



Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México

Rebeca Rojas Remis** / Leopoldo G. Mendoza Espinosa***

Use of biosolids for energetic recovery in Mexico

Utilização de biosólidos para a recuperação energética no México

RESUMEN

El aumento de la población en México ha hecho que se incremente la red de agua potable y drenaje; ello ha dado lugar a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que ha implicado mayor tratamiento de agua residual y, a su vez, un incremento en la cantidad de lodos residuales producidos. Los lodos residuales representan un problema ambiental por las cantidades, volúmenes y contaminación que generan; sin embargo, pueden aprovecharse para producir energía eléctrica por medio de sistemas de digestión anaeróbica; tan solo en México se generan alrededor de 640.000 toneladas anuales de lodos residuales. El alcance del presente artículo es realizar un análisis desde un punto de vista interdisciplinario a escala mundial sobre la utilización de biosólidos para la producción de energía y que sirva como base para el desarrollo de proyectos de esta índole en México.

Palabras clave: lodos residuales, gas metano, digestión anaeróbica, generación de energía.

*Artículo derivado del proyecto de tesis doctoral "Potencial de recuperación energética empleando biosólidos como materia prima en Ensenada, B.C." elaborado entre febrero de 2011 y agosto 2012. **Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. ***Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, Baja California, México.

Correspondencia: Rebeca Rojas Remis, e-mail reberemis@hotmail.com

Artículo recibido: 05/09/2012; Artículo aprobado: 21/11/2012

ABSTRACT

The population increase in Mexico has demanded an increase of the drinking water and sewer nets. This has brought the construction of waste water treatment plants (WWTP), a fact that has generated more waste water treatment and, at the same time, an increase of the waste sludge produced. Waste sludge is an environmental problem given the quantities, volumes and contamination it generates. Sludge can be used to produce electric energy, though, by the use of anaerobic digestion systems. For instance Mexico alone generates about 640.000 tons of waste sludge a year. The scope of this article is to analyze from an interdisciplinary viewpoint, at a world scale, the use of biosolids to produce energy and be the basis to develop such type of projects in Mexico.

Key words: Waste sludge, methane gas, anaerobic digestion, energy generation.

RESUMO

O aumento da população no México fez que se incremente a rede de água potável e drenagem; isso deu lugar à construção de plantas de tratamento de águas residuais (PTAR), o que implicou maior tratamento de água residual e, a sua vez, um incremento na quantidade de lodos residuais produzidos. Os lodos residuais representam um problema ambiental pelas quantidades, volumes e contaminação que geram; no entanto, pode aproveitar-se para produzir energia elétrica por meio de sistemas de digestão anaeróbia; tão só em México se geram ao redor de 640.000 toneladas anuais de lodos residuais. O alcance do presente artigo é realizar uma análise desde um ponto de vistas interdisciplinares a escala mundial sobre a utilização de bio-sólidos para a produção de energia e que sirva como base para o desenvolvimento de projetos desta índole em México.

Palavras importantes: lodos residuais, gás metano, digestão anaeróbia, geração de energia.

INTRODUCCIÓN

Al igual que el resto del mundo, la crisis del agua en México se debe, entre otras cosas, al incremento y concentración de la población. El desarrollo económico del país ha permitido el crecimiento de las redes de agua potable y drenaje¹, y un aumento en la construcción de PTAR que permiten tratar las aguas residuales hasta niveles aceptables. Es de esperarse que el empleo de estas aguas en la agricultura, riego de parques y jardines, y recarga de acuíferos vaya en aumento.

En el 2011 se generaron 6.7 mil millones de de aguas residuales, y se espera que en 20 años el volumen de agua tratada sea de 9.2 mil millones de m³. Esto implica que la generación de lodos residuales se incremente de 640.000 toneladas para 2011 a 880.000 toneladas para el 2030¹.

Se les llama lodos residuales a los sólidos remanentes del proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales, que son removidos para que el agua pierda sus propiedades contaminantes y pueda volver a utilizarse². Los lodos residuales también deben ser tratados para eliminarlos o transformarlos, y para que sus elementos contaminantes no representen un riesgo a la salud o al ambiente. Por ello, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales no solo contemplen cómo tratar el agua sino también deben explicar qué hacer con los lodos residuales generados³.

