluca, Estado de México.

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el biogás proveniente de rellenos sanitarios puede alcanzar hasta 8,000 ppm durante las diferentes etapas del ciclo de vida de un relleno sanitario (Deublein 2008). Difícilmente los digestores anaerobios llegan a tener concentraciones de H_2S mayores a 2000 ppm, ya que la solubilidad de este compuesto en la fase líquida inhibe fuertemente la metanogénesis (Böhnke 1993). Para evitar dicha inhibición, suelen agregarse sales de hierro que precipiten sulfuro ferroso (FeS) disminuyendo de esa manera la concentración de H_2S . Como eso sucede en la fase líquida del digestor, se le considera la primera etapa de desulfuración del biogás.

	Gas natural	Biogás (Digestor)	Biogás (Relleno sanitario)
Poder calorífico inferior [kWh/m ³], ([MJ/m ³])	9.3 - 10.8 (36.2)	5 - 7.5 (22.5)	4.5 - 5.5 (18)
Número de metano	70 - 94	124 - 150	136
Metano [m ³ CH ₄ /100 m ³]	84 - 98	45 - 75	45 - 55
Dióxido de metano [m ³ CO ₂ /100 m ³]	<2	25 - 55	25 - 30
Nitrógeno [m ³ N ₂ /100 m ³]	<10	<5	<25
Oxígeno [m ³ O ₂ /100 m ³]	<3	<2	<5
Requerimiento teórico de aire para combustión [m ³ Biogas/m ³]	9.5	6.6	6

Tabla 5.1. Comparación de parámetros técnicos entre el gas natural y el Biogás.
(Deublein 2008)

5.2 Uso en sitio

El uso del biogás directamente en el sitio de producción a una distancia generalmente menor de 100 metros es imprescindible debido a la falta de una red de distribución así como los requerimientos técnicos para poder introducirlo en dicha red. El transporte de biogás a distancias cercanas es impulsado por la misma presión del gas que se acumula en el digestor y contenedores de almacenamiento, la cual por lo general es superior a 20 mbar. Las tuberías son instaladas con cierta pendiente y tienen trampas de agua en los niveles más bajos para poder garantizar un flujo estable, además de ser una manera de remover parcialmente el contenido de agua del biogás derivado de un digestor mesofílico o termofílico que se acumula por condensación a bajas temperaturas.

5.2.1 Generación de calor

Utilizar el biogás en una estufa es su uso más básico. Únicamente es necesario ajustar las boquillas para obtener el mayor flujo posible de combustible. Los compuestos inertes propician la formación de una flama de gran tamaño a una temperatura menor a la de otros combustibles.

Al incinerar biogás con concentraciones de H_2S mayores a 150 ppm en una caldera, existe el peligro de corrosión de las paredes que están en contacto con los gases debido a la condensación de ácidos sulfurosos y sulfúricos, los cuales reducen considerablemente la temperatura de rocío (temperatura a la que inicia la condensación) de la mezcla. Por tal motivo, es necesario mantener una temperatura mínima en el agua del boiler y no dejar enfriar los escapes debajo de la temperatura de rocío si no se cuenta con superficies resistentes a la corrosión.

5.2.2 Generación de electricidad

La generación de electricidad con biogás puede llevarse a cabo con motores de combustión interna de tres diferentes tipos: cuatro tiempos (para motogeneradores pequeños de una capacidad $P_{el} < 100$ kW), motor operado encendido por compresión llamado Diesel (para motogeneradores grandes $P_{el} > 400$ kW), "ignition oil engine" (para motogeneradores de escala intermedia), turbinas de gas o celdas de combustible. Por tener el menor costo de inversión, los motores de

combustión interna que están arriba de 1000 USD/kWh son el sistema más aplicado para la generación de electricidad (LFU, 2012). Dichos motores son ajustados al menor poder calorífico del biogás y trabajan a aproximadamente a 1,500 revoluciones por minuto en el caso de motogeneradores grandes. Los motogeneradores de cuatro tiempos trabajan a revoluciones mayores, y por termodinámica tienen una eficiencia eléctrica menor. Los motores Diesel de tipo "ignition oil engine" requieren, como desventaja para su operación, la inyección del equivalente del 2 hasta el 10% del poder calorífico de biogás, que asegura la explosión de la mezcla en los cilindros. La ventaja es la eficiencia mayor en comparación con el motor de 4 tiempos. En sistemas de cogeneración, donde se aprovecha también la energía térmica, la eficiencia total es de alrededor de 85% y con sistemas de condensación de los escapes hasta el 95%.

Debido a las altas temperaturas de los gases de escape de un motogenerador, el peligro de corrosión por los condensados es menor. Es recomendable que la concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás se mantenga debajo de 150 ppm y de esta manera evitar la acidificación de los aceites de motor a fin de mantener periodos largos entre mantenimientos.

5.2.3 Depuración del biogás

El mayor problema de la utilización de biogás se debe a la presencia del sulfuro de hidrógeno, que cuando no se cuenta con un algún tratamiento biológico, supera, por lo general, los 200 ppm. La reducción de H_2S integrada en el mismo digestor, es efectuada por diversos procesos utilizando reacciones biológicas, químicas o efectos físicos, los cuales se describen brevemente a continuación:

Procesos biológicos

La desulfuración dentro del digestor es la más económica entre las opciones de proceso y da resultados satisfactorios para la utilización de biogás en el sitio. Los microorganismos oxidantes del sulfuro de hidrógeno colonizan las superficies encima de la fase líquida del digestor. El oxígeno necesario para esa reacción bioquímica se encuentra en una concentración del 1 al 3%, por lo que tiene que ser inyectado en forma de aire al digestor mediante un pequeño soplador. Además, es posible conducir el biogás enriquecido con oxígeno sobre un filtro de percolación fuera del digestor que permite el crecimiento de microorganismos oxidantes del H_2S . La eficiencia de remoción en el filtro de percolación es muy alta y permite formar en continuo los productos de la oxidación. Para eso, en un tanque previo a la bomba de recirculación se sedimenta el azufre y el sulfato, productos que pueden ser utilizados como fertilizantes.

Procesos químicos

Un proceso químico es aquel que remueve el H_2S mediante reacciones que ocurren entre este gas y materiales sólidos como los óxidos e hidróxidos de hierro y de zinc; lo mismo puede suceder con iones de hierro que se encuentran en solución en forma de complejos quelados. La regeneración de los sólidos utilizados en estos procesos por adsorción es limitada, mientras que el proceso en fase líquida llamado "Lo Cat Process" permite la regeneración, con azufre como producto (Merichem, 2012).

Procesos físicos

Los procesos de adsorción en carbono activado o zeolitas son muy comunes para aplicaciones a pequeña escala. Este proceso consta de una columna del adsorbente, la cual se satura con el H_2S y también de otros compuestos traza. Al momento de llegar al punto de saturación se puede regenerar el cartucho con un gas libre del contaminante (aire) a temperaturas elevadas o vacío, o intercambiarlo por uno nuevo, como es la práctica para plantas pequeñas.

5.3 Depuración de biogás al grado equivalente al gas natural

La razón para depurar el biogás a un grado de ser equivalente al gas natural es para poder introducirlo en una red de distribución de gas natural y así reemplazarlo. Para México existe potencial ya que la compañía de gas natural *Fenosa* cuenta actualmente con redes de distribución en el Distrito Federal, Aguascalientes, Guanajuato, Tamaulipas, San Luis Potosí y el Estado de México, cuya extensión es de más de 16000 km. Al biogás depurado con características equivalentes al gas natural se le denomina biometano.

Al utilizar el biogás en un sitio ajeno a la planta se obtiene la ventaja de poder utilizarse en un proceso de cogeneración, mientras que en la generación de energía eléctrica en el sitio no se suele aprovechar la energía térmica que disipan los motores. Además, actualmente se abren nuevos caminos para el biogás como el de poder almacenarlo por un periodo prolongado en el sistema de distribución o su utilización como combustible para transportes.

En Alemania existen aproximadamente 70 digestores en operación con sistemas de producción de biometano, así como el esfuerzo en las ciudades de Berlín y Munich, de llegar a una cobertura de biometano en el 100% de las gasolineras que ofrecen metano como combustible.

En la depuración del biogás, la remoción del dióxido de carbono es parte del tratamiento principal. Esto permite que el biogás alcance un poder calorífico de entre 36 y 43 MJ/kg. Para realizar esta remoción y la del sulfuro de hidrógeno se han establecido varios procesos, muchos de ellos son derivados del tratamiento del gas natural llamados "procesos de endulzamiento". En la actualidad, los procesos más comunes son la absorción con una solución acuosa o dietanolamina y la adsorción en materiales sólidos porosos.

Absorción en soluciones acuosas

Es muy común la operación de lavado del gas en una torre de absorción con una solución acuosa, en la cual la solubilidad del dióxido de carbono es 30 veces mayor que la del metano; debido a la polaridad del dióxido de carbono y su disociación en el agua. Esa característica se aprovecha para absorber el CO₂ en agua mientras que está en contacto en una columna de percolación a una presión de aproximadamente de 10 bar, dejando una concentración residual de CO₂ de 2 a 3%. Como parte del proceso, también es removido el H₂S. El líquido enriquecido en CO₂ es desorbido en una segunda columna con la ayuda de aire a presión atmosférica.

Absorción en soluciones químicas

La absorción de CO₂ es mayor en soluciones químicas, como la dietanolamina, que permite realizar el proceso a presión atmosférica y para la desorción es necesario elevar la temperatura del solvente. La concentración residual de CO₂ que se alcanza con este proceso es menor de 0.1%. Los diferentes absorbentes químicos tienen una diferente selectividad para el sulfuro de hidrógeno.

Procesos de adsorción

Es posible la adsorción física con carbón activado, zeolita y tamiz molecular en columnas que alternan etapas de adsorción y desorción. Aunque es posible de eliminar el CO₂ en su totalidad, las plantas trabajan con concentración residual del 2% de CO₂ para no generar costos de operación innecesarios.

Etapas final de la depuración

Adicionalmente, los sistemas de producción de biometano requieren secadores criogénicos, así como equipos de análisis trabajando en continuo para el control de calidad del biometano antes de que sea introducido a la red de distribución. Es necesario mencionar que los procesos de separación de los gases liberan metano a la atmósfera cuyo efecto invernadero es 25 veces mayor al de dióxido de carbono, y dependiendo del proceso empleado para la separación puede ser mayor al 2% del metano total. Sin embargo, el impacto ambiental que causa dicha emisión, es menor que el beneficio que es obtenido al reemplazar al gas natural (beneficio 5 veces mayor por la reducción del uso de combustibles fósiles) o el mayor aprovechamiento energético por la generación de electricidad en cogeneración (el beneficio es 2 veces mayor).

5.4 Hidrógeno

El hidrógeno no debe quedar fuera de las discusiones sobre futuros combustibles de transporte y a causa de la alta eficiencia de conversión en celdas de combustible es incluso uno de los favoritos y se espera una comercialización sin restricción de este tipo de dispositivos a partir del 2020. Sin embargo hay algunas compañías que tienen en su gama de vehículos modelos de combustión interna con hidrógeno. Técnicamente, no se ha encontrado una solución adecuada para el almacenamiento del combustible porque la aplicación de adsorción química en hidratos de metales queda re-

servado para el transporte en barco debido al alto peso de los tanques. Otras tecnologías de almacenamiento como en tanques de muy alta presión de 700 bares o en forma líquida se descalifican por no ser eficientes.

