



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ciencias Biológicas
"Estudio en la Duda. Acción en la Fe"



Bio

gas

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS: FUNDAMENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

LILIANA PAMPILLÓN GONZÁLEZ
LUIS FERNANDO CISNEROS MORALES
GASPAR LÓPEZ OCAÑA

Biogas

Biogas

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS:
FUNDAMENTOS Y PARÁMETROS
DE DISEÑO**

LILIANA PAMPILLÓN GONZÁLEZ
LUIS FERNANDO CISNEROS MORALES
GASPAR LÓPEZ OCAÑA



DIRECTORIO

DR. JOSÉ MANUEL PIÑA GUTIÉRREZ

Rector

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ

Secretaría de Servicios Académicos

M.A. RUBICEL CRUZ ROMERO

Secretario de Servicios Administrativos

M. EN C. RAÚL GUZMÁN LEÓN

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

M. EN C. ROSA MARTHA PADRÓN LÓPEZ

Directora

M EN C. ANDRÉS ARTURO GRANADOS BERBER

Coordinador de Docencia

DR. RAÚL GERMÁN BAUTISTA MARGULIS

Coordinador de Investigación y Posgrado

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	8
SOBRE LOS AUTORES	9
1. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE LOS PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA	14
¿Qué es la Biomasa?	
Procesos de conversión de la biomasa	
Procesos de combustión directa	
Procesos termoquímicos	
Procesos bioquímicos	
2. DIGESTIÓN ANAEROBIA: PRINCIPIOS Y REACTORES	20
Digestión anaerobia	
Etapas de la digestión anaerobia	
Principales factores en la producción de biogás	
Tipos de biodigestores	
3. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	26
Consideraciones para el diseño y planeación de un sistema de producción de biogás	
Uso del biodigestor	
Tipo de biomasa	
Características físicas de la unidad	
Diagrama de un sistema de biodigestión	

4. INSTALACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	31
Proceso constructivo de un sistema de biodigestión	
Obra civil	
Instalación de geomembranas	
Equipos y obras complementarias (válvulas, quemador, filtros)	
Sistema de extracción y agitación de sólidos	
Acondicionamiento y medición del biogás	
Especificaciones técnicas	
5. APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS: AGUAS RESIDUALES	36
Aprovechamiento de las aguas residuales	
Composición física y microbiológica	
Marco legal para aguas residuales	
Usos potenciales de las aguas residuales	
	42
6. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	
Aprovechamiento del biogás para la generación de energía	
Características técnicas de motogeneradores y turbinas	
Interconexión a la red eléctrica	
Comercialización de emisiones	
7. APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES DE UN BIODIGESTOR	45
Aprovechamiento de los lodos	
Caracterización física y química	
Tratamientos físicos y biológicos	
Experiencias en el aprovechamiento de los lodos residuales	

8. CONTROL Y MONITOREO DE UN SISTEMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS **50**

Verificación del estado físico de los componentes
Sistema de control y monitoreo (pruebas de operación)
Detección de fugas
Producción de biogás y generación de energía
Determinación de la calidad de las aguas residuales
Medidas de prevención y seguridad.

REFERENCIAS **52**
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

Primera edición, 2019

D. R. © Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura

Col. Magisterial, C. P. 86040

Villahermosa, Centro, Tabasco.

www.ujat.mx

ISBN: 978-607-606-520-4

El contenido de la presente obra es responsabilidad exclusiva de los autores. Queda prohibida su reproducción total sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito del titular, en términos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Se autoriza su reproducción parcial siempre y cuando se cite a la fuente.

Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos, por un Comité Científico Interinstitucional que contó con el apoyo de evaluadores de diferentes Instituciones y dependencias públicas, así como por el Consejo Divisional Editorial de la División Académica de Ciencias Biológicas de la UJAT. Las denominaciones empleadas y la forma en que aparecen presentadas los datos que contiene no implican, de parte de la UJAT, juicio alguno sobre la delimitación de fronteras o límites y la mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la UJAT los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan. Aunque la UJAT fomenta la reproducción y difusión parcial o total del material contenido, queda prohibida su reproducción total sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito del titular, términos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Su uso para fines no comerciales se autorizará de forma gratuita previa solicitud. La reproducción para la reventa u otros fines comerciales, incluidos fines educativos, podría estar sujeta a pago de derecho o tarifas.

Apoyo editorial: Calíope Bastar Dorantes
José Manuel Vázquez Broca
Corrección de estilo: Francisco Cubas Jiménez
Diseño editorial y portada: Hugo Cabrera Valerio

Hecho en Villahermosa, Tabasco, México.

PRESENTACIÓN

El presente documento “*Producción de Biogás: fundamentos y parámetros de diseño*”, es una guía para el estudiante, resultado del bagaje de experiencias recogidas a lo largo de la trayectoria de los autores. Por una parte, posee un gran componente de base científica y académica, que va complementado con elementos prácticos de las lecciones aprendidas por los diversos proyectos desarrollados para el sector agropecuario en el componente de bioenergía por agencias gubernamentales.

Particularmente, el tema central del presente manual toma relevancia dada la problemática mundial relacionada con el manejo, el tratamiento y la disposición final inadecuada de los residuos orgánicos, aunado a la caída en las reservas de petróleo y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que, la implementación de fuentes alternas de energía, como lo son los sistemas de producción de biogás, se convierte en una estrategia interesante dada la necesidad desde el punto de vista social, ambiental, energético y económico en la gestión de los residuos y la generación de energía alternativa.

Bajo esta premisa, el lector tiene en sus manos un documento guía sobre el diseño, la instalación y el seguimiento de los sistemas de producción de biogás (comúnmente llamados, biodigestores), a través de un recorrido general por los fundamentos y los requerimientos técnicos necesarios para su desarrollo e implementación.

El manual está integrado por ocho bloques, los dos primeros sobre fundamentos básicos de la biomasa, procesos de conversión, digestión anaerobia y reactores. El bloque tres y cuatro se enfoca en el proceso de diseño, dimensionamiento e

instalación de sistemas de biodigestión. Consecuentemente, los últimos tres bloques abordan tópicos relacionados con el aprovechamiento de los subproductos: aguas residuales, biogás y lodos.

Finalmente, un elemento importante es el control y el monitoreo de los sistemas de biodigestión, temas que constituyen el último bloque de este manual. Esperamos que a través del desarrollo y la lectura de los temas propuestos se brinden las herramientas fundamentales para la comprensión y fomento de este tipo de tecnología.

Recordemos que, en un sentido amplio, los biodigestores pueden representar un papel clave para promover la diversificación de la matriz energética y encaminar el tránsito hacia un desarrollo sustentable a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos y la generación de productos de valor agregado, como el biogás, principalmente.

Atentamente: Los autores.

MAYO 2018

SOBRE LOS AUTORES

SEMBLANZA

LILIANA PAMPILLÓN GONZÁLEZ

Profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (*UJAT*), con estudios de doctorado y maestría por parte del *CINVESTAV* y egresada de ingeniera ambiental de la *UJAT*. Sus investigaciones se han desarrollado en el área de Sustentabilidad Energética, las cuales contemplan proyectos transdisciplinarios relacionados a la planeación, desarrollo y seguimiento de tecnologías basadas en fuentes renovables de energía. Funge como experto técnico en la tecnología de biodigestores acreditada por la *EMA* (Entidad Mexicana de Acreditación). Ha dirigido y colaborado en proyectos sobre el tratamiento biológico y fisicoquímico de residuos, la estimación de potenciales energéticos, la evaluación de tecnologías, así como la determinación de emisiones de gases de efecto invernadero proveniente del sector ganadero. Ha brindado asesoría externa al Fideicomiso de Riesgo Compartido (*FIRCO*) en proyectos financiados por el Banco Mundial y la *SAGARPA*. Ha presentado diversos trabajos en congresos internacionales y nacionales, autora de artículos en el ámbito científico y de divulgación. Forma parte del Sistema Estatal de Investigadores del Estado (*SEI*) y es candidata del Sistema Nacional de Investigadores (*SNi*).

LUIS FERNANDO CISNEROS MORALES

Actualmente es consultor e integra el equipo de implementación técnica de la Secretaría de Energía (*SENER*), dentro del proyecto “Desarrollo de Tecnologías de Energía Sustentable”, ejecutado en conjunto con el Banco Mundial. El objetivo de este proyecto es buscar apoyar la comercialización de tecnologías innovadoras en energía limpia a nivel nacional. Es ingeniero ambiental egresado del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con una amplia y reconocida trayectoria en el tema de energías renovables. Se ha desempeñado en diversos cargos dentro del sector gobierno, en particular, durante ocho años en el Fideicomiso de Riesgo Compartido, oficinas centrales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Colaboró en el desarrollo de las especificaciones técnicas para la construcción de biodigestores en el sector agropecuario y ha participado en la capacitación técnico-académica dirigida a productores y especialistas en el ámbito de las tecnologías energéticas.

GASPAR LÓPEZ OCAÑA

Es Ingeniero Ambiental, Maestro en Ingeniería y Protección Ambiental, con Especialidad en Sistemas de Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales y Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Ha incursionado en líneas de investigación y proyectos sobre: contaminación de suelo, modelación ambiental, restauración de suelos impactados por hidrocarburos, evaluación de impactos, riesgos y daños ambientales, restauración ecológica, monitoreo de calidad del aire, calidad del agua en sistemas lóticos y lénticos, diseño de sistemas de tratamientos de aguas residuales, disposición y tratamiento térmico de residuos sólidos, legislación y gestión ambiental. Es responsable-colaborador en proyectos de carácter ambiental. Brinda servicios profesionales en industrias, empresas y sector gubernamental, orientadas hacia el tratamiento de aguas residuales, potabilización, impacto ambiental y gestión de *RSU*. Actualmente es Profesor Investigador Tiempo Completo Titular A de la División de Ciencias Biológicas de la *UJAT*, desarrollando su línea de generación y aplicación de conocimientos en Tecnología del Agua. También es responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, además, es evaluador de proyectos y árbitro internacional en revistas indizadas.

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS:
FUNDAMENTOS Y PARÁMETROS
DE DISEÑO

1

FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE LOS PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA

Alcance: El presente bloque persigue brindar al alumno los conocimientos básicos sobre los procesos o tecnologías existentes para la conversión de los residuos orgánicos (biomasa) a productos energéticos.

Se busca promover en el alumno una competencia genérica como lo es la capacidad de aprender a través de preguntas empleando la herramienta SQA (¿Qué sé?, ¿qué quiero saber? y ¿qué aprendí?)

Temas a desarrollar:

- ¿Qué es la biomasa?
- Procesos de conversión de la biomasa
- Procesos de combustión directa
- Procesos termoquímicos
- Procesos bioquímicos

16

¿Qué es la biomasa?

Todos hemos escuchado hablar alguna vez de la biomasa. El concepto hace referencia a toda materia orgánica susceptible de ser aprovechada para producir energía. Sin embargo, el rol que representa va más allá de la producción de energía.

El término biomasa se refiere a todos esos residuos indeseables para la mayor parte de la sociedad, producto de la transformación de la materia. Ejemplo de esta son los residuos remanentes de cosechas, de podas, de animales, de las casas habitación, de industrias, etc. Todos aquellos materiales orgánicos que desechamos continuamente como producto de nuestras actividades cotidianas.