Los lodos residuales son un problema por el costo adicional de tratamiento que implican, los volúmenes y las cantidades que se generan, así como por su composición, ya que están constituidos principalmente por materia orgánica y por elementos contaminantes que fueron removidos del agua, tales como: metales pesados, material inorgánico y contaminantes emergentes (productos de limpieza, plaguicidas, medicamentos y productos de cuidado personal). Asimismo, son un problema debido a los gases que desprenden como producto de su descomposición, los malos olores, y las bacterias y demás microorganismos patógenos que pueden llegar a generar. De ahí que los lodos residuales, a su vez, deban ser tratados para eliminar, disminuir o transformar estos elementos y que no representen un riesgo para la salud ni el medio ambiente⁴.

Sin embargo, el problema generalizado con respecto al manejo de lodos residuales radica en que estos no son considerados un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos y, por lo tanto, ni se controlan ni se tratan adecuadamente, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública de las ciudades⁵.

Existen diferentes tratamientos para lodos residuales que se utilizan con la finalidad de reducir su volumen y estabilizarlos, es decir, que los lodos pierdan sus propiedades contaminantes y que puedan ser reutilizados o aprovechados. Una vez que los lodos se encuentran estabilizados son denominados biosólidos y pueden ser aprovechados con diferentes propósitos: composta, fertilizantes, mejorador de suelos, reutilización en procesos industriales y producción de energía eléctrica⁶.

En el *Atlas global para el manejo de la excreta, lodos residuales y biosólidos*, publicado en el 2008 por United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) y la Comisión Canadiense del manejo de lodos, se especifica que los países desarrollados usualmente invierten en infraestructura para la reducción y estabilización de lodos, cuentan con un control sobre su cantidad y calidad, así como de su disposición final y/o aprovechamiento. En contraste, los países en vías de desarrollo no consideran los lodos residuales como un residuo a tratar, lo que da como resultado una nula inversión en infraestructura para su tratamiento y no cuentan con un control y datos estadísticos sobre las cantidades generadas y su disposición final⁷.

Es importante mencionar que, en promedio, los países desarrollados utilizan un 15% de los biosólidos generados para la recuperación energética por medio de digestores anaeróbicos. La energía producida es utilizada para abastecer de energía eléctrica al propio sistema de digestión así como los requerimientos energéticos de la PTAR donde se encuentra instalado el sistema de digestión anaeróbica⁵.

La conveniencia para la implementación de un sistema de biodigestión anaeróbica radica en que reduce en un 24% el volumen de lodos residuales y produce un 25% adicional de energía, por lo que representa una reducción del 30% en el costo anual de manejo y disposición de lodos residuales, el cual se estima es de aproximadamente el 45% del gasto anual de una PTAR⁸.

La percepción social que existe sobre el manejo y aprovechamiento de los lodos residuales es importante debido a que las PTAR suelen encontrarse instaladas cerca de zonas habitadas, por lo que en la realización de proyectos de utilización de lodos residuales y biosólidos, se deben llevar a cabo reuniones con la comunidad para hacerla partícipe y que conozca sobre las bondades de su reciclaje, su reutilización⁹ y los beneficios sociales y ambientales que este tipo de proyectos implican.

La Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency EPA) incluye en sus programas de reuso de biosólidos pláticas de concienciación a la comunidad sobre la importancia de reciclar y reutilizar los biosólidos, y ha establecido, en su normativa, que cualquier proyecto de esta índole debe involucrar a la comunidad que será beneficiada con la finalidad de que conozca del tema y forme parte del proyecto.

Manejo de lodos residuales

Diversos autores concuerdan con Snyman¹⁰ en que la disposición y/o aprovechamiento final de los lodos residuales implica un reto económico y de ingeniería, puesto que el volumen y las cantidades que se generan involucran tanto la inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reduzcan su volumen y los estabilicen con la finalidad de reducir o eliminar sus propiedades contaminantes.

Existen diferentes tratamientos para reducir el volumen y estabilizar los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en un producto que pierde sus propiedades contaminantes y así poder ser reutilizados.

Los tratamientos para la reducción de volumen son deshidratación e incineración. El problema con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce en un 20% el volumen mientras que la incineración, si bien reduce el volumen en un 80% y elimina los compuestos orgánicos tóxicos, destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante; además, el proceso genera gases de efecto invernadero (GEI), provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación⁷.