Respecto a la producción de hidrógeno, existen esfuerzos por extraer el hidrógeno que se presenta como intermedio en las etapas de la digestión anaerobia, antes de ser metabolizado por organismos metanogénicos, que aproximadamente constituye el 30% del total de metano producido en el biodigestor, el 70% restante se produce a partir del ácido acético. Las técnicas aplicables para fortalecer las comunidades hidrogenogénicas dentro del consorcio microbiano, y así incrementar la producción de hidrógeno, no han superado el nivel de plantas piloto.

Por otro lado se considera que la conversión biológica del dióxido de carbono e hidrógeno generado en celdas de electrólisis en metano tendrá un potencial de aplicación en el futuro. El dióxido de carbono para la conversión se derivaría de sistemas de captura en centrales termoeléctricas. Dicha estrategia sería una solución para almacenar energía eléctrica excedente en la producción inestable de plantas eólicas y solares. Su justificación está basada en la ventaja que representa la utilización de biometano en vez de gas natural en sitios donde ya existe una infraestructura de distribución, mientras que para el hidrógeno todavía no existen sistemas similares de distribución.

Cabe mencionar que los procesos biológicos mencionados estarán en competencia con procesos químicos eficientes y bien desarrollados, como son la reformación de vapor para la producción de hidrógeno a partir del metano y el proceso catalítico "Sabatier" para la reacción inversa.

Bibliografía

Böhnke (1993): Anaerobtechnik. Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm Edt.. B. Böhnke Berlin: Springer.

Deublein, D.; Steinhauser, A. (2008): Biogas from waste and renewable resources. An introduction. Weinheim, Germany, Wiley-VCH.

LFU (2012): Biogashandbuch Bayern. Materialienband. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg. <http://www.bayern.de/lfu>, acceso 15.05.2012.

Merichem (2012): LO-Cat Process. http://www.merichem.com/resources/case_studies/LO_CAT/Desulfurization.pdf, acceso 17.07.2012.

6. USO DE LOS RESIDUOS DE LA DIGESTIÓN

Bernd Weber ^a

Dentro del proceso de planeación de un digestor anaerobio es importante considerar el uso y destino que se le dará a los residuos de la digestión y un primer paso es el análisis sobre el manejo que se ha dado en el pasado a los mismos. Los residuos de la digestión, en comparación con los sustratos, tienen características más favorables, como el olor, consistencia, actividad biológica y contenido de nutrientes debido a la estabilización que se lleva a cabo. Bajo el concepto de estabilización se entiende un proceso en donde parte de la materia orgánica es mineralizada, principalmente en CO₂ bajo condiciones aerobias o en CO₂ y CH₄ (biogás), en procesos anaerobios, dejando fibras difícilmente digeribles, minerales y productos secundarios como residuos de digestión. Dichos productos secundarios son el amonio en los procesos anaerobios y compuestos húmicos derivados de la actividad aerobia.

Respecto a la contaminación microbiológica, como patógenos y de compuestos bioquímicos, generalmente se observa una disminución drástica durante la fermentación, mejorando así la calidad sanitaria del residuo y dando seguridad higiénica para usos posteriores. De hecho, hay una correlación entre la velocidad de remoción de contaminación microbiológica y la temperatura de digestión. Sin embargo, la materia orgánica contaminada, como los lodos derivados de plantas de tratamiento y residuos municipales requieren un manejo especial, debido a que la remoción no alcanza el cien por ciento, sobre todo en digestores de una sola etapa. Para esta clase de biomasa es recomendable realizar la digestión en condiciones termofílicas. Además, para residuos municipales es de importancia la separación antes de la recolección con el objetivo de obtener lotes más específicos.

Debido a la estabilidad microbiológica y madurez química del residuo orgánico, éste presenta características físicas, químicas y biológicas muy favorables, por lo que resulta un excelente fertilizante natural parecido a otros fertilizantes naturales del sector agropecuario. Dependiendo de la región y estrategias de comercialización lleva nombres como biofertilizante, acondicionador o bioabono para suelos degradados. A continuación se describen algunas características sobre los residuos de la digestión:

Olor

Mientras que la aplicación de estiércol sobre el suelo puede causar la liberación de olores persistentes debido a compuestos como fenoles, *p*-cresol, 4-etilfenol, indol, escatol, amoníaco y ácidos grasos volátiles, el material digerido contiene en alta concentración únicamente los últimos dos compuestos y gracias a su pH (buffer de carbonatos) los ácidos grasos volátiles y el amoníaco se encuentran disociados reduciendo así la tasa de evaporación (Wellniger, 1991). No obstante, se deben mantener las buenas prácticas de aplicación para una incorporación rápida del biofertilizante en el suelo.

Consistencia

La digestión transforma los sólidos suspendidos a un estado de granulometría más fino con mayor desintegración, que facilita la aplicación al suelo por medio de bombeo y su percolación natural en el mismo. Dicho efecto es reforzado por la agregación de agua previamente a la digestión. El contenido de sólidos del biofertilizante proveniente del digestor está en el rango de 2 al 8% y suele ser aplicado cerca del digestor para no generar costos excesivos de transporte. En caso de que sea inevitable transportar el biofertilizante a puntos lejanos, por ejemplo para su comercialización, es muy común que sea sometido previamente a un proceso de secado.

^a Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Facultad de Ingeniería, Toluca, Estado de México.



Figura 6.1. Uso de residuos de digestores anaerobios en agricultura.
(bitnavegante.blogspot.com)

Materia orgánica

La materia orgánica residual que retorna al campo como biofertilizante, residuo de la digestión del estiércol, es menor comparada con los procedimientos de utilizar estiércol sin tratamiento alguno, debido a la mineralización dentro del digestor. Dicha reducción podría reflejarse en una pérdida de la materia orgánica del suelo; sin embargo, investigaciones de productividad en campo no han mostrado una disminución de producción de los cultivos durante periodos de hasta 5 años (Wellniger, 1991).

Nitrógeno

Durante la digestión, el carbono es liberado a través del biogás, por lo que el biofertilizante tiene una relación C:N más baja, clasificándose así como un buen fertilizante orgánico. Al igual que el carbono, el nitrógeno orgánico es mineralizado a una tasa de 3% a 42%, lo que produce un aumento del contenido de amonio de 1 al 22%. A consecuencia de esto, el nitrógeno es más accesible para los cultivos y es recomendable aumentar la frecuencia de aplicación del biofertilizante para reducir las pérdidas de nitrógeno.

Otros nutrientes

Con excepción del azufre, que es mineralizado a sulfuro de hidrógeno y liberado como contaminante en el biogás, el resto de los nutrientes se encuentra en su totalidad en forma accesible para las plantas en el biofertilizante. Además, en algunos casos se suele agregar hierro en exceso para la inhibición de la formación del sulfuro de hidrógeno, lo que tiene por consecuencia también la inmovilización de los fosfatos. Esto también sucede en las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se agregan sales de hierro o de aluminio como coagulantes con el efecto secundario de que el fósforo en los lodos formados no es muy accesible para los cultivos (Römer, 2003).

Bibliografía

Römer, W. (2003): Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor bei verschiedenen Düngematerialien - insbesondere bei Klärschlamm. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (Edt.): Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Berlin, S. 31–39.

Wellniger, A. (1991): Biogas-Handbuch. Grundlagen - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. 2. Edition, Aarau, Witz.

7. DISTRIBUCIÓN EN EL PAÍS DE LAS FUENTES POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Liliana Pampillón González ^a y Miguel Torres Bernal ^b

El biogás es un recurso energético que constituye una opción hacia la transición energética, ya que puede ser empleado como combustible para generar electricidad, calor y/o energía mecánica a partir de una fuente renovable como lo son los cultivos energéticos, o bien a través de residuos agropecuarios, agroindustriales y municipales, entre otros. Por otra parte, desempeña un papel importante en la mitigación de gases de efecto invernadero. Como ya se mencionó con anterioridad, el biogás es una mezcla de varios gases, constituido en su mayoría por metano (CH₄). Éste último, posee un potencial de calentamiento 25 veces mayor al dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2007; Meinshausen, et al., 2009). Sin embargo, hay aproximadamente 200 veces más CO₂ que CH₄ en la Tierra, por lo que su efecto en la contribución de emisión de gases de efecto invernadero se hace relativo, más no deja de ser importante.

Dada la relevancia que tiene el conocer las regiones y estados en México donde existe la viabilidad física para la producción de biogás, se presentan en este capítulo la distribución de las fuentes potenciales para la producción del biogás a partir de unidades de producción ganadera (granjas porcícolas y establos lecheros), rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales.

El rol de estas unidades de producción es fundamental como sitios generadores del sustrato en la producción de biogás. Estas forman parte de las fuentes emisoras de metano provenientes de actividades antropogénicas, es decir, aquellas causadas por el hombre, al igual que los sistemas de gas natural, la minería del carbón, la fermentación de desechos ganaderos y los cultivos agrícolas. Este tipo de actividades están relacionadas con el 60% de las emisiones globales de metano (IPCC, 2007).

7.1 Sector Ganadero

En el sector agropecuario de México, la ganadería porcícola y bovina juega un papel importante no sólo en la producción de carne sino en la generación de excretas. La acumulación, el manejo inadecuado y la incorrecta disposición final de estos desechos ganaderos han provocado serios problemas ambientales relacionados con la contaminación del agua, suelo y aire. Desde hace unos años, se han propuesto diferentes tecnologías para el tratamiento de las excretas y producción de biogás, una de ellas, considerada como la más viable, es el uso de biodigestores (FIGURA 7.1).



Figura 7.1. Biodigestores en el sector agropecuario.

^a Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Programa Doctoral en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad.

^b Fideicomiso de Riesgo Compartido de la Secretaría de Agricultura, Pesca, Desarrollo Rural y Alimentación. Oficinas Técnicas.

Un biodigestor es un reactor para la degradación biológica, rápida y controlada de materia orgánica, de modo que como resultado de la actividad bacteriana se producen subproductos sólidos, líquidos y gases (biogás). Este último es comúnmente empleado como combustible debido a sus características físico-químicas. Las principales ventajas relacionadas con el empleo de biodigestores utilizando las excretas del sector ganadero son: la producción de energía limpia, el reciclado de desechos orgánicos, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de patógenos en las descargas (Holm-Nielsen *et al.*, 2009; Abbasi *et al.*, 2012; Massé *et al.*, 2011).

7.2 Granjas Porcícolas

En México, la población ganadera porcícola es de alrededor de 15.4 millones de cabezas (SIAP, 2010), la cual está distribuida en granjas formales e informales (TABLA 7.1). Generalmente, la producción de estos animales se desarrolla bajo tres esquemas: el tecnificado, el semitecnificado y el de traspatio.

TIPO DE UNIDAD PRODUCTIVA	Población Porcícola	Número de Granjas	Promedio de Cerdo por Predio
Granjas formales	8,364,363	5,713	1,461
Predios Traspacios	6,884,268	1,721,067	4
Total	15,230,631	1,726,780	1,465

Tabla 7.1 Tipo y unidades de producción porcícola.
(FIRCO, 2011)

Sería ideal aprovechar todas las excretas provenientes de este sector ganadero. No obstante, teniendo en cuenta que el aprovechamiento y la recolección de excretas es más regulado y sistematizado, cuando se da dentro de las llamadas "granjas formales", el potencial estimado para la producción de biogás es de 652 millones de m³ al año¹.