Desde el punto de vista ambiental, la biomasa puede tener un papel prioritario en zonas urbanas a través del aprovechamiento de la “basura” que generan estas grandes urbes y que por su disposición final inadecuada contribuyen al deterioro del ambiente. Lo anterior, puede propiciar el desarrollo de éstas zonas.

En zonas rurales, constituye un vector energético básico a través del empleo de la madera en forma de leña, como lo demuestran diversos estudios (Tauro *et al.*, 2018). En general, se considera un recurso imprescindible para el desarrollo socioeconómico de las sociedades.

Sin embargo, la disponibilidad de este recurso varía de región a región, de acuerdo a las condiciones climáticas, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población y las actividades productivas, lo que hace más complejo la elección de la tecnología para su procesamiento.

Procesos de conversión de la biomasa

De manera general, para producir energía a través de la biomasa, primero hay que transportarla, transformarla y finalmente transferirla. Las tecnologías existentes para el procesamiento de la biomasa incluyen desde procesos artesanales como la producción de carbón vegetal, como comúnmente observamos con los hornos enterrados, hasta procesos más industrializados como la cogeneración. Los procesos pueden ser de combustión directa, termoquímicos o bioquímicos.

- Los procesos de combustión directa involucran la oxidación de la materia, es decir la “quemada” o ignición del material orgánico en una atmósfera de aire con oxígeno suficiente para reaccionar con el combustible.
- Los procesos termoquímicos tienen como eje medular la temperatura y la presencia o ausencia de un gas gasificante. Dependiendo de estas variables, el proceso puede ocurrir. Por ejemplo, si el sustrato a transformar está en presencia de un gas como oxígeno, vapor de agua o hidrógeno la producción de un combustible se lleva a cabo a través de la gasificación. Si por el contrario, la degradación del material ocurre en ausencia de oxígeno bajo condiciones de presión y temperatura controladas, entonces el proceso se denomina pirólisis (Deublein y Stein Hauser, 2008).
- Finalmente, los procesos bioquímicos a diferencia de los termoquímicos, logran la generación de energía a través de la transformación biológica de los compuestos orgánicos, esto a través de la fermentación anaeróbica de la biomasa (Banks *et al.*, 2007).

Transformar la biomasa a productos con un mayor valor energético, densidad y valor calorífico es uno de los objetivos de procesos de conversión. Dependiendo de estos es posible generar calor, electricidad o algún combustible (Figura 1).



18

Figura 1. Procesos de conversión de la biomasa
Fuente: Tomado de la presentación "Estrategias para la conversión de la biomasa en energía" de Salazar, Oriana (2010).

La combustión directa es el proceso más aplicado a nivel mundial para el aprovechamiento del recurso biomásico como la madera. Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido de humedad y alto en compuestos lignocelulósicos, tales como la madera, paja, bagazo, residuos agrícolas y cáscaras en general (Manuales sobre energía renovable: Biomasa, PNUD. (2002)

El uso final de la energía, calor o el combustible puede emplearse para alimentar motores de combustión, turbinas de gas, hornos, calderas, estufas domésticas, entre otros. La factibilidad técnica y económica de cada proceso deberá considerar ciertos parámetros y condiciones que dependen de la etapa en la cadena de transformación de la biomasa en que se encuentre (Figura 2).

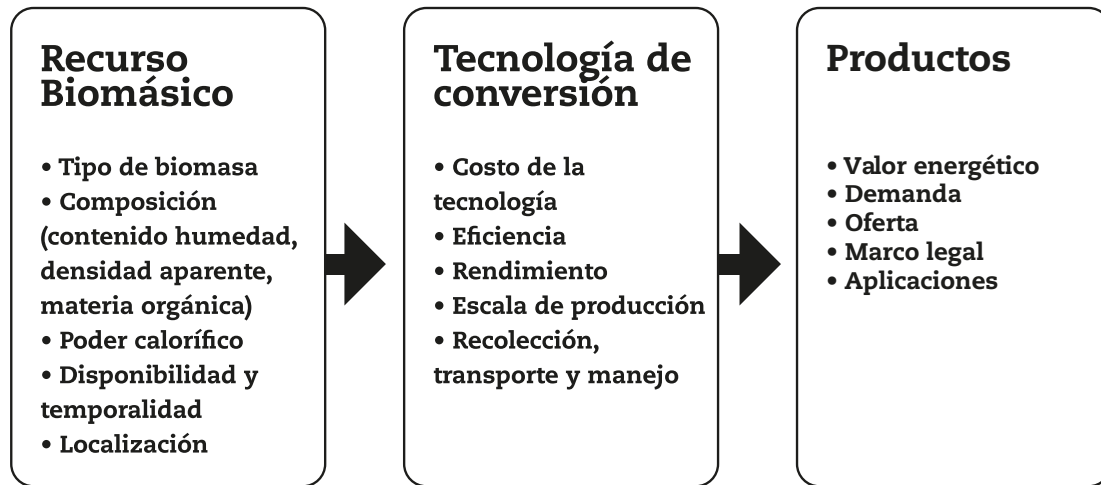


Figura 2. Cadena de transformación de la biomasa
Fuente: elaboración con datos del PNUD, (2010)

2

DIGESTIÓN ANAEROBIA, PRINCIPIOS Y REACTORES

Alcance: En este tema, el aspirante conocerá los principios de la digestión anaerobia, proceso biológico requerido para la producción de biogás, así como los factores físicos, químicos y biológicos que intervienen en éste. Por último, se presentarán los tipos de biodigestores más comunes que son utilizados a nivel nacional e internacional.

Se busca promover la capacidad de análisis y comprensión a través de la lluvia de ideas como estrategia grupal acerca de un tema determinado.

Digestión anaerobia

20

La digestión anaerobia es uno de los procesos mediante los cuales la biomasa puede ser aprovechada. Es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (Holcem-Nielsen *et al.*, 2009). Este proceso se lleva a cabo de manera natural (por la descomposición de vegetación terrestre y descomposición de materia orgánica en agua) o de manera sintética (a través de rellenos sanitarios y biodigestores). Esta última tecnología es la que abarca el presente curso.

En la actualidad, se distingue la digestión anaerobia a través de biodigestores en tres líneas principales: como un proceso para el tratamiento de residuos orgánicos; como una parte del tren de tratamiento de aguas residuales y como un proceso para la obtención de un subproducto (biogás) que puede ser utilizado para la producción de energía eléctrica y térmica.

Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia consta de cuatro etapas biológicas principales. La hidrólisis, primera etapa del proceso, donde la materia orgánica compleja es transformada en compuestos más simples; la segunda, llamada acidogénesis, donde estos compuestos son transformados principalmente en ácidos grasos volátiles; la tercera, acetogénesis, donde estos ácidos, a través de otra serie de microorganismos son degradados a acetato e hidrógeno; y la cuarta etapa, metanogénesis,

donde estos sustratos son transformados en Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), principales componentes del biogás (Chen et al., 2008) (Figura 3).

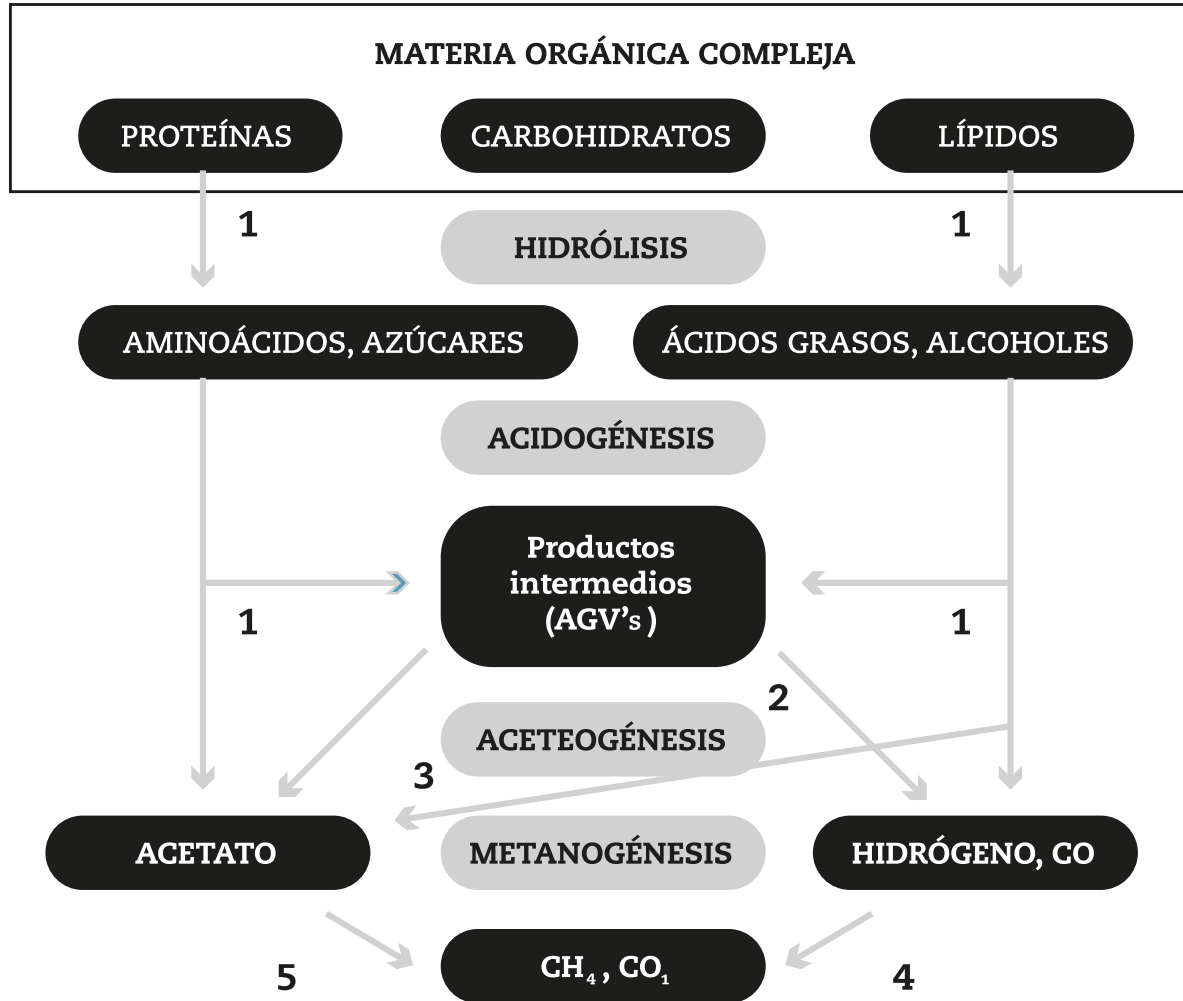


Figura 3. Cadena de transformación de la biomasa
Fuente: elaboración con datos del PNUD, (2010)

Las principales reacciones químicas que se llevan a cabo por etapa durante el proceso de degradación anaerobia se muestran en la figura 4. La primera etapa corresponde a la hidrólisis durante la cual las grandes cadenas de polímeros orgánicos tales como celulosa, proteínas, grasas y almidones se rompen o despolimerizan por medio de la acción de bacterias acidogénicas. Dichas bacterias convierten los compuestos en azúcares, aminoácidos, glicerol y cadenas de ácidos grasos empleando enzimas hidrolíticas (celulosa, amilasa, proteasa y lipasa), las cuales son excretadas por microorganismos fermentativos

(EPA 2006; van Haandel y van der Lubbe, 2007). Los microorganismos fermentativos involucran anaerobios estrictos y facultativos (Broughton, 2009).