Por su parte, los procesos para la estabilización de lodos residuales son: digestión aeróbica (en donde las bacterias aeróbicas consumen la materia orgánica), digestión anaeróbica (en el cual la materia orgánica es consumida por bacterias anaeróbicas y es posible generar energía eléctrica mediante la utilización del biogás producido durante la digestión) y tratamiento químico (que generalmente consiste en añadir cal a los lodos provocando fermentaciones ácidas que evitan la proliferación de microorganismos).

En los tres casos anteriores la estabilización está enfocada a eliminar o disminuir la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, otros compuestos como metales pesados, plaguicidas y material inorgánico seguirán presentes, por lo que es importante someter los lodos residuales resultantes (biosólidos) a un análisis para determinar si son un residuo peligroso o no y así determinar el tipo de manejo y disposición final adecuado¹¹.

Con base en lo anterior se han desarrollado propuestas para generar novedosas formas de reutilización y aprovechamiento de los biosólidos como: producción de biodiésel¹² y utilización como materia prima para construcción de carreteras y edificios⁵.

Aunque en los países en vías de desarrollo no se tienen controles estrictos de los lodos residuales generados y de su manejo y disposición, se han realizado proyectos de investigación que implican el análisis de calidad de lodos y elaboración de propuestas para lograr su estabilización y aprovechamiento benéfico, principalmente como fertilizante de cultivos agrícolas y mejorador de suelos⁷. No obstante que en América Latina se han generado proyectos a menor escala para la reutilización de biosólidos como materia prima para la producción de energía, no se cuenta con datos oficiales sobre las cantidades utilizadas y la cantidad de energía eléctrica producida y su utilización final.

Lodos residuales en México

Tan solo en México se estima que los lodos residuales generados por las 2.029 PTAR que tratan el 37% de las aguas residuales que se captan en el sistema de drenaje ($88 \text{ m}^3/\text{s}$)¹ es entre 640.000 y 10 millones de toneladas por año¹³. Tal discrepancia se debe a que en ocasiones la cantidad reportada está en peso seco y en otros casos no se menciona el contenido de humedad, de tal suerte que no existe un dato oficial sobre la cantidad de lodos residuales y biosólidos generados.

Adicionalmente los reportes no incluyen información sobre el tratamiento que reciben los lodos residuales, su disposición y/o aprovechamiento final.

De acuerdo con Jiménez y Wang¹⁴, de las 640.000 toneladas de lodos residuales que se generan, el 51% es estabilizado mediante digestión anaeróbica; sin embargo, no se recupera el biogás generado durante este proceso, ya que el 76% de los lodos residuales, independientemente de su tratamiento, es depositado como relleno a cielo abierto.

Como se muestra en la tabla 1, México y otros países de América Latina en comparación con otros países desarrollados no lleva un control sobre la cantidad de lodos que se generan, los tipos de tratamiento y la disposición final que cada PTAR utiliza.

Tabla I. Generación de lodos residuales/biosólidos en México y el mundo y su aprovechamiento para la recuperación energética⁵

País	Lodos/biosólidos generados (millones Ton/año).	Cantidad depositada como relleno en tierra (%).	Cantidad utilizada para recuperación energética (%).
Estados Unidos	7.2	15	5
Canadá	0.550	17	7
Unión Europea	9.2	18	23
China	2.9	34	0
Japón	2.0	20	5
Brasil	0.48	45	0
México	0.640	76	0

Impacto ambiental generado por los lodos residuales

La descomposición de los lodos residuales depositados como relleno en tierra a cielo abierto genera dióxido de carbono y metano¹⁵ considerados como los principales gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, otro efecto de contaminación por mal manejo de lodos residuales es la generación de olores¹⁶, riesgos ambientales y posibles riesgos a la salud al ser utilizados como fertilizantes agrícolas. Paradójicamente, al ser más estrictos los controles de tratamiento de aguas residuales, es mayor la cantidad de contaminantes que se encuentran en los lodos residuales¹⁷. Por ello, como parte del tratamiento de las aguas residuales se tiene que considerar el tratamiento de sus lodos para que de esta forma se reduzca la contaminación ambiental que pudieran generar y se incremente su calidad con la finalidad de poder ser aprovechados de manera benéfica.

La composición de los gases emitidos por la descomposición de los lodos residuales llamado biogás está compuesta de 40%-75% gas metano, 25%-40% dióxido de carbono y en menor cantidad otros gases como , N, O, H, CO y vapor de agua^{18, 19}. En el caso del gas metano, en comparación con el dióxido de carbono, es 23 veces más eficaz para capturar el calor de la atmósfera. Sin embargo, su aprovechamiento permite disminuir en menor tiempo el impacto ambiental pues su vida atmosférica es de solamente 12 años como se puede ver en el tabla 2, por lo que su aprovechamiento para producir energía es el medio más efectivo para disminuir el calentamiento global a corto plazo, además de poder ser utilizado como fuente de energía renovable (biocombustible)²⁰.