Dicho potencial corresponde a la cantidad de biogás que es posible generar a partir de las excretas de cerdos provenientes de granjas formales a través de un sistema de biodigestión en condiciones óptimas. Este valor contempla restricciones técnicas relativas a la disponibilidad de la biomasa, principalmente con la factibilidad de la recolección y el tipo de tecnología a emplear.

En base a lo anterior, la distribución de las fuentes potenciales de biogás en el sector porcícola de México se muestra en la FIGURA 7.2. Los Estados con mayor potencial para el aprovechamiento de éste son: Guanajuato, Jalisco, Puebla, Sonora, Veracruz y Yucatán.



Figura 7.2. Distribución de fuentes potenciales de biogás en el sector porcícola en México.

Es importante recalcar que este escenario sobre las fuentes potenciales de biogás está orientado al aprovechamiento de las excretas provenientes de las granjas porcícolas cuyas características permiten la instalación de un biodigestor (comúnmente tipo laguna), con el cual es posible la obtención de biogás. Se destacan aquellos Estados que presentan mejores condiciones tecnológicas respecto a otros, bajo un esquema general y prioritario. No obstante, la información no es absoluta y no se descarta la posibilidad de instalar sistemas de biodigestión anaerobias en otros Estados. Asimismo, se puede emplear otro tipo de biodigestor (ejemplo: biobolsa) cuando se trate de volúmenes que permitan una recolección menos sistematizada.

7.3 Sector ganadero bovino productor de leche

En base al último inventario nacional del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, la población de ganado productor de leche alcanzó las 2.34 millones de cabezas (SIAP, 2008). Los Estados que concentran la mayor participación en la producción de leche son Jalisco y Durango con el 77.8%. La Comarca Lagunera destaca como la principal zona de producción con alrededor de 472 mil cabezas de ganado bovino especializado en la producción del lácteo, equivalente al 21% del total nacional.

La importancia de este tipo de establecimientos (establos lecheros) radica en que cuentan con un nivel tecnológico especializado lo cual permite tener un sistema adecuado para el manejo de ganado, una producción constante de desechos y la recolección confinada de excretas. Alrededor del 51% de éstas unidades productivas poseen las características tecnológicas adecuadas para la producción de biogás a través de un biodigestor (FIGURA 7.3).

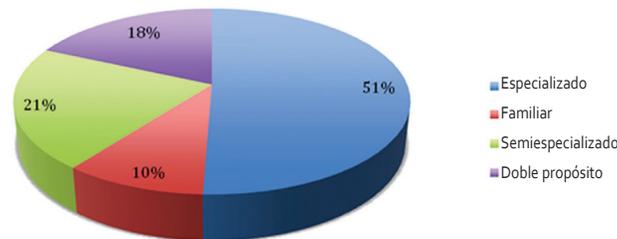


Figura 7.3. Tipos de sistemas de producción lechera.
(SAGARPA, 2008)

Considerando el número de cabezas existentes de ganado bovino para la producción de leche y el tipo de sistemas de producción con el que cuenta el establo (especializados y semiespecializados), el potencial estimado para la producción de biogás es de 1, 476 millones de m³ al año¹. La FIGURA 7.4 nos muestra la distribución de fuentes potenciales de biogás en el sector ganadero bovino productor de leche.



Figura 7.4. Distribución de fuentes potenciales de biogás en el sector ganadero bovino productor de leche en México.

¹ El cálculo para la producción de biogás y el escenario de reducción de emisiones se realizó de acuerdo a lo establecido por el IPCC considerando factores establecidos en el Capítulo 10 sobre "Emisiones en la ganadería y el manejo de estiércol", así como la metodología ACM0010 (ACBM).

Los Estados con mayor potencial para la producción de biogás son: Durango, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Chihuahua, Hidalgo y México. La región Norte de nuestro país, resaltando la región de la Comarca Lagunera, concentra establos lecheros cuyas características operativas permiten el aprovechamiento de excretas para la producción de biogás.

7.4 Rellenos Sanitarios

Diariamente son desechadas millones de toneladas de basura en todo el mundo. Más allá del terrible problema socio-ambiental que esto representa, es una pérdida de material, ya sea para la obtención de otros materiales o para el aprovechamiento de éstos en la producción de energía. La dependencia al uso de combustibles fósiles debe reorientarse, más cuando se desaprovechan los desechos sólidos urbanos, en cuyo contenido existe un alto porcentaje de materia orgánica. Ésta última es un ingrediente clave en los procesos de conversión biológica para la obtención del biogás y la producción de energía.

No obstante, emplear estos desechos o incorporarlos a un sistema no ocurre de manera directa, para ello es necesario un tratamiento. Una tecnología comúnmente usada para la correcta disposición final de estos desechos urbanos son los rellenos sanitarios. Éstos son una obra de infraestructura que involucra métodos de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial² con el fin de controlar, compactar y minimizar el impacto al medio ambiente (NOM-083-SEMARNAT-2004).

El correcto confinamiento y aprovechamiento de los desechos permite elevar la calidad de vida de la población, mitigar los impactos negativos al ambiente y contribuir a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Previendo el panorama futuro del sector energético mexicano, la búsqueda de formas de energías alternas tiene cada vez más empuje y esta siendo promovida por diversas instituciones. En este sentido, conocer la distribución en el país de las fuentes potenciales para la producción de biogás a partir de los rellenos sanitarios, será de gran utilidad para proponer proyectos que involucren la producción y el aprovechamiento de este recurso.

De acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Social, durante el 2010 se generaron en México 40,058 miles de toneladas de residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2011), de los cuales, más del 60% terminaron en rellenos sanitarios (FIGURA 7.5).

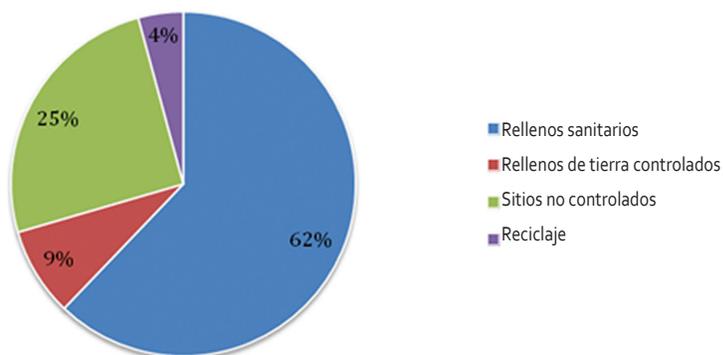


Figura 7.5. Disposición final de los residuos sólidos urbanos en México.
(SEDESOL, 2011)

En el año 2010, se contabilizó en el país la presencia de 186 rellenos sanitarios, en donde los Estados que cuentan con el mayor número de éstos son: Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla y Tamaulipas (SEMARNAT, 2011). Es de resaltar que el tamaño de la población en estas entidades federativas no está relacionada directamente con el número de proyectos desarrollados (rellenos sanitarios), a pesar de que la cantidad de residuos generados si está ligada a este factor.

El potencial teórico estimado para la producción de biogás³ a partir de los rellenos sanitarios es de 4, 982 millones de m³. Lo anterior, considerando la cantidad de desechos existente en los rellenos sanitarios, alrededor de 24, 910.4 miles

² De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003: Son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

³ El potencial teórico se determinó utilizando un factor de conversión de 200 m³ de biogás por tonelada de desecho (Boyle, 2004).

de toneladas. Un escenario acerca de cómo se encuentran distribuidos los rellenos sanitarios en el país como fuentes potenciales para la producción de biogás, se muestra la FIGURA 7.6.



Figura 7.6. Distribución de fuentes potenciales de biogás a partir de rellenos sanitarios en México.

Los Estados que presentan potencial teórico para poder mejorar la tecnología y aprovechar el biogás, están relacionados con el número de rellenos sanitarios existentes, la generación de basura que éstos presentan y la región donde están ubicados. La finalidad de estos sistemas deberá ir orientado hacia la recuperación del gas metano y el empleo para la generación de energía eléctrica.

Es importante mencionar que el valor de la producción de biogás puede variar dependiendo de la composición de los desechos. Estudios han demostrado que la composición de la basura en México varía dependiendo de la región, teniendo un efecto en el poder calorífico, el cual es mayor en los Estados del Centro como el Distrito Federal y México con un valor de 14.9 MJ/kg, a diferencia de los Estados del Sur que poseen valores de 12.7 MJ/kg (Arvizu, 2007). Otro punto importante es que el aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario se logra durante 10 años a partir del segundo año de operación.

7.5 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Dentro de las diferentes fuentes para la producción de biogás, también se encuentran las plantas de tratamiento de aguas residuales. De manera general, éstas son estructuras construidas para procesar el agua residual antes de ser descargada en algún cuerpo de agua, cumpliendo con la normatividad vigente. En estos sistemas se lleva a cabo la conversión biológica por acción de microorganismos y una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tiene por objeto eliminar los contaminantes del agua.

El proceso de digestión anaeróbica también está presente durante el tratamiento de aguas, generando biogás, el cual, dado su valor energético, puede emplearse como fuente de energía en motores o microturbinas dentro del mismo proceso. El tipo de tecnología para el tratamiento de aguas residuales es importante para la producción de biogás. Ejemplos de tecnologías en el tratamiento de aguas que generan biogás son las lagunas de estabilización y los lodos activados.

De acuerdo al inventario realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en México existen 2,816 plantas en operación formal con una capacidad instalada de 126.8 m³/s. Estas plantas procesan un caudal de 93.6 m³/s equivalente al 44.8% el total de aguas recolectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipal (CONAGUA, 2011).

De las plantas construidas destacan, por su capacidad instalada, las de: Rincón y San Francisco de los Romos, en Aguascalientes, de 200 y 150 l/s, respectivamente; Tijuana (La Morita), en Baja California de 254 l/s; Tecmán, en Colima, de 250 l/s; Pijijiapan, en Chiapas, de 60 l/s; Guanajuato Sur, en Guanajuato, de 100 l/s; Chilpancingo de los Bravo,

en Guerrero, de 250 l/s; Ameca, en Jalisco, de 150 l/s; Temixco (El Rayo), en Morelos, de 100 l/s; Tepic (Planta Oriente o Ciudad de la Salud), en Nayarit, de 100 l/s; San Juan del Río y San Pedro Mártir, en Querétaro, de 300 y 750 l/s, respectivamente; Ciudad Madero (Tierra Negra), en Tamaulipas, de 1500 l/s; Banderilla, en Veracruz, de 60 l/s y Mérida (Caucel), en Yucatán, de 60 l/s (CONAGUA, 2011).

El método más utilizado en el país para el tratamiento de aguas es el de lagunas de estabilización⁴, aplicado en 723 plantas, equivalentes al 33% del total de las mismas. Le sigue el de lodos activados que se aplica en 629 plantas, 28.8% del total. En tercer lugar figura el proceso de RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), que se utiliza en 137 plantas, que equivalen al 6.3% del total nacional.

En base al número de plantas de tratamiento en existencia y al tipo de tecnología más utilizada (lagunas de estabilización y lodos activados), se esquematiza los Estados en el país en donde el potencial de biogás se hace más notorio (FIGURA 7.7).