La etapa de hidrólisis es seguida de manera inmediata por la formación de ácidos, acidogénesis (Ostrem, 2004). Durante esta etapa, los compuestos orgánicos son transformados por bacterias formadoras de ácidos en ácido propiónico y butírico en ácido acético hidrógeno y dióxido de carbono (Bajpai P., 2017). Acetatos e hidrógeno se producen durante las reacciones acetogénicas y acidogénicas.

El hidrógeno formado durante la etapa de acetogénesis, se considera un producto residual de la acidogénesis que inhibe el metabolismo de las bacterias acetogénicas. Este último es consumido por bacterias productoras de metano, produciendo metano (Al Seadi *et al.*, 2008). En la etapa final de la digestión anaerobia el metano es producido por la acción de bacterias metanogénicas. Estas bacterias son capaces de metabolizar ácidos fórmicos, ácidos acéticos, metanol, monóxido de carbón y dióxido de carbono. La etapa de metanogénesis es el punto crucial del proceso de digestión anaerobia, durante ésta, las reacciones bioquímicas se desarrollan de manera más lenta en comparación con las otras etapas (Al Seadi *et al.*, 2008). Las bacterias productoras de metano son estrictas anaerobias y son vulnerables a pequeñas cantidades de oxígeno (Bajpai, P., 2017).

22

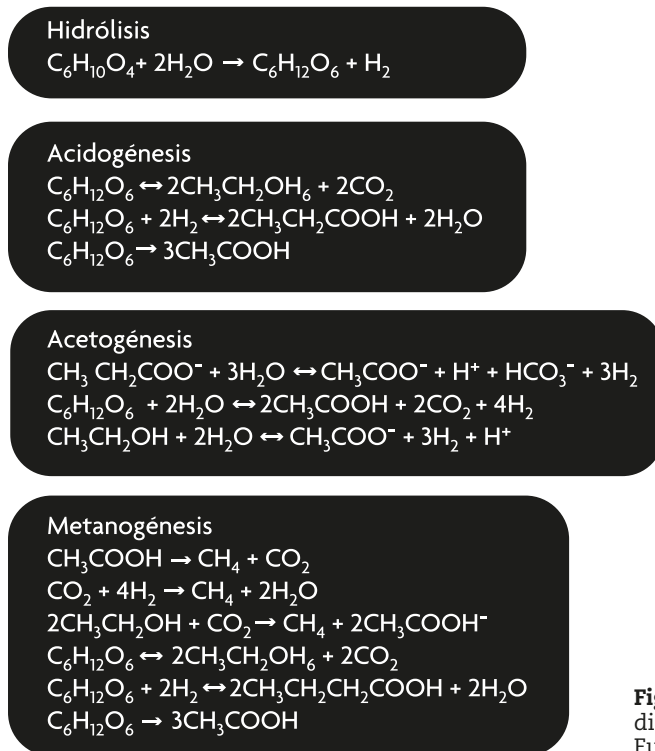


Figura 4. Reacciones involucradas en la digestión anaerobia de materia orgánica compleja. Fuente: Bajpai, P. (2017)

Biogás

El principal producto de la digestión anaerobia es el biogás, el cual está compuesto principalmente por el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y otros componentes, tales como ácido sulfhídrico (H_2S), agua y nitrógeno (N) (Arthur R., 2011). La concentración de cada uno de éstos varía en función del tipo de residuo que se someta a este proceso.

El biogás, por sus propiedades, puede ser utilizado para producir energía térmica (por ejemplo, cocción de alimentos, calentamiento de agua y aprovechamiento en calderas), energía eléctrica y para su quema directa (Amigun y von Blottnitz, 2010). En estos casos, con el uso de biogás se sustituye el consumo de combustibles fósiles tradicionales (gas natural, gasolina, gas L.P, diésel, combustóleo, entre otros) lo que favorece la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Adicional al beneficio ambiental que conlleva el uso de biogás, también se presentan beneficios adicionales a quienes implementan esta tecnología. Por ejemplo, el uso de este bioenergético puede traer grandes beneficios económicos por el ahorro en el consumo de combustibles, además, en algunos casos, la disminución de contaminantes orgánicos en las aguas residuales se traduce en ahorros por el pago de derecho de descargas a cuerpos de agua (ríos, lagos y lagunas) (Weber *et al.*, 2012).

23

Principales factores que afectan la producción de biogás

La producción de biogás es un proceso que puede verse afectado por una gran cantidad de factores, físicos, químicos y biológicos (Arthur R., 2011). Entre ellos, destacan:

- Temperatura
- Potencial de hidrógeno (pH)
- Cantidad de nutrientes (Relación carbono – nitrógeno)
- Velocidad de carga orgánica
- Tiempo de retención hidráulico
- Concentración de oxígeno
- Productos inhibidores (metales pesados, antibióticos, entre otros).

Cada uno de estos factores, tienen valores óptimos donde la producción de biogás, en especial de metano, se da de manera eficiente.

a) Temperatura

Es una variable termodinámica clave para la eficiencia del proceso de fermentación de la materia orgánica. Las bacterias metanogénicas involucradas en el proceso de descomposición presentan diferentes velocidades de degradación de la materia orgánica en función de la temperatura. Las temperaturas de operación más comunes, están alrededor de 35-40°C (mesofílicas) y alrededor de 50-55°C (termofílicas) (Banks *et al.*, 2007).

b) Potencial de hidrógeno

El control de este parámetro al igual que la temperatura es fundamental para el crecimiento de los microorganismos. Los microorganismos metanogénicos se reproducen favorablemente en un rango de pH, que varía de 6.5 a 7.6. Si dicho valor se encuentra fuera del rango, el proceso de producción se ve inhibido de manera importante (Seadi *et al.*, 2008).

24

c) Cantidad de nutrientes

Para el proceso de biodigestión anaerobia, se deberá considerar la relación de nutrientes encontrada en el influente. Ésta puede expresarse en función de la relación carbono-nitrógeno. Para este tipo de procesos, se considera una relación entre 20:1 y 30:1, siendo la óptima 25:1, es decir, 25 partes de carbono por una de nitrógeno (Abassi *et al.*, 2012).

d) Velocidad de carga orgánica

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica con que se alimenta el reactor, por unidad de tiempo (día) y por unidad de volumen del reactor (m³).

e) Tiempo de retención hidráulica

Se refiere a la cantidad de tiempo promedio que los sustratos permanecen en el reactor cuando se tienen procesos de flujo continuo.

f) Concentración de oxígeno

En caso de que exista una alta concentración de oxígeno en el sistema, la producción de biogás se inhibirá, de ahí la importancia de que el biodigestor donde se lleve a cabo el proceso se encuentre sellado, con objeto de que las bacterias metanogénicas hagan bien su trabajo.

g) Productos inhibidores

Cuando en el proceso biológico que se lleva a cabo en el biodigestor anaerobio existe la presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo de producción de biogás (Chen *et al.*, 2008).

Tipos de biodigestores

En la actualidad, la producción de biogás se lleva a cabo principalmente a través de dos procesos. El primero de ellos es a través de los rellenos sanitarios, lugares donde son depositados y confinados los residuos sólidos urbanos. En este caso, la fracción orgánica de estos residuos se descompone en los rellenos, produciendo biogás, que en algunos casos es aprovechado para la generación de energía eléctrica. Por otra parte, están los sistemas de biodigestión, que actualmente son utilizados para tratar la fracción orgánica de residuos industriales, urbanos y agropecuarios.

Existen diferentes tipos de clasificaciones para los sistemas de biodigestión, aunque de manera general, destacan dos vertientes de esta tecnología.

Tabla 1. Tipos de biodigestores

Por tipo de carga	Por desarrollo tecnológico
Sistema discontinuo, lote y batch	Primera generación
Sistema continuo	Segunda generación
Sistema semicontinuo	Tercera generación

Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM; Mata-Alvárez (2000).

Por tipo de carga

Esta clasificación identifica a los biodigestores por la alimentación que se realiza en el sistema. Se puede dar de manera intermitente (sistema discontinuo o batch), donde por lote es cargada la materia orgánica y una vez que se degrada totalmente se vacía el biodigestor y se realiza una nueva carga. En los sistemas continuos, todo el tiempo se inyecta biomasa al sistema y se tiene una producción constante de biogás. Por último, en el caso de los sistemas semicontinuos, la carga se realiza una o dos veces por día y se obtiene, al igual que en el caso de los sistemas semicontinuos, una producción constante de biogás (ANEAS, 2017).

Otra de las maneras más comunes de clasificar a los biodigestores es por el desarrollo evolutivo que esta tecnología ha tenido a lo largo de los años. Este esquema de innovación tecnológica se divide en reactores de primera, segunda y tercera generación.

Primera generación

Los reactores anaerobios de primera generación son conocidos también como reactores de baja tasa. En estos sistemas, el tiempo de retención hidráulica es igual al tiempo de residencia celular. Se caracterizan por tener la mayor parte de la biomasa acumulada como sedimento y su configuración no garantiza el adecuado contacto de la misma con el sustrato.

Segunda generación

En el marco de esquemas de desarrollo tecnológico, las tecnologías que se consideran de segunda generación incluyen la incorporación de microorganismos para mejorar la degradación de la materia orgánica, obteniendo por ende una mayor producción de biogás.

Tercera generación

En este tipo de tecnología también se retienen los microorganismos en una biopelícula o grano compacto y denso, con la diferencia de que el soporte se expande o fluidifica con altas velocidades de flujo. Una de las principales ventajas de la incorporación de esta tecnología es la disminución del tiempo de retención, de días a incluso horas, en función de la cantidad de materia orgánica a ingresar al sistema. Entre los procesos de tratamiento anaerobio destacan los reactores filtro de flujo ascendente (UASB, por su siglas en inglés) (ANEAS, 2017).

3

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Alcance: En este tema, el participante conocerá los principales parámetros que se deben tomar en cuenta para el diseño de un sistema de biodigestión, en particular, un sistema de tipo laguna cubierta, tecnología utilizada en mayor medida dentro del sector agropecuario mexicano.

En este apartado, se busca promover la capacidad de razonamiento matemático deductivo del participante, ya que se realizará un ejercicio de cálculo para el dimensionamiento de un biodigestor.

Diseño y dimensionamiento de biodigestores

Para realizar un eficiente diseño de biodigestores, hay que tomar en cuenta una serie de factores, que pueden englobarse en tres puntos principales:

- Uso del biodigestor
- Tipo de biomasa
- Características físicas (topografía, ubicación, tipo de unidad productiva).

Uso del biodigestor: Se debe inicialmente definir el uso que se le dará al biodigestor, por ejemplo, si el biodigestor se requiere para tratar la totalidad de materia orgánica generada en la unidad; abastecer de energía eléctrica a la unidad productiva o; simplemente como parte de un tren de tratamiento de aguas residuales para disminuir la concentración de contaminantes orgánicos presentes en el agua. En función de este uso, se elegirá el tipo de biodigestor más conveniente (Batch, continuo o semicontinuo, primera, segunda o tercera generación).

Tipo de biomasa: El diseño del biodigestor deberá de tomar en cuenta el tipo de biomasa que ingresará en el sistema (agrícola, agropecuaria, urbana) y sus características, para poder elegir el biodigestor más adecuado, considerando la viabilidad técnica y económica del sistema.