De acuerdo con la EPA y la Asociación Methane to Markets en 2005 las emisiones mundiales de gas metano (CH₄) fueron equivalentes a 6.407 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) de las cuales el 60% provienen de fuentes antropogénicas siendo las más contaminantes Estados Unidos, China, Unión Europea, Rusia, India, Brasil, México, Ucrania e Indonesia, responsables de casi la mitad de todas las emisiones antropogénicas mundiales de metano.

La reducción de emisiones de metano tiene beneficios energéticos, ambientales y económicos, puesto que constituye una fuente de combustible renovable para la recuperación energética mejorando la calidad ambiental de las comunidades locales cercanas a las PTAR²⁰.

Tabla 2. Gases de efecto invernadero (GEI) y su potencial de calentamiento^{20,21}

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento (-eq)*	Años de vida en la atmósfera (años)
CO ₂	1	200 a 450
CH ₄	23	12 a 15

*Unidad de medición utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los GEI en comparación con el CO₂

Emisión de GEI por lodos residuales en México

Las actividades relacionadas con las aguas residuales generan a escala mundial el 9% del gas metano emitido a la atmósfera. Se estima que México emitió 4.637 millones de toneladas en 2006 de las cuales el 13.5% se debió a las actividades relacionadas con aguas residuales municipales²², dando como resultado que el promedio de emisión para el país fuese de 1.767 kg de CH₄ por habitante por año²³. Por su parte, de acuerdo con el Protocolo de Kyoto²⁴ las emisiones de CO₂ en México fueron 4.032 millones de toneladas, de las cuales el 6.8% fue por actividades relacionadas con el tratamiento de aguas residuales²¹.

Las emisiones de metano se han incrementado en una tasa promedio anual del 2%. De 1990 a 2006 se incrementó en un 56% el tratamiento de aguas residuales municipales²² lo que produjo un aumento del 215.5% en las cantidades de lodos residuales generados. Dicho aumento se debió al volumen de aguas residuales tratadas en nuestro país y a las nuevas políticas públicas establecidas con la finalidad de eliminar eficientemente la materia orgánica y contaminantes presentes en el agua²¹. Sin embargo aún no se ha considerado incluir en las PTAR sistemas de digestión anaeróbica que permitan la recuperación del gas metano para su aprovechamiento como biocombustible, ya sea para uso doméstico o como fuente para la producción de energía eléctrica.

En total, los tratamientos de digestión anaeróbica, aeróbica, composteo y deposición de lodos residuales como relleno en tierra a cielo abierto contribuyeron con el 10.5% de los GEI generados en el país en 2007²³.

En este sentido, México tiene la oportunidad de adoptar y generar tecnología para el aprovechamiento de lodos residuales y su recuperación energética disminuyendo la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera y producir energía eléctrica renovable.

La recuperación de energía por medio de digestión anaerobia

Uno de los métodos para lograr la estabilización de lodos residuales es la digestión anaeróbica, la cual se realiza en ausencia de oxígeno y genera biogás (gas compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y nitrógeno), el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica^{25,26}.

A su vez, los sistemas de digestión anaeróbica son eficientes para la reducción de volumen de los lodos residuales y la carga orgánica que contienen. Sin embargo, existen inconvenientes como inversión inicial, mantenimiento del equipo, control estricto de los parámetros de digestión y operación por personal capacitado que hay que considerar para hacer eficiente el sistema y lograr el aprovechamiento óptimo del biogás producido.

También es posible generar energía eléctrica por medio de la implementación de digestión anaeróbica como parte del tratamiento secundario utilizado en las PTAR, como es el caso de la PTAR de León, Guanajuato que inició operaciones en mayo de 2011. Esta PTAR cuenta con un sistema de cogenera-

ción para la producción de energía y la utilización del calor producido durante la digestión. La energía producida será suficiente para satisfacer el 75% de la demanda energética de la PTAR para operar. La inversión realizada se pretende recuperar en los próximos 10 años.

Digestores anaeróbicos para el tratamiento de lodos residuales

Tradicionalmente los digestores anaeróbicos se pueden dividir en digestores de primera generación, de segunda generación y de tercera generación.