Figura 7.7. Distribución de fuentes potenciales para la producción de biogás provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales en México.

7.6 Observaciones Finales

El análisis de la distribución de las fuentes potenciales para la producción de biogás provenientes del sector ganadero, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento es compleja y está relacionada con otros factores (sociales, desarrollo científico, disponibilidad de la tecnología, etc.). Decir que estos resultados son concretos es inverosímil. Sin embargo, son un panorama preliminar que permite visualizar los nichos de oportunidad para la producción de biogás. Los desechos sólidos (altos en contenido de materia orgánica) no deberían ser considerados como un problema, sino como una oportunidad para la generación de una fuente renovable de energía y una medida efectiva para la mitigación de gases de efecto invernadero.

La promoción y difusión de las tecnologías para su aprovechamiento son necesarias para que la sociedad se involucre en el beneficio que tiene el aprovechar los desechos en la producción de energía y en la contribución a la disminución de la contaminación ambiental.

⁴ Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales; consiste en excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra.

Bibliografía

Abbasi S.A.; Tauseef S.M.; Abbasi T. (2012). "Anaerobic digestion for global warming control and energy generation-An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, March 2012, Pages 3228-3242.

ACBM. (Approved consolidated baseline methodology ACM0010). "Consolidated baseline methodology for GHG emissions reductions from manure management system" UNFCCC/CCNUCC. Recuperado por: <http://cdm.unfccc.int/goto/MPappmeth>

Arvizu Fernández J.L. (2007). "Potencial Eléctrico Regional de Fuentes de Biomasa en México". XXXI Semana Nacional de Energía Solar, ANES. Zacatecas, Zac.

Boyle G. et al. (2004). "Renewable Energy". Second edition. Nueva York: Oxford University Press.

CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). 2011. Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas. Descargado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Inventario%20nacional%20de%20plantas%20municipales%202009.pdf>

FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido). 2011. Recuperado de: <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Publicaciones/C2/diagnostico-nacional-de-biodigestores.pdf>

Handbook of Biogas. Agstar Program USA. Second edition. Recuperado de: <http://www.epa.gov/agstar/documents/intro.pdf>

Holm-Nielsen J.B.; Al Seadi T.; Oleskowics-Popiel P.; (2009). "The future of anaerobic digestion and biogas utilization". *Biore-sources Technology*, Volume 100, February 2009, Pages 5478-5484.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Climate change 2007: working group III: mitigation of climate change*. Paris: IPCC; 2007.

Massé D.I.; Talbot G.; Gilbert Y.; (2011). "On farm biogas production: A method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operation". *Animal Feed Science and Technology*, Volume 166, Pages 436-445.

Meinshausen M.; Meinshausen N.; Hare W.; Raper SCB.; Frieler K.; Knutti R.; Frame DJ.; Allen M.R. (2009). "Greenhouse gas emissions target for limiting global warming to 2°C". *Nature*, Volume 458, April 2009, Pages 1158-1163.

NOM-083-SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Expedida por el Diario Oficial de la Federación el 20 de Octubre de 2004.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2008) Descargado de <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia/estudio.htm>

SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). Presidencia de la República en su quinto informe de gobierno, 2011. Anexo estadístico México 2011.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Base de datos estadísticos 2011. Módulo de consulta temática. Dimensión ambiental, Residuos Sólidos Urbanos. Recuperado de: www.semarnat.gob.mx.

SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera) 2010. Recuperado de: http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaBasica/Pecuario/PoblacionGanadera/ProductoEspecie/porcino.pdf

8. USOS ACTUALES Y POTENCIALES DEL BIOGÁS EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL Y NACIONAL

Liliana Pampillón González ^a y Miguel Torres Bernal ^b

8.1 El biogás en el contexto nacional

El biogás en México como ya hemos visto es un bioenergético capaz de sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía. La Secretaría de Energía (SENER) considera que existe un potencial de 3000 MW para la generación de energía eléctrica a través de biogás proveniente de la recuperación y aprovechamiento del metano (SENER, 2010); éste último es producto de la descomposición de los residuos animales, residuos sólidos urbanos (RSU) y el tratamiento de aguas negras. Dado el valor calorífico del biogás, el cual es de 23 MJ/kg (Lombardi *et al.*, 2009) (TABLA 8.1) sus principales usos en México están relacionados con la generación de electricidad y calor.

Combustible	Valor Calorífico (CV) Aproximado	Factor de emisión indirecto (kgCO ₂ e/GJ, CV neto)
Petróleo	45.21 MJ/kg	12.51
Gas Natural	36 MJ/m ³	5.55
Gas Natural Licuado	55.14 MJ/kg	20.00
Keroseno	43.12 MJ/kg	13.34
Diesel	44.79 MJ/kg	13.13
Biogás	23 MJ/m ³	0.246 ^b

Tabla 8.1. Comparación de valores caloríficos para diferentes combustibles.

^b emisión directa CO₂, (factor de emisión, gCO₂e/kWh)
(MNRE, 2012; Hill, 2011).

Esto tiene gran sentido, puesto que se consigue una mayor eficiencia energética cuando se emplea biomasa para generar electricidad que cuando se convierte en combustible para el transporte. Por ejemplo se ha reportado, que 1 MJ de biomasa puede reemplazar alrededor de 0.95 MJ de combustible fósil en la producción de calor y electricidad, mientras que 1 MJ de biomasa puede reemplazar sólo alrededor de 0.35 a 0.45 MJ de petróleo crudo en el sector transporte (Edward *et al.*, 2008).

Al mismo tiempo, la emisión de gases de efecto invernadero del biogás son menores en comparación con otros combustibles. Investigaciones plantean que el biogás empleado como combustible en los vehículos produce 80% menos Óxido Nitroso (N₂O) que el diesel; además de menos emisiones de partículas (Energy Saving Trust, 2008).

En el sector ganadero mexicano el empleo del biogás para la producción de energía eléctrica no es la excepción. Usar excretas para producir biogás juega un rol pivote en la integración de las granjas ganaderas, reduciendo el riesgo a la salud, facilitando el control de la contaminación y al mismo tiempo añadiendo valor agregado a los subproductos (Preston *et al.*, 2007).

Los grandes volúmenes de excretas que diariamente se producen en las granjas porcícolas y establos ganaderos posibilitan que mediante los procesos de biodigestión anaerobia y producción de biogás, se genere calor y energía eléctrica.

En la actualidad, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) ha emprendido el desarrollo de proyectos para el aprovechamiento de biogás en el sector ganadero. Se han identificado en el país, alrededor de 966 sistemas de biodigestión beneficiados

^a Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Programa Doctoral en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad.

^b Fideicomiso de Riesgo Compartido de la Secretaría de Agricultura, Pesca, Desarrollo Rural y Alimentación. Oficinas Técnicas.

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN MÉXICO

por proyectos relacionados con la reducción de emisiones como los Project Design Document (PDD), proyectos bajo la iniciativa Metano a Mercados (M2M) para la comercialización de bonos de Carbono y los proyectos en el sector agropecuario apoyados por el FIRCO (TABLA 8.2).

Proyectos de Biodigestión Documentados				
México	Tipo de apoyo para el biodigestor			Total de sistemas
	PDD	FIRCO*	M2M	
TOTAL	563	399	4	966

Tabla 8.2. Número de biodigestores instalados en México.

*Instalados hasta Mayo el 2012
(*FIRCO [datos por publicar]; FIRCO, 2011)

El número biodigestores instalados en el país no es una cantidad suficiente para la población ganadera actual. Sin embargo, visualizando la necesidad de mejorar las condiciones ambientales, energéticas, productivas y económicas en el sector, la SAGARPA a través del FIRCO otorga apoyos económicos a unidades productivas para la instalación de sistemas de biodigestión, así como equipos para el aprovechamiento de biogás (motogeneradores). En los últimos 4 años se han duplicado el número de proyectos que tienen que ver con la instalación de estos sistemas ambientales.

De estas acciones emprendidas por el FIRCO durante el periodo 2008-2011, se estima una reducción de 679 mil Ton de CO₂ por los sistemas de biodigestión instalados; asimismo con la incorporación de sistemas integrales (biodigestor + motogenerador) se alcanzó la reducción de 1,989 Ton CO₂ y un desplazamiento de energía eléctrica de 3.70 GWh (FIRCO, 2011). Ésta generación de energía podría abastecer el consumo anual de alrededor de 10,000 viviendas de interés social, considerando un consumo promedio de éstas de 200 kWh/mensuales. La reducción total de emisiones en el periodo equivaldría a dejar de circular alrededor de 346,100 autos anualmente, considerando que cada auto en promedio recorre 20,000 km/año y estableciendo un factor de emisión por km recorrido de 100 gCO₂e (FIRCO, 2011). Esto corresponde a 2 Ton CO₂ por automóvil al año.

Ejemplo de unidades productivas en el sector ganadero las cuales aprovechan el biogás provenientes de sus desechos son las siguientes (TABLA 8.3).

Estado/Región	Razón Social	Tipo de unidad	Existencia animal (cabezas)	Generación de excretas (t/año)	Producción de Biogás (m ³ /año)	Consumo de energía (kWh/año)	Producción de energía (kWh/año)	% Reducción de emisiones
Yucatán	Grupo Porcícola Mexicano S.A. de C.V	Granja Porcina	32,483	115,315	2,538,389	52,072	255,528	14,027
Yucatán	Chan Rancho, S.P.R. de R.L. de C.V	Granja Porcina	10,058	35,706	785,984	93,552	87,873	4,334
Comarca Lagunera	Establo Chilchota S.A. de C.V	Establo lechero	2,000	7,100	401,500	1,082,176	691,891	367
Comarca Lagunera	La Torreña Agroindustrias S.A. de C.V.	Establo Lechero	650	2,307	36,500	810,032	615,014	327

Tabla 8.3. Algunas unidades productivas apoyadas por el FIRCO para el aprovechamiento del biogás (biodigestor + motogenerador).

(FIRCO, 2011)

La unidad productiva “La Torreña Agroindustrias S.A de C.V” la cual se encuentra ubicada en la Comarca Lagunera, recibió el apoyo de FIRCO en los años 2009 y 2010, para la construcción de un biodigestor y adquisición de un motogenerador. El costo total de proyecto fue de \$4,923,209.00, en donde el apoyo por FIRCO fue \$1,235,961 y la inversión del beneficiario fue de \$3,667,248. Si se visualiza el desplazamiento de energía de este proyecto por el motogenerador (615,014 kWh/año), se tendrían ahorros (considerando a 1.6 pesos/kWh) del orden de \$984,022.4 anuales. El periodo simple de recuperación sería de 3.7 años, sólo tomando en cuenta las aportaciones de los beneficiarios.

Otro ejemplo, es el sistema de biodigestión instalado en la granja “La Pilarcita” en Yucatán. El costo del proyecto (construcción del sistema de biodigestión) fue de \$1,200,000 pesos y del motogenerador \$250,000 pesos (aproximadamente). La población animal atendida es de 8,500 cerdos. La producción de biogás que se genera diariamente en este establecimiento es de 1,500 m³, lo que permite producir 120 kWh de electricidad. El 50% de esta energía es suficiente para abastecer a la granja. Además, genera 15 bonos de carbono al día, los cuales pueden ser vendidos en el mercado de carbono a otros países (15 euros por bono).