Por otra parte, el tipo de biomasa, indicará si es necesario contar con un pre-tratamiento (separador de sólidos, triturador desarenador, fosa de mezclado, entre otros) para que la operación del sistema no se vea afectada.

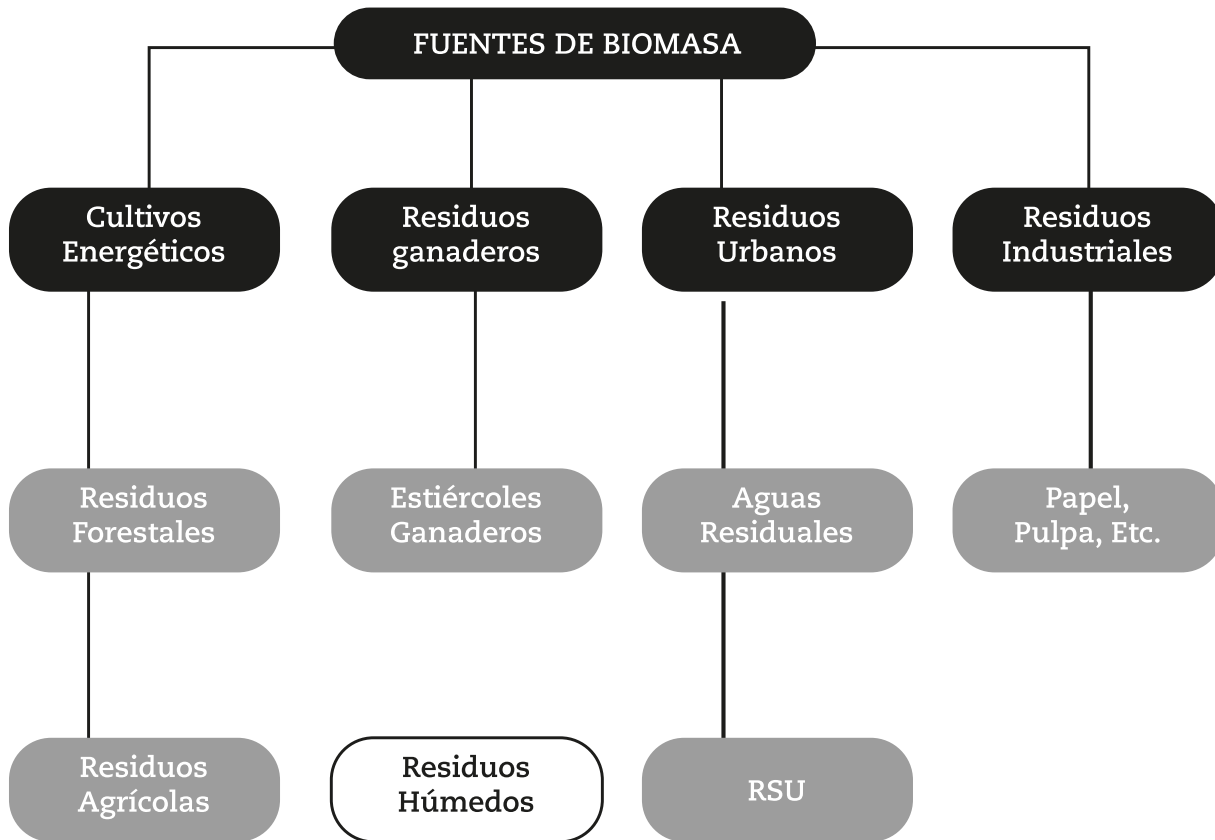


Figura 5. Fuentes de Biomasa
Fuente: Modificado de Wereko-Brobby y Hagen, (1996).

Características físicas de la unidad: Se deben de conocer perfectamente las características físicas en donde se instalará el biodigestor. Cercanía con cuerpos de agua, relieve, distancia con respecto a la fuente de producción de biomasa. En algunos de los casos, existe normatividad ambiental oficial que regula las condiciones que debe tener el sitio donde se pretenda instalar un biodigestor (FIRCO, 2011). En otros aspectos, existen especificaciones técnicas que orientarán al interesado para construir el sistema.

Diagrama general de un sistema de biodigestión

Un sistema de biodigestión está integrado por una serie de procesos, que van desde la etapa de recepción de insumos, hasta el aprovechamiento de subproductos (biogás, biofertilizante y aguas del efluente) (Figura 6).

Como se ha indicado párrafos atrás, este esquema podrá contener elementos adicionales que variarán en función de las características del residuo que se quiere tratar, por lo que este diagrama puede contar con varios arreglos.

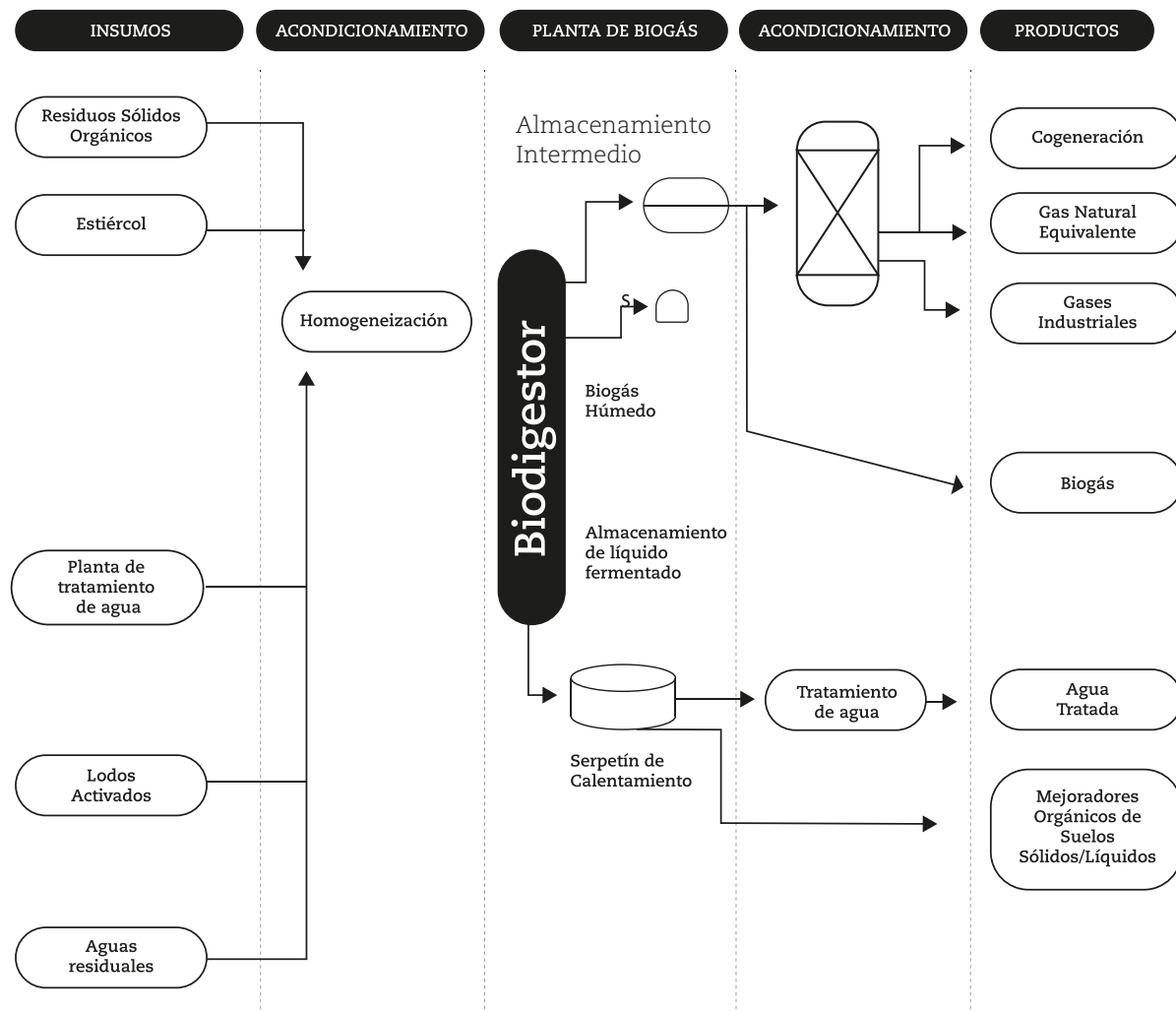


Figura 6. Diagrama general de un sistema de biodigestión
Fuente: Adaptado de la Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás (2016).

4

INSTALACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Alcance: En este tema, el participante identificará todos los componentes necesarios para la construcción y operación de un sistema de biodigestión.

Este tema, será dado con base en el documento de “Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México”, desarrollado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Este documento es el único a nivel nacional que regula el diseño, construcción y operación de estos sistemas en México.

Proceso constructivo de un sistema de biodigestión

El proceso de construcción de un sistema de biodigestión tipo laguna cubierta se presenta de manera general a continuación:



Figura 7. Proceso constructivo de un sistema de biodigestión
Fuente: Curso para la formación de capital humano en materia de biodigestión (FIRCO, 2016)

Especificaciones técnicas de sistemas de biodigestión

Cada una de estas etapas, y el equipamiento del biodigestor, están regulados por las especificaciones técnicas SEMARNAT–SAGARPA (FIRCO, 2016). A continuación, se presentan los principales componentes que regulan estos estándares.

a) Separador de sólidos: En función del contenido de sólidos, se hará necesaria la instalación de un separador, que, como su nombre lo indica, separara los sólidos de gran tamaño del influente, mismos que pueden causar obstrucciones en la tubería que alimenta el biodigestor e impedir su correcto funcionamiento.

b) Fosa de mezclado: Es un elemento importante para homologar la mezcla de materia orgánica – agua que ingresará al biodigestor. Asimismo, en la fosa se pueden medir los principales factores físicos, químicos y biológicos del influente para asegurarse que posean los valores adecuados para una eficiente producción de biogás.

c) Obra civil: Estas especificaciones presentan los estudios previos que deben realizarse antes de la construcción de un biodigestor (estudios topográficos, ambientales y de estructura). Además, se presentan las características que debe tener la excavación: taludes, aplanes, protecciones y anclajes que deberá tener el biodigestor.

d) Sistemas de agitación: Con objeto de evitar la sedimentación de sólidos dentro del biodigestor, es recomendable que el sistema cuente con un sistema de agitación. Además, este sistema permite que el sustrato (materia orgánica) entre en contacto más fácilmente con las bacterias encargadas del proceso de digestión anaerobia

e) Puntos de muestreo: Instalar puntos de muestreo a la entrada, salida y dentro del biodigestor, permite llevar un control y seguimiento de la operación del sistema. Por tal motivo, se darán a conocer a los participantes los principales parámetros que deben medirse dentro del

biodigestor para ver si el sistema está operando correctamente o no.

f) Geomembrana: Se detallarán las propiedades que deberá tener la geomembrana que cubrirá al biodigestor, tanto la inferior, que impide la filtración de la materia orgánica al subsuelo, como la superior, con la que se logran las condiciones anaerobias en el sistema, y permite contener el biogás generado. Se presentarán materiales, grosores, elasticidad, fuerza y presiones. Asimismo, se explicará cómo se lleva a cabo el sellado de las geomembranas para impedir cualquier tipo de filtración de biogás o materia orgánica al exterior, la normatividad que regula la fabricación de geomembranas, entre otros aspectos relevantes de este material.

g) Sistema de tuberías: El biodigestor contará con cuatro tipos de tubería (tuberías para la conducción de biogás, influente, efluente y retiro de lodos). Con base en su función, serán de materiales y dimensiones diferentes.

h) Quemador de biogás: Un componente importante dentro de los sistemas de biodigestión, es el quemador de biogás, el cual, en caso de no aprovechar este bioenergético para generación de energía eléctrica y/o térmica, permite quemar el biogás para disminuir el impacto por la generación de metano, al transformarlo en CO₂. Para que esto sea de forma eficiente, el quemador debe cumplir con una serie de requerimientos técnicos tales como materiales, eficiencia, flujos, principalmente (FIRCO, 2016).