Los de primera generación son los que más comúnmente se utilizan por sus bajos costos de inversión y operación, e incluyen: laguna anaeróbica, tanques sépticos, modelo hindú, modelo chino de mezcla completa sin recirculación, y de mezcla completa con recirculación^{19,27}.

Los digestores anaeróbicos de segunda generación son: filtro anaeróbico, manto de lodo granular, de circulación interna, híbrido, flujo de pistón horizontal, y geomembrana^{19,27}.

Por último, se encuentran los digestores anaeróbicos de tercera generación los cuales se clasifican en lecho fluidizado y de manto de lodo granular expandido^{19,27}.

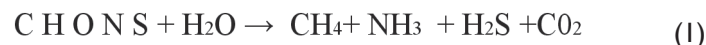
Independientemente del distinto funcionamiento de los digestores anaeróbicos, existen configuraciones (construcción de los reactores de biodigestión) que afecta los parámetros y la forma de operación. Tradicionalmente los digestores anaeróbicos en Estados Unidos y Canadá son de forma cilíndrica y están construidos en concreto; la dimensión del cilindro dificulta el mezclado y la distribución uniforme del calor. La construcción típica está basada en un cilindro inferior y un cilindro con terminación cónica en la parte superior que generalmente es móvil (también llamados reactores de campana flotante).

Los digestores europeos son una mezcla entre los digestores norteamericanos y los típicos europeos. Son tanques totalmente cerrados con base cilíndrica y la parte superior termina en forma de botella (similar a los tanques para acumular agua en las casas). Las ventajas de este tipo de digestor son: es más económico y la distribución del calor es uniforme.

El digestor en forma de "huevo" es una versión mejorada del digestor europeo, está construido en concreto mejorado tecnológicamente, y ofrece un funcionamiento en condiciones óptimas, pues permite la distribución uniforme de calor; disminuye la acumulación de lodos no digeridos y es más eficiente en la extracción de los biosólidos¹⁹.

Proceso de digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica está caracterizada por contar con diferentes fases durante su proceso de degradación de los lodos residuales; estas fases son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis²⁷. La ecuación general que define el proceso de biodegradación de los lodos es (ecuación 1):



Estas cuatro fases se presentan en toda digestión anaeróbica la cual se puede realizar mediante dos procesos: mesofílico y termofílico. El proceso mesofílico se lleva a cabo a temperaturas entre los 25-37°C y se puede manejar mediante digestión anaerobia de una etapa (solamente con un digestor) o de dos etapas (dos digestores uno para la etapa de acidogénesis y otro para la etapa de metanogénesis), ya sean de flujo continuo o por lote. Los biosólidos que se obtienen como resultado del proceso mesofílico con un tiempo de retención de 15 días a una temperatura entre 35-45°C o 60 días a 20°C, son de Clase B según la NOM-004-SEMARNAT-2002²⁸, debido a que la remoción de patógenos y coliformes fecales es baja^{14,29}.

El proceso termofílico se realiza a temperaturas entre los 38-65°C con un tiempo de retención de 20-22 días, ya que la temperatura genera mayores reacciones bioquímicas y permite que la digestión se realice en menor tiempo, utilizando digestores de menor tamaño y se obtienen biosólidos Clase A^{14,30}. El problema que se presenta con este tipo de proceso es que requiere de mayor energía para mantener la temperatura, desprende olores, es inestable y el tiempo para su estabilización al inicio de la operación puede llegar a ser de varios meses²⁹.

Cualquiera de los dos procesos anaeróbicos genera en menor o mayor cantidad biogás, y su producción dependerá de las condiciones y parámetros de operación del digestor anaeróbico que se muestran en el tabla 3, los cuales hay que controlar para garantizar no solo la producción de biogás, sino la estabilidad del digestor y la calidad de los biosólidos que se obtengan como resultado.

Tabla 3. Condiciones y parámetros de operación del digestor anaeróbico^{27, 29, 31, 32}

Condición.	Parámetro.
pH neutro	6.8-7.2
Temperatura mesofílica	25-35°C
Temperatura termofílica	37-65°C
Tiempo de retención (TRH)	15-27 días
Sólidos Volátiles (SV)	7-12%
Relación C/N*	20:1-30:1

*Relación carbono-nitrógeno en la mezcla de lodos en digestión.