Como vemos, uno de los principales usos del biogás en este sector es el aprovechamiento de las excretas para la generación de energía eléctrica, que posteriormente puede ser interconectada a la red del servicio público (CFE), para su posible porteo¹ entre socios y/o autoconsumo del establecimiento. También se obtienen beneficios económicos cuando el proyecto está dedicado a la comercialización de “Bonos de Carbono”.

Otro de los casos de éxito sobre el aprovechamiento del biogás en México, se da en el sector de los desechos y en este sentido los rellenos sanitarios juegan un papel importante. El metano que se genera en éstos sitios de disposición final es el principal componente del biogás. Por lo que los rellenos sanitarios son considerados la fuente más grande de metano proveniente de actividades humanas (US, DoE., 2008).

El primer relleno sanitario instalado en México para el aprovechamiento de biogás se encuentra en Nuevo León (FIGURA 8.1). El Proyecto “Bioenergía”, involucró el establecimiento de un relleno sanitario, operado por la empresa SIMEPRODE en Salinas Victorias, Nuevo León. Dicho proyecto se basa principalmente en el aprovechamiento del biogás, producto de la descomposición de los desechos, para la generación de energía eléctrica, alrededor de 7 MW. El sistema está compuesto de 7 motogeneradores de 1 MW cada uno, instalados de manera modular para su posible expansión. Fue un proyecto que se llevó a cabo con donativos del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) y del Banco Mundial.



Figura 8.1. Relleno Sanitario, SIMEPRODE-Bioenergía en Nuevo León.

La energía generada se aprovecha para el alumbrado público (52% de la ciudad), el Metro, edificios públicos y el bombeo de agua potable en la zona metropolitana de Monterrey, así como para cubrir los requerimientos energéticos en las instalaciones de la propia empresa. Por otro lado, en cuanto a la reducción de emisiones de gases contaminantes, se estima que están en el orden de un millón de toneladas de CO₂ (SEDESOL, 2005).

¹ Porteo se refiere a llevar energía desde un punto de interconexión hasta un punto de carga.

Una tonelada de residuos sólidos urbanos puede generar hasta 223 m³ de biogás (SEDESOL, 2005b) y 1 m³ de biogás puede generar hasta seis horas de luz equivalente a un foco de 60 watts (SEDESOL, 2005).

Recientemente, otra fase del proyecto Bioenergía es la adquisición de "Bonos Verdes", los cuales serán producto de la compra de emisiones de Carbono, alrededor de un millón de toneladas de CO₂e, por parte del gobierno de Dinamarca a través de Danis Carbon Fund.

Finalmente, una futura aplicación del biogás en el país, será en celdas de combustible. Sin embargo, este tipo de tecnología aún está en desarrollo (Pérez *et al.*, 2008).

8.2 El biogás en el contexto internacional

A nivel mundial, el uso del biogás es variante, va desde emplearse como combustible para la cocina, calefacción, electricidad, combustible para los vehículos, hasta utilizarlo como el gas "principal" para ser procesado e introducido en gasoductos de gas natural (Defra, 2010; Dutta *et al.*, 1997; Energy Saving Trust, 2008; EREC, 2009; Guardian, 2008). Otros usos están relacionados con el empleo de éste para hacer metanol y ayudar a prolongar la conservación de frutas y granos por la inhibición del metabolismo de ciertos insectos, hongos y bacterias (Mae-Wan, 2008).

Las mayores aplicaciones del biogás se han dado en China, India y Europa. China es de los países pioneros en el uso del biogás. Este país perteneciente al continente Asiático desarrolló un programa que inició en los años setenta con un resultado de más de 7 millones de digestores, aunque sufrió de varias fallas (Boyle *et al.*, 2004) (FIGURA 8.2).

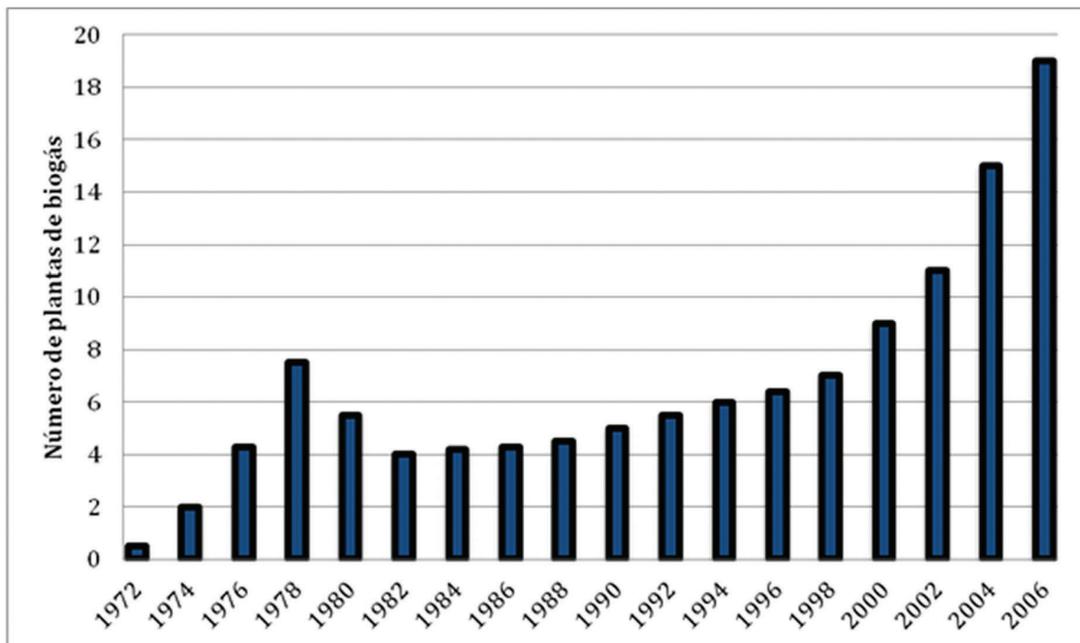


Figura 8.2. Expansión de la producción de biogás en China.

(Doublein *et al.*, 2008)

El desarrollo de la tecnología para el aprovechamiento del biogás en el mundo está ligado parcialmente con los países que más contribución tienen en cuanto a emisiones de metano (TABLA 8.4). Dicha tecnología tiene el potencial de contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Han *et al.*, 2008).

País	Kt de CO ₂ e*	% Mundial
China	1,333,098.1	18.7
India	583,977.6	8.2
Estados Unidos de América	548,073.7	7.7
Unión Europea	535,846.8	7.5
Brasil	492,160.7	6.9

Tabla 8.4. Países con mayores emisiones de metano en el mundo.

*Estas son emisiones provenientes de actividades antropogénicas como agricultura y producción industrial (IEA, 2012.)

Sin embargo, la producción de biogás a nivel mundial no tiene relación con los países que más emisiones de metano tienen. Los países europeos que tienen mayor producción de biogás son Gran Bretaña, Alemania, Francia, Italia, España y Dinamarca (FIGURA 8.3). Aunque se espera que para el 2015, la capacidad instalada de las plantas de biogás en Europa, llegue a 1,700 MW_{el}. (Ecoprog/Fraunhofer UMSICHT, 2010).

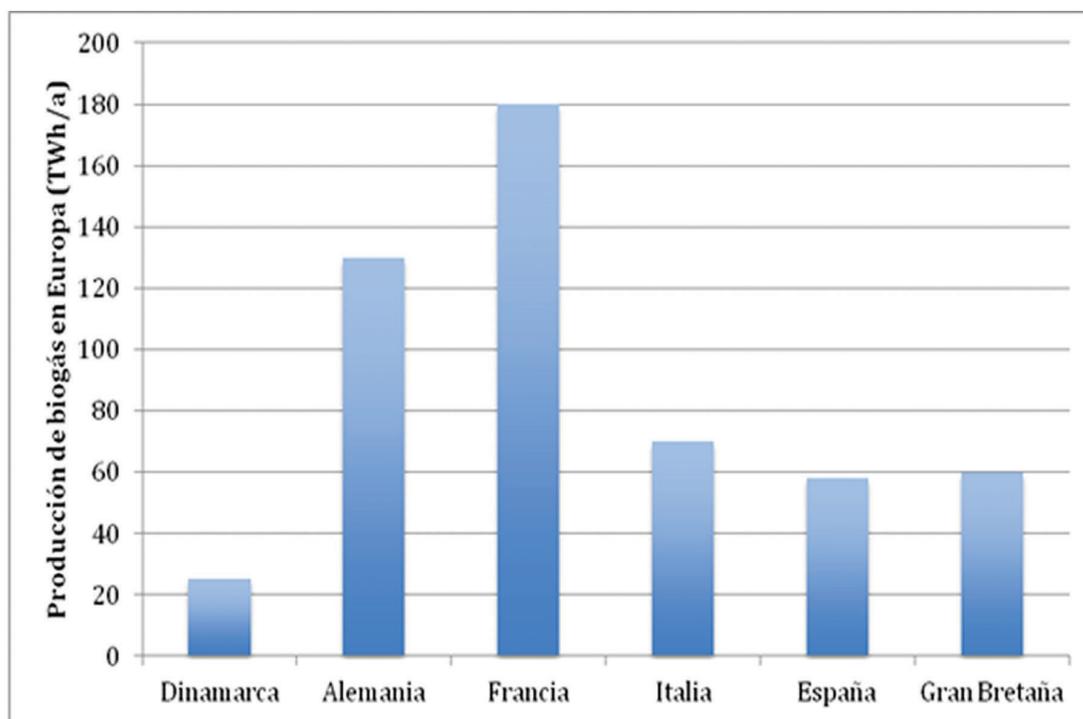


Figura 8.3. Producción de biogás en Europa (TWh/a).

(Deublein et al., 2008)

Alemania es actualmente, el líder en el despliegue de la tecnología en biogás. En la última década, el número de plantas incrementó de 370 en 1996 a 3891 en el 2008 (Poeschl et al., 2010) (FIGURA 8.4). Lo anterior se dio principalmente debido a la implementación del programa "Renewable Energy Sources Act".

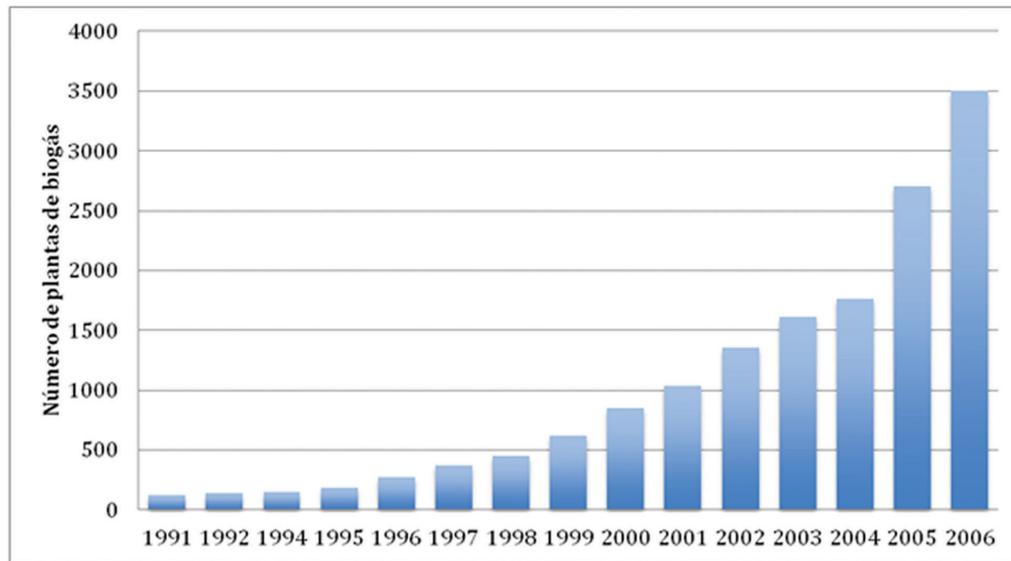


Figura 8.4. Expansión de la producción de biogás en Alemania.