Otro aspecto importante a regular en el quemador de biogás, es la distancia de éste con respecto al biodigestor, ya que una distancia menor a los 30 metros, podría implicar que la flama llegue al biodigestor, pudiendo ocasionar un incendio en caso de que exista una fuga en el mismo. Por el contrario, si el quemador se encuentra demasiado lejos, se hará necesaria la instalación de un soplador que lleve el biogás a esa distancia, lo que aumentará los costos en el sistema.

i) Medidor de biogás: Es importante contar con un medidor de biogás que cuantifique la producción en el biodigestor. Lo anterior para determinar el flujo que pasa del sistema al quemador o al sistema de aprovechamiento de biogás para la generación de energía. Asimismo, al conocer la cantidad de biogás, es posible cuantificar la disminución de reducción de emisiones por la instalación del sistema.

j) Filtro de retención de ácido sulfhídrico (H_2S): El H_2S , al combinarse con la humedad del biogás produce ácido sulfhídrico (H_2SO_4) el cual corroe las tuberías de biogás y los equipos para la producción de energía (motogeneradores y turbinas). Por tal motivo es necesario instalar un filtro que retenga este ácido. En el mercado existen una gran cantidad de filtros que funcionan con principios químicos como la adsorción, hasta biológicos en donde diferentes microorganismos toman como sustrato este compuesto, degradándolo a compuestos más simples, que no son tan dañinos para los equipos de aprovechamiento de biogás.

34

k) Instalaciones eléctricas: Al igual que cualquier equipo, los sistemas de biodigestión se encuentran regulados por la normatividad oficial nacional en materia de instalaciones eléctricas, misma que establece como deben hacerse las conexiones, calibres de los cables y lo más importante, como se conectará y que condiciones de seguridad se deben de seguir para la instalación de un motogenerador que aproveche el biogás para la generación de la energía eléctrica.

l) Medidas de seguridad: Para la instalación y operación de un biodigestor es necesario seguir medidas de seguridad que cuidarán al personal que esté involucrado directamente con la operación del sistema. Entre las principales medidas se tienen:

- Restricción de acceso
- Cerco perimetral
- Ubicación del quemador
- Señalizaciones
- Seguridad en el sistema de tuberías
- Instalación de válvulas de alivio
- Prevención y control de incendios

Costo de un sistema de biodigestión

La inversión de los sistemas de biodigestión tipo laguna cubierta, consideran, cuando menos los siguientes conceptos de gasto:

- Preliminares, excavación y acabados
- Fosa de mezclado
- Zanja perimetral de anclaje
- Suministro e instalación de geomembrana
- Sistema de medición de biogás
- Sistema de tuberías
- Instalaciones eléctricas
- Filtro de retención de H₂S
- Servicios
- Cerco perimetral
- Quemador
- Laguna secundaria
- Motogenerador (adquisición e instalación)

5

APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS: AGUAS RESIDUALES

Alcance: Al finalizar este bloque, los estudiantes conocerán las características físicas y microbiológicas que presentan las aguas residuales provenientes de un biodigestor. El marco legal que regula su uso y su disposición también se abordará, además de las experiencias en el uso y tecnologías para el tratamiento de las mismas.

Aprovechamiento de las aguas residuales

Los subproductos de un sistema de producción de biogás son los llamados residuos de un proceso que puede tener una segunda utilidad. Generalmente se les consideraba un material inservible y problemático, tal es el caso de las aguas residuales. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que pueden representar productos de valor agregado capaz de emplearse en otros procesos productivos.

36

La Figura 7 nos muestra los principales subproductos que se obtienen de un proceso de digestión anaerobia. En donde, recordemos que la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en subproductos gaseosos (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.) (biogás), una mezcla de subproductos minerales (N,P,K,Ca, etc.) (digestato), y un subproducto líquido (biol).

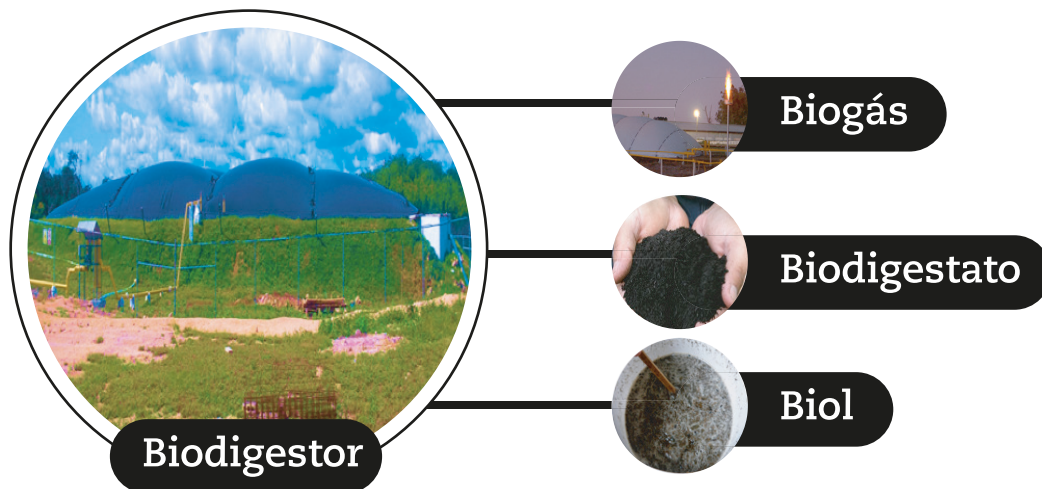


Figura 8. Subproductos de un biodigestor.

Composición física y microbiológica de las aguas residuales de un biodigestor

El análisis de casos se empleará como herramienta para extraer conclusiones a partir de información de campo, en este caso en particular, considerando los resultados de la caracterización tanto física como microbiológica de las aguas entrantes y salientes de un sistema de biodigestión.

El resultado del análisis de agua de un sistema de biodigestión construido para tratar las excretas de una granja de una población porcícola de 4,000 vientres se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 2. Análisis físicos y químicos del sistema de biodigestión tipo laguna para residuos ganaderos (entrada del sistema)

Método analítico	Parámetro	Resultado	Unidades	Máximo permisible
NMX-AA-030-SCFI-2001	Demanda química de oxígeno	5790.72	mg/L	320.0 mg/L
NMX-AA-026-SCFI-2010	Nitrógeno Total Kjeldahl	913.97	mg/L	40.0 mg/L
NMX-AA-028-SCFI-2001	Demanda Bioquímica de Oxígeno	599.02	mg/L	150.0 mg/L
NMX-AA-042-1987	Coliformes fecales	>2400	NMP/100 mL	2000 NMP/100mL
NMX-AA-007-SCFI-2000	Temperatura	22.8	°C	
NMX-AA-008-SCFI-2011	Potencial de Hidrogeniones	7.11		
NMX-AA-004-SCFI-2000	Sólidos Sedimentables	55	mL	
NMX-11-093-SCFI-2001	Conductividad	8.97	mS/cm	
	Material flotante	Sí		

Fuente: Pampillón-González, L. (2014).

Tabla 3. Análisis físico y químicos del sistema de biodigestión tipo laguna para residuos ganaderos (salida del sistema)

Método analítico	Parámetro	Resultado	Unidades	Máximo permisible
NMX-AA-030-SCFI-2001	Demanda química de oxígeno	3394.56	mg/L	320.0 mg/L
NMX-AA-026-SCFI-2010	Nitrógeno Total Kjeldahl	1008.84	mg/L	40.0 mg/L
NMX-AA-028-SCFI-2001	Demanda Bioquímica de Oxígeno	72.36	mg/L	150.0 mg/L
NMX-AA-042-1987	Coliformes fecales	>2400	NMP/100 mL	2000 NMP/100mL
NMX-AA-007-SCFI-2000	Temperatura	24.7	°C	
NMX-AA-008-SCFI-2011	Potencial de Hidrogeniones	7.64		
NMX-AA-004-SCFI-2000	Sólidos Sedimentables	22	mL	
NMX-11-093-SCFI-2001	Conductividad	12.45	mS/cm	
	Material flotante	No		

Fuente: Pampillón-González, L. (2014).

La mayoría de los parámetros muestran una caída en sus valores exceptuando la conductividad y los coliformes fecales. Con base a estos criterios el proceso de degradación anaerobia está tomando lugar dentro del sistema. Es decir, los microorganismos que habitan dentro del reactor están empleando la materia orgánica entrante como sustrato para llevar a cabo sus procesos metabólicos.

La demanda química de oxígeno durante el proceso de digestión está formada por un 10% de materiales inertes y un 90% de hidratos de carbono, proteínas y lípidos, en partes iguales. Éste parámetro presenta una disminución de 5790 a 3394 mg/L por lo que la degradación se está llevando a cabo. La eficiencia de remoción de DBO se considera aceptable con un valor de 87.92%. La relación DBO/DQO nos da un valor de 10.3 para fines de diseño, cuando el valor de esta relación está en el rango de los procesos anaerobios son los ideales para el tratamiento de los desechos a tratar (FIRCO, 2016).

Respecto al valor de nitrógeno total, durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formar amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar el crecimiento. En la evaluación de este parámetro el nitrógeno total aumenta a 1008 mg/L es un comportamiento esperado como resultado del proceso de nitrificación de nitritos y nitratos.

El valor de coliformes fecales permanece estable. Esto puede deberse a que la temperatura no llega a las condiciones mesofílicas (25- 35°C) deseadas y/o al tiempo de retención de la materia orgánica.

A pesar de que la concentración de la carga orgánica presenta una disminución bastante aceptable, no se cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la norma mexicana (NOM 001-SEMARNAT 1996). Esta situación sugiere, que otros tratamientos complementarios pueden ser instituidos en el tren de tratamiento de este tipo de desecho.

Marco legal para las aguas residuales



Figura 9. Marco legal de las aguas residuales

También es importante considerar el marco operativo el cual está integrado por información sobre las tecnologías disponibles, mejores prácticas nacionales e internacionales, normas mexicanas, estándares certificables, lineamientos técnicos, reglas de operación, entre otros.

Usos potenciales y tecnologías complementarias

Los subproductos de un biodigestor deben satisfacer los objetivos o estándares de calidad de efluentes y agua para que sea posible descargarlos sin generar un problema.

El tipo de tratamiento puede variar desde sistemas de tratamiento relativamente sencillos con base a terrenos hasta plantas complejas y automatizadas. La elección final del tratamiento para los efluentes dependerá de un análisis de ingeniería.

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuraciones eficientes autónomas y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan tratamientos naturales de aguas residuales y cada día es más frecuente el uso de lagunares, de sistemas de infiltración de humedales artificiales de toda variedad.

El uso de humedales se ha incrementado en los últimos años, hoy por hoy son una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada.