(Deublein *et al.*, 2008)

Durante el 2008, las plantas de biogás en Alemania produjeron 10 TWh² de electricidad. Los principales usos están ligados a ciclos de calor y energía combinados y en la generación de electricidad que alimentan la red nacional (Faulstich *et al.*, 2010).

La producción teórica de biogás proveniente de gas residual y rellenos sanitarios disponible en Alemania es de 23-24 billones de m³. Con un potencial energético de 417 PJ por año. De los cuales los sistemas de biogás en el sector agrícola aportan el 77-85% (Kaltshmitt *et al.*, 2005). El potencial técnico nacional de los sistemas de biogás instalados en el mercado energético se estima en hasta un 18% de la potencia eléctrica instalada o el 20% en el consumo de gas natural (FvB, 2006).

Alemania cuenta con subsidios provenientes de incentivos que ayudan a expandir la utilización del biogás. Sin embargo, la inestable producción de materia prima, combinada con el decaimiento de las tarifas de alimentación han tenido implicaciones negativas.

Otro país líder en la producción de biogás es Italia. El potencial teórico estimado para la producción anual de biogás es de 2.2 Gm³/año (Lombardi *et al.*, 2009). Durante el 2005, el aprovechamiento del biogás representó el 8% de la producción de electricidad y el 21% de la energía térmica derivada de fuentes renovables de energía.

En Dinamarca, el sector agricultura es la principal fuente para la producción de biogás. Este país cuenta con 20 plantas centrales establecidas y más de 35 plantas a escala de granja (Raven *et al.*, 2007). La digestión anaerobia de los residuos orgánicos (estiércoles) es una práctica tecnológica bien constituida en este país.

Ahora bien, la situación en los países en desarrollo difiere uno de otro. En algunos países, la falta de desarrollo de programas de biogás es resultado de lo barato, el fácil acceso y disponibilidad de otros combustibles convencionales. En otros, la difusión y el desarrollo de proyectos de biogás fue planeada desde los noventa, tal es el caso de China. El éxito de la tecnología del biogás no sólo está en la generación de energía, sino también en los beneficios sociales y ecológicos, como el saneamiento, la no deforestación y la reducción a la importación de combustibles fósiles. (Ji-Quien *et al.*, 1996).

El uso del biogás en el sector agropecuario se ha extendido en países en desarrollo. La difusión y empleo de biodigestores ha sido promovido en varios países como Colombia, Etiopía, Tanzania, Vietnam, Camboya, China, Costa Rica, Bolivia, Perú, Ecuador, Argentina, Chile y México. Los mejores beneficios del aprovechamiento del biogás se obtienen

² TWh se refiere a 1000 GWh1.

cuando está ligado al tratamiento de los desechos en las granjas, aguas y basureros municipales, como parte de una estrategia integral del manejo de los desechos (Defra 2009; Gasworld 2010; Guardian, 2008; Taglia, 2010; Thames Water, 2009).

La producción de biogás en pequeña escala puede ayudar a resolver la escasez de energía en algunos países en desarrollo y del tercer mundo proveyendo una alternativa al uso de la madera y otros combustibles de biomasa. Este es un punto importante en áreas donde la deforestación es un problema. La producción de 10 m³ de biogás en un biodigestor, puede ahorrar 2000 kg de madera como combustible, la cual es equivalente a reforestar 0.26-4 ha (Mae-Wan, 2008).

Un país que vive esta situación es Ghana, en donde la mayor fuente de combustible proviene de la madera alrededor del 72%, junto con el aceite crudo y las hidroeléctricas. Este país tiene un potencial técnico para la construcción de 278,000 plantas de biogás, desafortunadamente sólo se han establecido un poco más de 100 plantas (Arthur *et al.*, 2011). Otro uso potencial del biogás en países en desarrollo como Ecuador está dirigido al reemplazo del consumo de GLP (Camilo *et al.*, 2010).

El lodo residual subproducto del biogás también es una fuente de macronutrientes para las plantaciones otorgando nitrógeno, potasio y fósforo, así como también micronutrientes y elementos traza (Mae-Wan 2008; Reddy *et al.*, 1995). Los sistemas de biogás conducen a la reducción de eutrofización y contaminación del aire (Lantz *et al.*, 2007). En general, el uso de biogás para la generación de energía eléctrica contribuye a la mitigación de emisiones de GEI en un rango del 30% al 90% en comparación con combustibles fósiles (80% carbón y 20% gas natural) (Schubert *et al.*, 2009). No obstante, la energía proveniente de fuentes renovables es apenas el 13% de la energía global, siendo la biomasa el mayor aportador de éstas con un 77% (Chum *et al.*, 2011). Se espera que uno de los principales usos del biogás en el mundo esté asociado al empleo de éste como combustible alternativo reemplazando al gas natural y al petróleo.

Bibliografía

- Arthur, R., Francisca Baido M., Antwi E. (2011). "Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study". *Renewable Energy* 36. Pages: 1510-1516
- Boyle, G. et al. (2004). "Renewable Energy". Second edition. Nueva York: Oxford University Press.
- Camilo C., Ann C. Wilkie. (2010). "Greenhouse gas emissions and biogas potential from livestock in Ecuador". *Energy for Sustainable Development* 14. 256-266.
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss Eng., Lucht, W., Mapako, M., Masera Cerutti, O., McIntyre, T., Minowa, T., Pingoud, K. (2011). "Bioenergy". In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation". Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Defra (2009). "Anaerobic digestión". Recuperado de: <http://www.defra.gov.uk/farm/evnornment/climate-change/anaerobic-workshop/0907.htm>
- Defra (2010). "Anaerobic digestion". Recuperado de: <http://www.biogas-info-co.uk/ind,ex.php/localgovernment>.
- Deublein D., Steinhäuser, A. (2008). "Biogas from waste and renewable resources, an introduction". Wiley-VCH Publishing House, London, UK.
- Dutta, S.; Rehman; Malhotra, P.; Venkata Ramana P. (1997). "Biogas: The indian NGO experience". New Delhi. Tata Energy Research Institute.
- Ecoprog/Fraunhofer UMSICHT. (2010). "The Market for Biogas Plants in Europe". Market volumes projects- strategies- trends.
- Edward, R., S. Szekeres, F. Neuwahl, V. Mahieu, and de Santi, G. (2008) "Biofuels in the European Context: Facts and Uncertainties". European Commission, Joint Research Centre, European Communities. Recuperado de: http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_biofuels_report.pdf.
- Energy Saving Trust (2008). Biogas. Recuperado de: <http://www.energysavingtrust.org.uk/fleet/technology/alternativefuels/biogas/>
- EREC (2009). "Renewable energy policy review. Sweden. Support for Biofuels". Recuperado de: www.erec.org/fileadmin/erec./SWEDEN_RES_Policy_Review_Final.pdf
- Faulstich, M, Greiff, K. (2010). "Biogas - a sustainable contribution to energy supply?" Result of a special survey of German Council of Environmental Advisors (SRU) In: 17th Annual Convention of German Biogas Association, Germany: Congress Centre, Nuremberg, Germany. Biogas Association; Pages 77-92

- FIRCO** (Fideicomiso de Riesgo Compartido). 2011. Recuperado de: <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Publicaciones/C2/diagnostico-nacional-de-biodigestores.pdf>
- FvB** (2006). Influences of efficiency in crop cultivation on discussion for biogas potential. German Biogas Association. Recuperado de: <http://www.biogas.org/>.
- Gasworld**. (2010). "Chesterfield biogas to supply UK's first biogas upgrade plant to Centrica". Recuperado de: <http://www.gasworld.com/news.php?a=4929>
- Guardian** (2008). "Digesting the problema". Recuperado de: <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/jul/30/biofuels.waste?>
- Han, J.L.; Mol, A.P.J., Yonglong, L., Zhang, L.** (2008). "Small scale fuel Wood Project in rural China: lessons to be learnt". Energy Policy. Volume 36. Pages. 2154-2162.
- Hill, N, Walker, H., Beevor, J., James, K.** (2011). "Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. London: Department for Environment". Food and Rural Affairs. Recuperado de: <http://www.defra.gov.uk/publications/files/pb13625-emission-factor-methodology-paper-110905.pdf>.
- IEA**. International Energy Agency. (2012). Statistics & Balances. Recuperado de: <http://www.iea.org/stats/index.asp>
- Ji-Quin, N.; Nyns, E.** (1996). "New concept for evaluation of biogas management in developing countries". Energy conversion and management (37). Pages 1525-1534
- Kaltshmitt, M. Scholwin, G. Hoffmann, F. Plattner, A. Kalies, M. Lulies, S.** (2005). "Analysis and evaluation of possibilities for biomass". Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. Recuperado de: <http://www.wupperinst.org/>.
- Lantz, M.; Mattias, S.; Björnsson, L.; Börjesson, L.** (2007). "The prospects for an expansion of biogas system in Sweden incentives, barriers and potentials". Energy Policy. Volume 35. Pages: 1830-1843
- Lombardi, M.; Tricase, C.** (2009). "State of art and projects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations". Renewable Energy. Volume 34. August 2009. Pages 477-485
- Mae-Wan, H.** (2008). "Biogas bonanza for third world development. Institute of Science in Society". Recuperado de: <http://www.i-sis.org.uk/BiogasBonanza.php>
- MNRE**. Ministry of New and Renewable Energy. (2012). Booklets on renewable energy. Recuperado de: <http://mnre.gov.in/re-booklets.htm>
- Pérez, M; Cuesta, M. J., Núñez, S., Cabrera, J.A.,** (2008). "Utilización de biogás en pilas de combustibles". CIEMAT. Pag. 68
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P.** (2010). "Prospect for expanded utilization of biogas in Germany". Renewable and Sustainable Energy Review. Volume 14. April 2010. Pages 1782-1797.
- Preston, T.R., Rodríguez, L.** (2007). "Biodigester installation manual". Recuperado de: <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGA/FRG/Recycle/biodigester>
- Raven, R.P.J.M., Gregerson, K. H.** (2007). "Biogas plants in Denmark: successes and setbacks". Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 11. Pages 116-132.
- Reddy, A. K. N., Rajapapaian, P.; Somasekhar, H.I.,** (1995). "Community biogas plant supply energy and water: The Pura village case study". In. J. Goldemberg & T.B. Johansson Eds. Energy as an instrument for socio-economic development. New York; United Nations Development Program. Pages: 80-88.
- Schubert, R., et al.** (2009). "Future Bioenergy and Sustainable Land Use". Earthscan.
- SEDESOL**. (Secretaría de Desarrollo Social). 2005. Metodología para el desarrollo de un proyecto de biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- SEDESOL**. (Secretaría de Desarrollo Social). 2005b. Modelo Mexicano de Biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- SENER**. Secretaría de Energía. (2010). Recuperado de: www.sener.gob.mx
- Taglia ,P.J.** (2010). "Emerging policy opportunities for the biogas sector. 5th Agstar National Conference". Recuperado de: <http://www.epa.gov/agstar/pdf/conf10/Taglia-BiogasAgSTAR.pdf>
- Thames Water**. (2009). "Poo power cuts Thames electricity bill by £15m". Recuperado de: <http://www.thameswater.co.uk/cps/rde/xchg/corp/hs.xsl/9849.htm>
- US DoE**. (2008). Landfill gas sequestration in Kansas. U.S. Department of Energy. Recuperado de: <http://www.netl.doe.gov/publications/factsheets/Project/Proj324.pdf>

9. POLÍTICAS NACIONALES PARA EL ESTÍMULO DEL USO DE TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Liliana Pampillón González ^a y Miguel Torres Bernal ^b

Las afectaciones del cambio climático provocadas por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero son evidentes a nivel mundial y por supuesto, en México. Esta situación ha motivado al establecimiento de políticas nacionales que promuevan acciones eficaces de mitigación y adaptación ante el cambio climático global. A fin de tener conocimiento de las políticas existentes en México para el estímulo de las tecnologías específicamente dirigidas a la producción de biogás, este capítulo aborda los principales instrumentos existentes.