El caso de los humedales

Es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o pantano) poco profundo, construido por el hombre, en el que se ha sembrado plantas acuáticas que llevan a cabo procesos biológicos que permiten mejorar la calidad del agua.

- Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado.
- El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes.

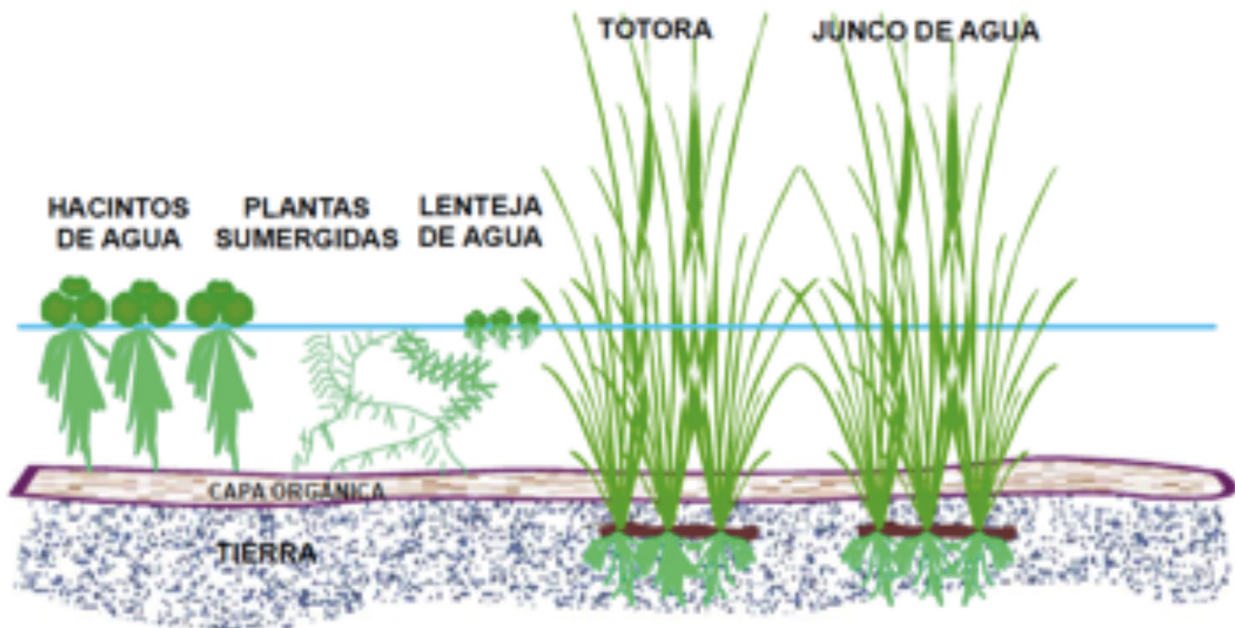
- La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que el flujo es con frecuencia laminar.
- Las esteras (tatami) de plantas pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado.

La capacidad de remover ciertos contaminantes los cuales son captados por las plantas. Estos se encuentran en forma de nutrientes esenciales para éstas, tales como nitrato, amonio y fosfato.

Otras especies de plantas son capaces de captar, incluso acumular metales tóxicos como cadmio y plomo.

La velocidad de remoción de contaminantes de la planta varía dependiendo de:

- La velocidad de crecimiento de la planta
- La concentración del contaminante en tejido de planta.
- Las plantas leñosas es decir árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes, comparado con las plantas herbáceas.



6

APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Alcance: Al culminar este tema, los participantes conocerán los diferentes usos que se le puede dar al biogás, por ejemplo, generación de energía eléctrica, energía térmica, uso directo, quema para comercialización de emisiones, así como los equipos en donde se lleva a cabo este aprovechamiento (motogeneradores, turbinas, su compresión en tanques para su uso como combustible, entre otros).

En este apartado, se busca promover la capacidad de razonamiento matemático del participante, ya que se realizarán ejercicios para determinar la producción de energía eléctrica y térmica de un biodigestor.

Aprovechamiento de biogás

42 Desde el punto de vista energético, el biogás puede ser aprovechado para diferentes usos.

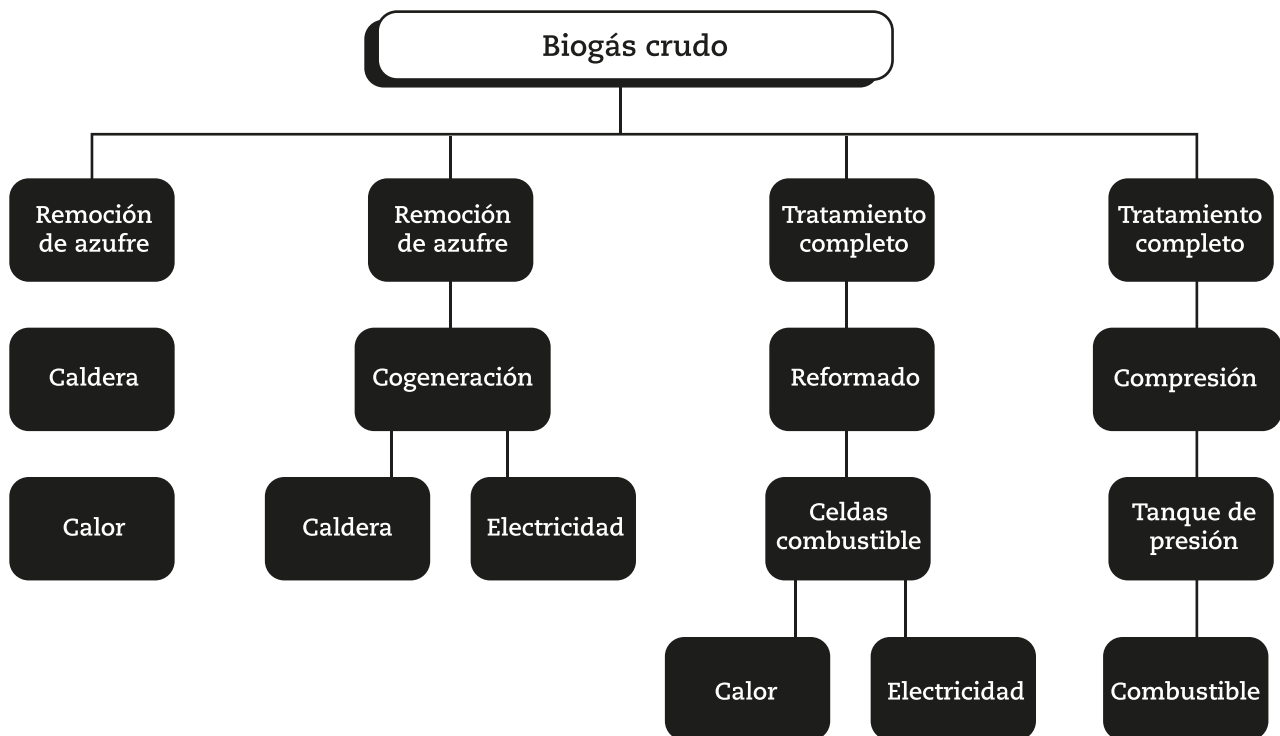


Figura 11. Diagrama de aprovechamiento del biogás
Fuente: Manual de Producción de Biogás. FAO – Gobierno de Chile.

A continuación, se presentan los principales equipos que se utilizan actualmente para el aprovechamiento de energía con biogás:

Motores de combustión interna

Este tipo de motores es el más utilizado actualmente para aprovechar el biogás para generar energía eléctrica. Existen dos tipos de motores (encendido por chispa y encendido por compresión).

Turbinas de gas

Otro de los equipos utilizados para generar energía a partir de biogás, son las turbinas de biogás, mismas que actualmente presentan un crecimiento en su uso. Los principales factores para diseñar estos equipos son:

- Porcentaje de metano en el biogás
- Concentración de ácido sulfhídrico
- Altura sobre el nivel del mar
- Especificaciones técnicas del equipo
- Normas eléctricas

Interconexión a la red eléctrica

Actualmente, el marco regulatorio en materia eléctrica permite que aquel que genere energía eléctrica a través de fuentes renovables puede “inyectar” esa energía a través del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), compensando el consumo de energía por la generada, conllevando beneficios económicos para los usuarios. En este sentido, se describirá el marco regulatorio para la interconexión de estos equipos (modalidades de generación, capacidad de los equipos, uso final).

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Leyes:

- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica
- Ley de la Comisión Reguladora de Energía
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Reglamentos de las Leyes:

- Del Servicio de Energía Eléctrica
- Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.

Figura 12. Marco regulatorio de la interconexión a red
Fuente: Comisión Reguladora de Energía

Otros usos del biogás

Dejando de lado los usos más recurrentes del biogás (uso directo, quema y generación de electricidad), se presentarán a los aspirantes otros usos de este bioenergético que pueden ser implementados, por ejemplo, el uso de biogás en calderas, en empresas que consumen gran cantidad de energía térmica en sus procesos. Otra aplicación del uso de biogás es para regulación de temperatura en invernaderos. Por último, se tiene la compresión de biogás para poder transportarlo y pueda ser utilizado, principalmente en vehículos automotores.

Comercialización de reducción de emisiones

Como se comentó anteriormente, la quema de biogás se traduce en una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto ha sido tomado a nivel mundial para dar pie a diferentes esquemas que dan valor monetario a las mismas. Esto va, desde el Protocolo de Kioto, donde se formalizó el denominado Mecanismo de Desarrollo Limpio, hasta la actualidad donde diversos países generaron su propio mercado de reducción de emisiones. Considerando esto, se brindará a los participantes los antecedentes de estos esquemas (bonos de carbono), hasta los incentivos que existen actualmente por la quema y aprovechamiento de biogás.

7

**APROVECHAMIENTO DE LOS
LODOS RESIDUALES DE
UN BIODIGESTOR**

Alcance: El estudiante desarrollará un pensamiento crítico sobre el uso adecuado de los lodos de un biodigestor a través del estudio de caso y las características fisicoquímicas que regulan su uso o disposición final.

Lodos residuales de un biodigestor

Otros subproductos del proceso de biodigestión son los lodos residuales (digestato). Hasta hace poco se difundía el uso de éstos como abonos orgánicos y biofertilizantes, puesto que, al ser resultado de la digestión se consideraban como mejoradores de suelo por su composición mineral y orgánica. No obstante, es importante someter esta idea a prueba.

Por un lado, se sabe, que la digestión anaeróbica transforma mucho del nitrógeno orgánico en amonio, de modo que 60-80% de nitrógeno total del digestato está en forma de amonio (Banks *et al.*, 2007). Además, se considera un sustrato rico en macro (nitrógeno, fósforo y potasio) y micro nutrientes (Massi, 2012).

Mucho de los patógenos y parásitos son inactivados con la temperatura y el tiempo de retención hidráulica a la cual está sujeta la materia orgánica a degradar. Esto hace que el digestato posea mejores características que las excretas de animales. Lo anterior también da lugar a menos emisiones de olores desagradables y disminuye la cantidad de moscas. Su eficiencia de fertilización es alta, en términos de homogeneidad, viabilidad de nutrientes y mejor relación C:N.

Sin embargo, su esparcimiento directamente en suelos está limitado por el contenido de metales pesados (Kranert *et al.*, 2012). Si bien con la aplicación del digestato en suelo, disminuye el uso de ciertos fertilizantes químicos y mejoradores de suelo, su aplicación debe estar sujeta a un estricto control sanitario y medidas que permitan que su manejo no produzca otros problemas.