Las políticas públicas en materia de cambio climático que se han promovido en México van dirigidas a la implementación de acciones concretas a través de los diferentes órdenes de gobierno para la mitigación y adaptación al cambio climático.

El Programa Nacional de Desarrollo 2007-2012, establecido por el presente gobierno federal, tiene como objeto “asegurar la sustentabilidad ambiental mediante la participación responsable de los mexicanos en el cuidado, la protección, la preservación y el aprovechamiento racional de la riqueza natural del país, logrando así afianzar el desarrollo económico y social sin comprometer el patrimonio natural y la calidad de vida de las generaciones futuras”.

En base a lo anterior, se estableció la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) para dar cumplimiento a los compromisos suscritos por México en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), junto con los demás instrumentos derivados con ellas, particularmente el protocolo de Kioto.

Dicha estrategia tiene como objetivo la identificación de las oportunidades para llevar a cabo acciones de mitigación y de adaptación ante el cambio climático. Dentro de sus propuestas está el realizar estudios necesarios para identificar la vulnerabilidad de sectores y áreas de competencia que permitan llevar a cabo proyectos para la mitigación y adaptación al cambio climático (en donde se incluyen los de producción de biogás).

En el marco de esta estrategia y en sinergia con otras dependencias, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Rural (SAGARPA) ha emprendido un Programa de Apoyo a los Agronegocios y Fuentes de Energía Renovable para dar cumplimiento a los compromisos que México firmó, derivados del Protocolo de Kioto. Las líneas de acción que tienen relación con la producción de biogás son:

- Disminución de la utilización de combustibles fósiles en la generación de energía, por sustitución parcial y progresiva por fuentes de energía renovable.
- Generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable para la interconexión a la red convencional.

Por otro lado, la agenda de transversalidad de las políticas públicas que la SEMARNAT establece con otras dependencias de la Administración Pública Federal busca desarrollar estas acciones en sus respectivos ámbitos de competencia.

En este sentido, el Programa Sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007-2012, reconoce la importancia de la sustentabilidad ambiental para el desarrollo del país. Por lo que se han articulado estrategias productivas para la promoción de proyectos con tendencia a la producción de bioenergéticos. Una de estas estrategias se encuentra establecida en el programa sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012.

^a Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Programa Doctoral en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad

^b Fideicomiso de Riesgo Compartido de la Secretaría de Agricultura, Pesca, Desarrollo Rural y Alimentación. Oficinas Técnicas.

9.1 Financiamiento para materias primas de la SAGARPA

El Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), actúa como agente técnico de la SAGARPA en la ejecución de programas en el sector agropecuario y pesquero, el objetivo es fomentar los agronegocios y el desarrollo rural por microcuencas. FIRCO ha incidido en la promoción y difusión de tecnologías basadas en fuentes renovables de energía, donde hacemos hincapié en el aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica empleando la tecnología de digestión anaerobia aunado a un equipo motogenerador.

Como ya se había comentado, el uso de sistemas de biodigestión se ha detonado debido a la problemática presentada en el subsector pecuario, en donde una fuente generadora de desechos sólidos lo constituyen las excretas. Dentro de las actividades que ha emprendido el FIRCO, se encuentra el proyecto de "Apoyo a proyectos de generación y aprovechamiento de biogás en explotaciones pecuarias" y otros programas como el de "Bioeconomía" donde se apoya entre otros componentes de energía renovable a los sistemas de biodigestión.

Uno de los principales objetivos de este proyecto es promover sistemas productivos sustentables, que reviertan el impacto ambiental de las explotaciones ganaderas y mitiguen la generación de gases de efecto invernadero, a través del aprovechamiento de los desechos orgánicos, para la producción de biogás que soporte la generación de energía térmica y eléctrica y en su caso la obtención de ingresos por la venta de certificados de reducción de emisiones.

El FIRCO promueve la inversión en el establecimiento y equipamiento de infraestructura para la obtención y utilización de biogás a partir de excretas ganaderas, en las unidades agropecuarias.

Para lo anterior se definen dos áreas de apoyo a la inversión:

- Motogeneradores de biogás; adquisición de equipo especializado para la generación de electricidad a través del biogás producido por el sistema de biodigestión.
- Sistemas independientes de biogás; estos proyectos no consideran la comercialización de bonos de carbono, sólo la generación de electricidad para cubrir las demandas energéticas dentro del agronegocio y resolver los problemas de contaminación.

Las características con las que deben contar las unidades productivas para el otorgamiento de apoyos directos, son: Granjas porcinas mayores a 300 vientres (equivalentes a 3000 animales) o establos mayores a 500 cabezas; en ambos casos, deberán ser sistemas de producción en confinamiento o semitecnificados. La unidad de producción debe contar con los sistemas adecuados de recolección de excretas para ser dispuestas en un biodigestor y con una laguna de oxidación. En caso de que se considere la instalación de un motogenerador, los consumos de energía eléctrica de esta unidad deben sustentar técnicamente el sistema.

La aportación directa consiste en montos máximos de apoyo de hasta \$1,000,000.00 MXN por proyecto, sin que éste rebase un 50% de la inversión total (TABLA 9.1).

Concepto de apoyo	Montos máximos de apoyo
Sistema de biodigestión (biogás)	El menor entre 50% del costo del sistema o \$1,000,000.00/100 M.N.
Motogenerador	El menor entre 50% del costo o \$500,000.00/100 M.N.

Tabla 9.1. Montos de apoyo para financiamiento de proyectos de biodigestión.
(FIRCO, 2011)

- Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA). Constituido por el gobierno federal en el banco de México. El objetivo es otorgar crédito, garantías, capacitación, asistencia técnica y transferencia de tecnología, a los sectores agropecuario, rural y pesquero del país. Opera como banca de segundo piso, con patrimonio propio y coloca sus recursos a través de Bancos y otros Intermediarios Financieros.

El enfoque de FIRA es impulsar el financiamiento de proyectos sostenibles a través de un modelo de negocio, el cual incluye: la promoción y financiamiento a proyectos sostenibles, el apoyo en gestión de riesgo y transacciones, incrementar el acceso a mercados de carbono y la información y capacitación.

Dentro de las actividades de FIRA está la identificación y categorización de las principales fuentes de emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero. Es importante mencionar que FIRA no maneja procesos de manufactura, ni equipos industriales que operen mediante combustión. La medición y las iniciativas para reducir emisiones de GEI son voluntarias.

9.2 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

Los proyectos MDL son una alternativa para atender la problemática ambiental en cuanto a la generación de desechos; este mecanismo, el cual es supervisado por la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático (CMNUCC) permite a los países desarrollados del anexo I que han ratificado el protocolo para la reducción de emisiones, tener una participación en la compra de reducciones de emisiones (comercialización de Certificado de Reducción de Emisiones) de proyectos realizados por los países en desarrollo (Lokey, 2009). La aprobación de los proyectos realizados en México, desde la perspectiva de país huésped, la realiza el Comité de Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI) que funge como autoridad nacional designada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, y es uno de los grupo de trabajo del Comité Intersecretarial de Cambio Climático (CICC).

Como el biogás se constituye principalmente de metano y dióxido de carbono, que son los gases de efecto invernadero más importantes, resulta evidente considerar proyectos que contemplen la disminución de éstos. Ejemplo de éstos son las unidades pecuarias (granjas porcícolas, establos lecheros), rellenos sanitarios, plantas de tratamiento, etc. Para la realización de este tipo de proyectos se requieren distintas gestiones ante las autoridades municipales, estatales y federales. En este sentido, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONAE), en colaboración con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), ponen a disposición una Guía de gestiones para implementar en México plantas de generación eléctrica que utilicen energías renovables.

9.3 Otros apoyos: Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía

Este fondo cuenta con un comité técnico integrado por representantes de las Secretarías de Energía, de Hacienda y Crédito Público, de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Comisión Federal de Electricidad, de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, del Instituto Mexicano del Petróleo, del Instituto de Investigaciones Eléctricas y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

El propósito es potenciar el financiamiento disponible para la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables. Para ello se contará con un Fondo para el otorgamiento de crédito u otro tipo de apoyos financieros para los proyectos que promuevan la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables.

9.4 Incentivos

- Deducción de impuestos en energía renovable al 100% para la inversión en maquinaria y equipo generador proveniente de fuentes renovables. (Art. 40, ISR). Siempre que se encuentre en operación durante un período mínimo de 5 años.
- Estímulos fiscales en proyectos de generación de energía renovable (Art. 219 ISR).

Se otorga un estímulo mediante un crédito fiscal equivalente al 30% de los gastos e inversiones realizados. Se podrá aplicar la diferencia que resulte contra el impuesto causado en los diez ejercicios siguientes hasta agotarlo.

La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (PDB, 2008) tiene como finalidad la de contribuir a la diversificación energética y el desarrollo sustentable del campo mexicano y establece las bases para promover la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país. Impulsa la producción, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida para la población; en particular las de alta y muy alta marginalidad. Promueve el desarrollo regional y el de las comunidades rurales menos favorecidas. Procura la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero

La Ley General de Cambio Climático (LGCC, 2012) busca garantizar el derecho a un ambiente sano y regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Busca promover políticas e incentivos para reducir las emisiones de dióxido de carbono y el uso de combustibles de origen fósil y para impulsar las energías renovables. Establece además el compromiso de reducir paulatinamente la emisión de gases de efecto invernadero y sancionar a las empresas contaminantes. Lo anterior es muy importante para la generación de biogás por tener en el país un sector rural que, sobre todo en el sector ganadero, es emisor de contaminaciones por gases de invernadero a través de la generación de metano, lo que brinda un área de oportunidad para reducir la contaminación ambiental y utilizar un recurso energético que presenta características de sostenibilidad desde el punto de vista ecológico, económico y social. En general, éstas políticas y estímulos para el uso de tecnologías que permitan el aprovechamiento del biogás, brindan un apoyo elemental para cumplir con las metas que adquirió México en la reducción de Gases de Efecto Invernadero y que se encuentran enmarcadas en el Programa Especial de Cambio Climático. No obstante, hace falta fomentar la paridad de los costos de producción con la de los combustibles fósiles. Dos acciones que serían útiles para estimular la utilización de biogás son: implementar impuestos sobre la emisión de CO₂ de los combustibles y la aplicación de certificados verdes o subsidios a los establecimientos que generen energía basada en fuentes renovables.