Desafortunadamente, las regulaciones respecto a los digestatos y bioles varían de país en país. Esto es entendible, puesto que la composición física y química de éstos últimos depende de la materia orgánica a tratar y el uso final del mismo.

Una limitación para el manejo de los lodos es que requiere de un sistema de extracción que permita el uso de bombas y equipos para el transporte de éstos a tanques o lechos de secados. Las características hidráulicas del lodo varían considerablemente como resultado de la viscosidad, concentración de sólidos, principalmente (Taricksa *et al.*, 2007). La literatura menciona diversos métodos para el tratamiento de éstos lodos, que van desde la deshidratación usando prensas de tornillo, decantado o centrifugado, hasta el composteo, peletizado o mezclado con paja (Massi, 2012).

Otra alternativa a considerar a nivel investigación, está relacionado con procesos químicos y microbianos. Los nuevos estudios se enfocan en un proceso de oxidación parcial llamado Anammox (Massi, 2012) o recuperación de nutrientes a través de la precipitación o la aplicación de biomasa microbiana selecta.

En esta sección se muestran los resultados del estudio de caso acerca del digestato, producto obtenido después de la digestión anaerobia de los desechos orgánicos durante la producción de biogás de una granja porcícola ubicada en Huejotzingo, Puebla.

46

El objetivo planteado en este estudio fue investigar como la aplicación de éste subproducto puede afectar el crecimiento del trigo (*Triticum ssp. L.*) y las emisiones de gases de efecto invernadero en un experimento diseñado a nivel invernadero.

Caracterización física y química

Los resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y contenido de metales pesados del digestato se muestran en la Tabla 4.

El digestato empleado en este experimento contiene una alta conductividad eléctrica. El alto contenido de sales en éste se deriva de los suplementos alimenticios que se les suministran a los animales en su dieta (Velthof *et al.*, 2005); la sal solubilizada permanece principalmente en la fracción líquida de los estiércoles (Burton, 2007). Considerando esta característica, la aplicación de digestato en el suelo deberá ser monitoreada pues un incremento en el contenido de sal en el suelo puede inhibir el crecimiento de las plantas.

Tabla 4. Composición fisicoquímica del digestato

EC	pH	Contenido de humedad	Carbono Orgánico	Nitrógeno Total	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
			(g/kg)			(mg/kg)	
15.5	7.9	902	436.1	6.9	1065	3.4	18

Fuente: Pampillón-González, L. (2014).

En general, el digestato está caracterizado por tener una alta degradabilidad y una baja relación C:N relacionado con un alto contenido de NH₄⁺ (amonio). Éste último es el resultado de hidrólisis de la urea y la mineralización del N de compuestos orgánicos como aminoácidos y proteínas, ambos procesos se llevan a cabo durante la digestión anaerobia (Jørgensen and Jensen, 2009).

Los resultados microbiológicos dan negativo en la detección de la presencia de huevos de helminto, ni de bacterias del género *Shigella* ssp. ni *Salmonella* ssp. (Tabla 5). La ausencia de estos microorganismos confirma la eficiencia de los sistemas de biodigestión. Las condiciones termofílicas que toma lugar durante la digestión anaerobia eliminan la mayoría de los patógenos. Sin embargo, no reduce de manera suficiente la cantidad de coliformes fecales, como en este caso, en donde la cantidad de coliformes fecales fue de 3.6×10^4 CFU g⁻¹ base seca.

47

Tabla 5. Composición microbiológica del digestato

(número total de microorganismos y comparación con límites máximos aceptables para residuos orgánicos establecidos por USEPA, 1994)

Límites máximos aceptables (USEPA)

Parámetros Microbiológicos	Digestato	Clase A (CFU a /g)	Clase B
Fungi	16×10^3 ^b	NM ^c	NM
Coliformes totales	240×10^4	NM	NM
Coliformes fecales	3.6×10^4	< 1000	< 20×10^5
<i>Shigella</i> spp.	ND ^d	NM	NM
<i>Salmonella</i> spp.	ND	< 3	<300
Huevos de Helminto	ND	< 10×10^3	< 35×10^3

^a CFU: colonias formadoras de unidades. ^b Promedio 3 réplicas, ^c NM: no mencionado, ^d ND: no detectado Fuente: Pampillón-González, L. (2014).

Fuente: Pampillón-González, L. (2014).

De acuerdo a los límites máximos aceptables establecidos por la USEPA con relación al número de coliformes fecales, el digestato estudiado puede ser clasificado como un biosólido tipo B. Ésta clase de biosólido puede ser aplicado con toda seguridad en tierra, no obstante, no para fertilización de cultivos. Consecuentemente, se sugiere aplicar otras medidas complementarias para poder alcanzar la clasificación A del digestato. Ejemplo de estos otros procesos pueden ser el composteo, la aplicación de lima o el vermicomposteo, el secado, el espesamiento o la pelletización (WRAP, 2013). Un biosólido tipo A puede ser aplicado a suelo cultivable.

Con relación a la concentración de metales en el digestato, la concentración que presenta permiten catalogarlo como un biosólido de calidad “normal” (USEPA, 1994). No obstante, la concentración de otros micro y macro nutrientes como Mg, Fe, Cu, Ca y Zn determinada fue tres veces más alta a las reportadas para otros biosólidos (Alburquerque et al., 2012). Estas concentraciones de Cu, Fe y Zn (Tabla 6) pueden ser el resultado de aditivos empleados frecuentemente en la ganadería tanto para prevenir enfermedades en el ganado como para estimular su crecimiento. México no ha establecido límites respecto al máximo contenido de micro y macro nutrientes para digestatos, por lo que los datos encontrados en esta investigación son una importante base.

48

Tabla 6. Contenido de diferentes metales en el digestato (comparación con los límites máximos permisibles USEPA y el gobierno de Suecia)

Metal	Digestato	Límites máximos USEPA a Clase “Normal”	Contenido máximo para el gobierno de Suecia para metales en el digestato b c
		(mg/kg biosólido base seca)	
Be	4.6 ± 0.1 d	NG e	NG
Li	5.2 ± 0.2	NG	NG
Pb	7.2 ± 0.3	840	100
Sb	0.9 ± 0.3	NG	NG
Se	8.5 ± 0.4	100	NG
Ca	37300 ± 3669	NG	NG
Mg	24266 ± 2048	NG	NG

Mo	12.4 ± 0.2	75	NG
Sr	44.1 ± 0.7	NG	NG
Ti	22.3 ± 2.1	NG	NG
V	17.9 ± 0.3	NG	NG
Cd	3.8 ± 0.1	85	1
Co	0.8 ± 0.2	NG	NG
Cr	10.1 ± 0.3	3000	100
Cu	1796 ± 118	4300	600
Fe	5860 ± 424	NG	NG
Mn	1953 ± 115	NG	NG
Ni	16.9 ± 0.2	420	50
As	3.1 ± 0.2	75	NG
Zn	3873 ± 72	7500	800

a USEPA (1994). Part 503 Rule Chapter 2, b Rules for digestate from biowaste by the quality assurance system of Swedish Waste Management (Swedish Government, 2008; http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/Biologisk/English_summary_of_SPCR_120.pdf), c Porquinaza, paja, subproductos de la cosecha, ensilaje y cultivos energéticos, d Promedio 3 réplicas, e NG: No dado.

Tratamiento de los lodos residuales

Los lodos residuales de un sistema de biodigestión son el componente orgánico e inorgánico que no se degrada en el proceso de digestión anaerobia. Su producción dependerá de:

- Tipo de biomasa
- Temperatura del proceso
- Agitación
- Tiempo de retención

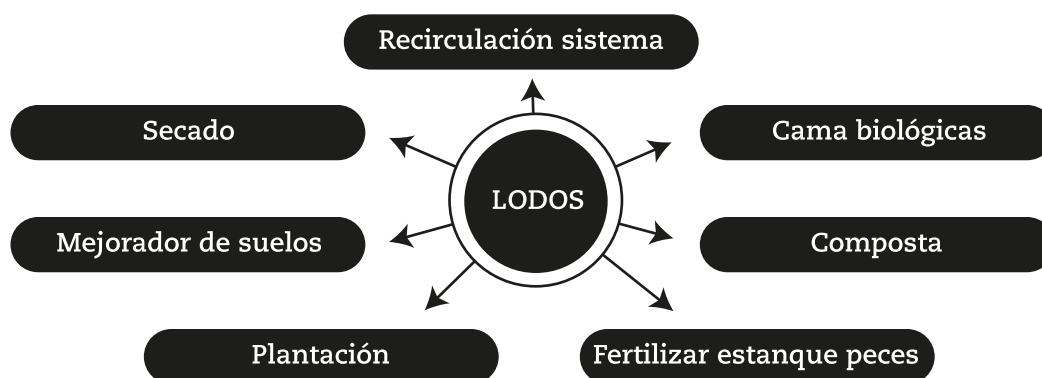


Figura 13. Tecnologías o tratamiento para el aprovechamiento de los lodos
Fuente: Pampillón-González (2014).

8

CONTROL Y MONITOREO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Alcance: Al culminar este tema, el aspirante conocerá todos los parámetros que se requieren medir para un eficiente control y monitoreo de los sistemas de biodigestión.

Verificación del estado físico de los componentes

Se presentará a los participantes los principales puntos que deben de verificarse para corroborar el correcto funcionamiento de un sistema de biodigestión. Entre estos se encuentran:

- Estado de la geomembrana (identificación de grietas, roturas y desgarres)
- Estado del quemador (identificación de corrosión, desgaste de materiales, color de la flama).
- Estado de las tuberías (verificación de que no existan deformaciones por temperatura, desgaste de materiales, señalizaciones).
- Estado de los equipos de generación de energía eléctrica (horas de operación, mantenimiento, cambio de piezas conforme a especificaciones técnicas).
- Composición del biogás (análisis de laboratorio para verificar la concentración de metano, dióxido de carbono y demás componentes).
- Estado del medidor de biogás (registro diario, semanal y mensual de la producción de biogás)
- Determinación de la calidad de aguas residuales.

Referencias y bibliografía recomendada

- | **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. pp-2338-2342.
- | **Al Seadi T** (2001) Good practice in quality management of AD residues from biogas production, Report made for the International Energy Agency, Task 24—energy from biological conversion of organic waste, published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, UK
- | **Amigun B., von Blottnitz H.** 2010. Capacity-cost analyses for biogas plant in Africa. Resources-cost and location-cost analyses for biogas plants in Africa. *Resources, Conservation and Recycling* (55) 63-73.
- | **ANEAS** (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México. GIZ México, SENER, SEMARNAT, CONAGUA, BMZ. <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/guia-lodos2017-dig.pdf>
- | **Arthur R.**, 2011. Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. *Renewable Energy* (36) 1510-1516.
- | **Banks CJ, Salter AM, Chesshire M** (2007) Potential of anaerobic digestion for mitigation of greenhouse gas emissions and productions of renewable energy from agriculture: barriers and incentives to widespread adoption in Europe. *Water Sci Technol* 55 (10): 2165-173.
- | **Bertalanffy, Ludwig von.** (1981). A system view of man. Ed. Paul A. La Violette. Boulder, CO: Westview, 1981.
- | **Boyle G.** (2004). *Renewable Energy*. Second edition. Nueva York: Oxford University Press.
- | **Broughton AD** (2009) Hydrolysis and acidogenesis of farm dairy effluent for biogas production at ambient temperatures. M.S. thesis, Massey University, New Zealand.
- | **Burton, C.H.**, 2007. The potential contribution of separation of technologies to the management of livestock manure. *Livest. Sci.* 112, 208-216.

- | **Cantrell K.B., Ducey T., Ro K.S., Hunt G.** 2008. Livestock waste to bioenergy generation opportunities. *Bioresource technology* 99, 7941-7953.
- | **Castro Claudia, Valverde María, Paredes Octavio. Biocombustibles: biomasa lignocelulósica y procesos de producción.** *Ide@as concyteg.* Año 4 núm 54, 2 de diciembre de 2009. Pág. 1246-1270.
- | **Chen Y, Cheng J.J. Creamer K. S.** 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99, 4044-4064.
- | **De Man A., Last A., Lettinga G.** (1988). The use of EGSI and UASB anaerobic systems for low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8-30°C. *Anaerobic digestion (Adv. Water Pollut. Control no 5)* E.R. Hall & P.N. Hobson. Pp. 197-210
- | **Deublein D., Stein Hauser, A.** (2008). *Biogas from waste and renewable resources, and introduction.* Wiley-VCH Publishing House, London, UK.
- | **EPA (United States Environmental Protection Agency)** (2006) Biosolids technology fact sheet: multi-stage anaerobic digestion. Retrieved 11 Oct 2013. URL: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2006_10_16_mtb_multi-stage.pdf
- | **Escalante S., Roberto y Fernando Rello** (2000). El sector agropecuario mexicano: los desafíos del futuro”. *Comercio Exterior*, vol 50.
- | **FAO** 2006. *Livestock’s long shadow: Environmental issues and options.* ISBN 978-92-5-105571-7. Rome, Italy. pp. 377
- | **FAO. World Agriculture: towards 2015/2030.** An FAO Perspective; 2003. <<http://www.fao.org/docrep/005/y4252e/y4252e00.htm>> [accessed on 10.03.14].
- | **FIRA** 2010. *Panorama Agroalimentario: Carne de Porcino 2012.* Dirección General Adjunta de Inteligencia Sectorial. Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura. pp.22
- | **FIRCO** (2011). *Especificaciones Técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México.* Publicación gobierno federal. Oficinas centrales FIRCO
- | **FIRCO.** 2012. *Diagnóstico general de los Sistema de biodigestión.* Central Offices of Shared Trust Fund Risk. Secretary of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries and Food. Government publications. México, D.F. 199 pp.

- | **Furukawa, Y., Hasegawa, H.**, 2006. Response of spinach and komatsuna to biogas effluent made from source-separated kitchen garbage. *J. Environ. Qual.* 35, 1939-1947.
- | **Guía de Implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas** (2012). Gobierno de Honduras. <http://www.sn-vworld.org/es/countries/honduras/news/guia-implementacion-de-sistemas-de-biodigestion-en-ecoempresas>
- | **Hansen L. Conly, Cheong Daen Yeol.** 2007. Agricultural waste management in food processing, *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery.* pp. 609-661.
- | **Hill, J., Nelson, E. Tilman, D., Polasky, S. & Tiffany, D.** 2006. "Environmental economic and energetic cost and benefits of biodiesel and ethanol biofuels". *Proc. Natl Acad Sci*, 103, 1206-11210.
- | **Holm-Nielsen J.B., Seadi T. A., Oleskowicz-Popiel P.** 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* (100) 5478-5484.
- | **Holm-Nielsen JB, Oleskowicz-Popiwedel P. The future of biogas in Europe: visions and targets until 2020.** Bioenergy department, University of Southern Denmark 2008; p. 8.
- | **International Energy Agency (IEA)** 2006. Statistics. <http://www.iea.org/stats/index.asp>
- | **Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2006** (INEGEI) http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/inegei_res_ejecutivo.pdf
- | **Ionel I., Cioabla A.E.** 2010. Biogas production based on agricultural residues. From history to results and perspectives. *Wseas Transactions on Environment and Development.* Issue 8, Volume , 591-603.
- | **Jørgensen, K., Jensen, L.S.**, 2009. Chemical and biochemical variation in animal manure solids separated using different commercial separation technologies. *Bioresour. Technol.* 100, 3088-3096.
- | **Kranert M., Kusch S., Huang J., Fischer K. Anaerobic digestion of waste. Green Energy and Technology. Waste to Energy: opportunities and challenges for developing and transition economies.** 2012.
- | **Lettinga G., Rebac S., Zeeman, G.** (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in biotechnology.* (19) 363-370.

- | **Liu, W., Yang, Q., Du, L.**, 2009. Soiles cultivation for high-quality vegetables with biogas manure in China: feasibility and benefit analysis. *Renew. Agr. Food Syst.* 24, 300-307.
- | **Marañón E., Salter A.M. Castrillón L., Heaven S., Fernández-Nava.** 2011. Reducing the environmental impact of methane emissions from dairy farms by anaerobic digestion of cattle waste. *Waste Management* (31) 1745-1751.
- | **Mariscal Landín, Gerardo.** 2007. FAO. Tratamiento excretas de cerdos. www.fao.org/wairdocs/LEAD/X6372S/x6372s08.htm
- | **Masera y Col.** 2006. La Bioenergía en México, un catalizador para el desarrollo sustentable, México: Red Mexicana de Bioenergía-CONAFOR Editado por Mundi-empresa.
- | **Massé D., Tabpt 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, 436-445.
- | **Massi E.** 2012. Anaerobic Digestion. *Green Energy and Technology*. Springer-Verlag London. DOI. 10.1007/978-1-4471-2369-9-3.
- | **Mata-Alvarez J., Macé S., Llabrés P.** 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource technology* 74, 3-16.
- | **Neumann K., Verburg P., Elbersen B., Sthefest E., Woltjer G.** 2011. Multi-scale scenarios of spatial-temporal dynamics in the European livestock sector. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (140) 88-101.
- | **Ostrem K** (2004) Greening waste: anaerobic digestion for treating the organic reaction of municipal solid wastes. M.S. thesis, Columbia University, New York, NY.
- | **P. Bajpai** (2017). Chapter 2. Basics of anaerobic digestion process. In: *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry*, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-981-10-4130-3_2
- | **Pampillón-González, L.** (2014). Biodigestores en el sector agropecuario de México: aprovechamiento de los lodos. Centro de Investigación y de Estudios Avanzado del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). Tesis doctoral. México, D.F. pp. 137

- | **Park, S.K., Jang, H.M., Ha, J.H., Park, J.M.**, 2014. Sequential sludge digestion after diverse pre-treatment conditions: Sludge removal, methane production and microbial community changes. *Bioresource Technology*. 162, 331-340.
- | **Penz A.** (2000). Efecto de la nutrición en la cantidad y en la calidad de los desechos de los cerdos. Duodécimo ciclo de conferencias sobre aminoácidos sintéticos. FERMEEX. México. D.F. 22 septiembre pp. 1-23
- | **Pérez, R.** 1999. Porcicultura Intensiva y Medio ambiente en México. *Revista mundial de Zootecnia*. FAO corporate document repository, Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM.
- | **Poeschl, M., Ward S., Owende P.** (2010). Prospect for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Review*. Volume 14. 1782-1797.
- | **Pohland F., Malina J.** (1992). Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Lancaster, Technomic Pub. Co. Harvard (18a ed.)
- | **Rios M., Kaltshmitt M.** 2013. Bioenergy potential in Mexico –status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conv. Bioref.* (3) 239-254.
- | **Rocchietti S.** (2005). El “trans” de Transdisciplina. Revisado en www.con-versiones.com/nota0191.html
- | **SAGARPA-FIRCO** (2007). Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Mayo 2007.
- | **Sänger, D., Geisseler, B., Ludwig, B.**, 2011. Effect of moisture and temperature on greenhouse gas emissions and C and N leaching losses in soil treated with biogas slurry. *Biol. Fert. Soils* 47, 249-259.
- | **Scaglia B., D’Imporzano G., Garuti G., Negri M., Adani F.** 2014. Sanitation ability of anaerobic digestion performed at different temperature on sewage sludge. *Science of total Environment*. (466-467) 888-897.
- | **SENER.** 2006. Energía renovables para el desarrollo Sustentable de México. Secretaría de Energía. GTZ.
- | **Servicio de información agroalimentaria y pesquera** (2012). Recuperado de: http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/integracion/EstadisticaBascia/Pecuario/PoblacionGanadera/ProductosEspecie/Porcino.pdf

- | **Speece, R.** (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Env. Sci. Technol* (17).
- | **Tauro R., Serrano-Medrano M., Masera O.** (2018). Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environment Policy* (7)1528-1539. DOI: 10.1007/s10098-018-1529-z
- | **Taricksa J., Long D.A., Chen P. J., Hung Y., Zou S.** Anaerobic digestion. *Handbook of Environmental Engineering, Volume 8: Biological Treatment Processes.* The Humana Press, Totowa, NJ. 2007.
- | **Tchobanoglus G., Schorodoeder** (1985). *Water quality: Characteristics, modeling, modification.* Addison-Wesley, Reading. M.A.
- | **Van Haandel A, van der Lubbe J** (2007) *Handbook biological wastewater treatment.* Retrieved 13 Oct. URL: http://www.wastewaterhandbook.com/documents/sludge_treatment/831_anaerobic_digestion_theory.pdf
- | **Weber B, Torres Bernal M, Pampillón-González L.** Producción de Biogás en México: Estado actual y perspectivas. Cuaderno temático No.5 2012. ISBN 978-607-96084-1-5.
- | **Wereko-Brobby y Hagen,** (1996). *Biomass conversion and technology.* Wiley. pp. 203
- | **Xia, Y., Masse, D.I., McAllister, T.A., Kong, Y.H., Seviour, R., Beaulieu, C.,** 2014. Identity and diversity of archaeal communities during anaerobic co-digestion of chicken feathers and other animal wastes. *Bioresource Technology.* 110, 111-119.
- | **Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T.R., Sangeeta K., Rana V.** 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review. *Bioresource Technology* (95) 1-10.
- | **Zeeman G., Palenzuela A., R., Sanders W., Miron Y., Lettinga G.** 1999. Anaerobic hydrolysis and acidification of lipids, proteins and carbohydrates under methanogenic and acidogenic conditions. In: Mata-Alvarez, J. Tilche, A., Cecchi, F. (Eds) *Proceeding of the Second International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Wastes,* Barcelona. Vol.2 Gráficas 92,15-18 June. pp.21-24.

Comprometidos con el medio ambiente, recomendamos usar las hojas del reverso del manual para realizar las notas del curso.



Difusión y Divulgación
Científica y Tecnológica

José Manuel Piña Gutiérrez

Rector

Raúl Guzmán León

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Andrés González García

Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

Caliope Bastar Dorantes

Jefa del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas

Esta obra se terminó de editar el 23 de octubre de 2019, en la División Académica Ciencias Biológicas, ubicada en Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya. CP. 86150. El cuidado estuvo a cargo de los autores y del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas de la Dirección de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica de la UJAT.



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

PFCE

PROGRAMA DE FORTALECIMIENTO
DE LA CALIDAD EDUCATIVA

C O L E C C I Ó N
J O S É N . R O V I R O S A

Biodiversidad, desarrollo sustentable y trópico húmedo