Bibliografía

FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido). 2011. Recuperado de: <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Publicaciones/C2/diagnostico-nacional-de-biodigestores.pdf>

ISR (Ley de Impuesto sobre la Renta). Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/82.pdf>

LAERFTE. Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía y el Financiamiento de la Transición Energética. Última reforma 12 de Enero de 2012. DOF. Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAERFTE.pdf>

LGCC. Ley General de Cambio Climático. Texto vigente a partir del 10 de octubre de 2012. Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>

LPDB. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. 1 de Febrero de 2008. Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>

Lokey E. (2009). "The status and future of methane destruction projects in Mexico". *Renewable Energy*. Volume 34. Páginas: 566-569.

SENER (2006). *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable de México*, México.

LISTA DE UNIDADES

a	Año	kWh	Kilovatio hora
bar	Unidad de presión equivalente a 10 ⁵ N/m ²	kWh/m ³	Energía liberada en 10 ³ vatios hora durante la incineración de un m ³ de biogás
°C	Unidad de la temperatura en grados Celsius	L	Litro
d	Día	m	Metro
GW	Gigavatio= 10 ⁹ vatios	m ³	Metro cúbico
GWh	Gigavatio hora	m ³ /kg _{DM}	Producción específica de biogás en metros cúbicos por kilogramo de sustrato alimentado al digestor
Gm ³	Giga metros cúbicos = 10 ⁹ metros cúbicos	m ³ Biogás/(m ³ -d)	Producción específica de biogás que se genera un metro cúbico de la fase líquida del digestor durante un día
h	Hora		
ha	Hectárea		
kg	Kilogramo = 10 ³ gramos		
kW	Kilovatio = 10 ³ vatios		

m^3CH_4/m^3 Biogás	Concentración de metano en el biogás seco expresada en %	MW	Megavatio = 10^6 vatios
mg/L	Concentración de algún compuesto en miligramos por litro	MWel	Megavatio eléctrico
MJ	Megajoules = 10^6 joules	MWh	Megavatio hora
MJ/m ³	Megajoules metro cúbico= Energía liberada en 10^6 joules durante la incineración de un metro cúbico de biogás	MXN	Pesos mexicanos
mm	Milímetro = 10^{-3} metros	PJ	Petajulio = 10^{15} julios
mmol	Milésimas de mol para expresar la cantidad de una sustancia	Ppm	Partes volumétricas por millón
Mm ³	Millón de metros cúbicos	s	Segundo
		t	Tonelada = 10^6 gramos
		TWh	Teravatio hora = 10^{12} vatios hora
		USD/kWel	Costo específico de motogeneradores en dólares estadounidenses por 10^3 vatios capacidad eléctrica

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACBM	Approved Consolidated Baseline Methodology ACM0010	HRT	Hydraulic retention time – tiempo de retención hidráulica
AcetilCoA	Acetil coenzima A	IEA	Agencia Internacional de Energía
AGV	Ácidos Grasos Volátiles	IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
BR	Carga diaria de materia orgánica que recibe el digestor en $kgDM/(m^3 \cdot d)$ o $kgCOD/(m^3 \cdot d)$	IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
c	Concentración de un compuesto en %, kg/kg ó mg/L	ISR	Impuesto Sobre la Renta
CH ₃ OH	Metanol	LAFREFTE	Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía y el Financiamiento de la Transición Energética
CH ₃ COOH	Ácido acético	Lo Cat Process	Proceso comercial para la remoción del sulfuro de hidrógeno
(CH ₃) ₂ S	Dimetil sulfuro	M2M	Iniciativa Metano a Mercados
CH ₃ -NH ₂	Metilamina	MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
(CH ₃) ₂ -NH	Dimetilamina	MNR	Ministry of New and Renewable Rnergy
(CH ₃) ₃ -N	Trimetilamina	MW	Molar Weight – Masa molecular de un compuesto
CH ₃ NH ₃ Cl	Cloruro de metilamonio	N	Contenido de nitrógeno en % o en $kg \text{ nitrógeno}/kg \text{ materia seca}$
CH ₄	Metano	N ₂ O	Oxido nitroso
CFE	Comisión Federal de Electricidad	NaOH	Hidróxido de sodio
CICC	Comité Intersecretarial del Cambio Climático	NADH	Coenzima nicotinamida adenin dinucleótido en forma reducida
CINVESTAV	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN	NAD ⁺	Coenzima nicotinamida adenin dinucleótido en forma oxidada
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático	O ₂	Oxígeno
CO	Monóxido de carbono	oDM	Organic Dry Matter – materia orgánica seca de un material en $kg \text{ materia orgánica seca} / kg \text{ materia seca}$ o en % equivalente a $(kg \text{ materia orgánica seca} / 100 kg \text{ materia seca})$
CO ₂	Dióxido de carbono	OHPA	Obligate Hydrogen Producing Acetogens
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente	PDD	Project Design Document
COD	Chemical Oxygen Demand – demanda química de oxígeno en mg/L	PECC	Programa Especial de Cambio Climático
COMEGEI	Comité de Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero	<i>Pel</i>	Potencia eléctrica de un motogenerador en kW
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	pH	Medida de la acidez o alcalinidad de una solución
CONAE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía	PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
DM	Dry Matter – materia seca de un material en $kg \text{ materia seca} / kg \text{ materia fresca}$ o en % equivalente a $(kg \text{ materia seca} / 100 kg \text{ materia fresca})$	RAC	Residuos agrícolas de cosechas
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático	RAFA	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	RSU	Residuos sólidos urbanos
FCKW	Colorofluorocarbonados	Sabatier	Proceso catalítico para la conversión de H ₂ y CO ₂ en H ₂ O y CH ₄
Fenosa	Compañía de distribución de gas natural en México	SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura	SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido	SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
FM	Fresh Matter – masa de la materia en el estado húmedo	SENER	Secretaría de Energía
FeS	Sulfuro ferroso	SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
FOS/TAC	Relación molar entre la concentración de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad del lodo de digestión	SIMEPRODE	Sistema Integral Ecológico para el Aprovechamiento y Procesamiento de Desechos
GEI	Gases de efecto invernadero	UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket – Reactor anaerobio con retención de biomasa granular
H+	Protón		
H, H ₂	Hidrógeno		
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno		



Red Mexicana de Bioenergía, A.C.

¿Quiénes somos?

REMBIO es una organización no gubernamental sin fines de lucro que impulsa el uso sustentable y eficiente de la biomasa con fines energéticos en México.

Se creó en Morelia, Michoacán, en el año 2006. Actualmente incluye a los principales expertos en bioenergía de México y tiene socios en la mayoría de los estados del país.

MISIÓN

Ser líderes en México en la promoción del uso social, económica y ambientalmente sustentable de la biomasa con fines energéticos, mediante la generación y difusión de información calificada, formación de recursos humanos, intercambio de experiencias y fortalecimiento de nexos entre los principales actores sociales interesados en el tema.

OBJETIVOS

- **Impulsar el uso integral de la bioenergía** como medio para lograr un desarrollo sustentable
- **Aportar alternativas** que propicien el uso eficiente de los bioenergéticos, generen empleo e ingresos a nivel local y potencien el desarrollo tecnológico del país
- **Promover** la investigación, desarrollo tecnológico, capacitación y formación de recursos humanos en el área
- **Difundir información** actualizada y de calidad sobre investigación, desarrollo y aplicaciones de la bioenergía
- **Colaborar en el diseño de políticas públicas** sobre bioenergía a nivel federal, estatal y municipal



VENTAJAS DE SER SOCIO

- Acceso a información estratégica del sector: contenido integro de ponencias, estudios y bases de datos
- Oportunidades de colaboración en proyectos
- Contactos con expertos del sector y grupos de discusión
- Visibilidad para los socios
- Logo y vínculo a página WEB para socios corporativos
- Difusión de las actividades, perfil y trayectoria de los socios
- Suscripción gratuita al boletín mensual REMBIO
- Descuento en la Reunión Nacional, en cursos que organice la REMBIO y en publicaciones
- Estudiantes: contacto con investigadores para tesis

Nuestras actividades

- Publicación de documentos y estudios
- Difusión de información actualizada sobre bioenergía
- Desarrollo de estudios estratégicos en las áreas de interés de la REMBIO
- Asesoría especializada para gestión de proyectos y estudios de factibilidad
- Análisis y evaluación de políticas públicas
- Participación en foros, congresos y seminarios
- Organización de cursos y seminarios, incluyendo una Reunión Nacional anual
- Ejecución de proyectos

MESA DIRECTIVA REMBIO 2011-2013

Dr. Iram Mondaca Fernández
PRESIDENTE
Dra. Georgina Sandoval Fabián
SECRETARIA GENERAL
Ing. Julián Vega Gregg
TESORERO



EN ESTE VOLUMEN:

El biogás es una fuente de energía renovable que al ser aprovechada reduce las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, apoyando las estrategias nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático. En este cuaderno la REMBIO busca brindar una referencia sucinta y actualizada sobre las tecnologías para la producción de biogás, así como las políticas públicas de estímulos para el aprovechamiento de esta fuente de energía, sus perspectivas de desarrollo en México y los retos y oportunidades que presenta en términos de sustentabilidad.

LA COLECCIÓN CUADERNOS TEMÁTICOS SOBRE BIOENERGÍA

Busca poner al alcance de lectores especializados en el área de bioenergía y del público en general, materiales novedosos, de calidad y de alta relevancia sobre los aspectos prácticos, metodológicos, económicos, de política pública y de investigación ligados con las distintas aplicaciones de la bioenergía en México.

OTROS CUADERNOS TEMÁTICOS



La bioenergía es una fuente energética versátil, renovable y estratégica para promover la transición hacia un patrón de desarrollo más sustentable en nuestro país. Con este CT la REMBIO busca brindar una referencia informada, sintética y actualizada sobre la diversidad de alternativas que ofrece el aprovechamiento de esta fuente de energía, sus perspectivas de desarrollo en México y sus retos y oportunidades en términos de sustentabilidad.



Este cuaderno –el primero de una serie específica sobre estudios de caso– presenta experiencias que ilustran desde temáticas, escalas y metodologías de implementación contrastantes el desarrollo práctico de la bioenergía en México. Se incluyen aplicaciones para la producción y recuperación de biogás, desarrollo y difusión de estufas de leña, fabricación de hornos mejorados de carbón vegetal, producción de biodiesel, y una experiencia pedagógica.



En este cuaderno se analizan críticamente los llamados biocombustibles avanzados como posibles alternativas para aprovechar de manera integral los residuos y materias primas no alimenticias para mitigar las emisiones de GEI y así reducir el consumo de combustibles fósiles en el sector transporte.



Se presenta una revisión actualizada de lo que está ocurriendo tanto a nivel internacional como en nuestro país en el campo de estufas eficientes de leña. Se examina de manera general los avances tecnológicos, los impactos documentados de la nueva generación de estufas, así como las características de los programas de difusión que garantizan una mayor adopción en impacto a largo plazo de las estufas de leña.



Consulte nuestro sitio WEB para obtener más detalles sobre los títulos de esta colección y sus contenidos.

www.rembio.org.mx