El tiempo de retención de los lodos residuales en el digestor es importante, ya que mientras mayor sea este, mayor será el porcentaje de recuperación del biogás. De esta manera se tiene que para un tiempo de retención de 15-25 días se obtiene el 75-80% de recuperación, mientras que de 30-60 días se logra un 95-100% de recuperación del potencial de generación de biogás para la cantidad de lodos digerida^{19,31}.

De acuerdo con el trabajo de Agler³³ el tiempo de retención óptimo para lograr una producción de biogás constante es entre 12-32 días con una temperatura máxima de 42°C y mínima de 22°C. En el caso de que el sistema de digestión anaeróbica sea de flujo continuo (alimentación diaria de lodos residuales) el biogás producido tiene menor cantidad de CH₄. Si la operación del sistema de digestión anaeróbica es tipo "batch" o por lote (alimentación de una sola vez de lodos residuales) el contenido de CH₄ en el biogás es mayor.

En los dos sistemas (flujo continuo y por lote), las características de los biosólidos obtenidos son las mismas, y el tiempo de retención y la temperatura son igualmente importantes para la producción de biogás; sin embargo, el sistema de digestión por lote es más estable y tiene un mayor rendimiento debido a que la agitación de los lodos es intermitente, por lo que se logra una mayor degradación.

El tiempo de retención mínimo para que se obtenga biogás es de 20 días a una temperatura interna de 37.5°C y el máximo potencial de generación de biogás se logra a los 40 días a la misma temperatura³⁴. Por ello, el tiempo de retención para extraer el máximo biogás de la fermentación de lodos es de 40 días. Para las PTAR esto puede representar un problema, ya que la cantidad de lodos generados es usualmente alta y continua, y no se pueden tener los lodos almacenados más de 20 días³⁵; un almacenamiento mayor implicaría un aumento en el tamaño de los digestores, del sistema y, por lo tanto, una inversión mayor.

En el caso del biogás obtenido a partir de la digestión anaeróbica de lodos residuales el contenido es del 60% al 70%^{31, 30, 34, 36} cantidad que se verá afectada por las condiciones y parámetros mencionados en la tabla 3.

El biogás es un gas biocombustible, limpio y barato, por lo que puede utilizarse como fuente para la generación de energía eléctrica²⁶. De acuerdo con el reporte técnico de Infantes³⁷, el potencial de generación de biogás es de 0.31 m³ por kilogramo de lodos residuales, por lo que 1 m³ de biogás tiene el potencial de generación de 5.5-6 kilowatt hora (Kwh)³⁸; el potencial de generación de energía eléctrica dependerá del porcentaje de gas metano que contenga el biogás³⁷.

Para aprovechar mejor el biogás como fuente para la producción de energía eléctrica, es necesario limpiar el biogás, quitando principalmente el contenido de CO₂ y de H₂S, con la finalidad de obtener CH₄ casi puro y aumentar la eficiencia energética. El potencial de generación de 1 m³ de CH₄ es de 9.8-10.4 Kwh .

De acuerdo con la información anterior, el empleo de biogás libre de impurezas tendría el potencial de producir suficiente energía para abastecer los requerimientos del propio sistema de digestión anaeróbica y los requerimientos energéticos de una PTAR con capacidad de 500 litros por segundo y un gasto energético anual promedio de 350,000 kwh.

En la tabla 4 se realizan los cálculos para la producción de energía eléctrica de acuerdo con los diferentes procesos mediante los cuales se puede llevar a cabo la digestión anaeróbica, considerando el tiempo de retención como características principal para la obtención de biogás/metano.

Tabla 4. Procesos de digestión anaeróbica y su eficiencia para la producción de biogás y potencial de generación de energía eléctrica^{14, 29, 31, 39}

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Biogás por m ³ de lodos (m ³)	Metano por m ³ de biogás (%)	Energía producida biogás (Kwh)	Energía producida metano (Kwh)	Energía generada por una PTAR de 500 lps (kwh/mes)
Mesofílico	25-37	15-25	0.31	60-65	5.5-6	9.8-10.4	335,430
Termofílico	38-65	20-30	0.36	65-70	5.5-6	9.8-10.4	400,838

Diseño de tanques digestores anaerobios

El diseño de los reactores o digestores anaeróbicos depende del tiempo requerido para que los lodos residuales sometidos a digestión se estabilicen, reduzcan su volumen y generen el máximo potencial de biogás. Por ello es necesario considerar el tiempo de retención suficiente como parte del diseño de los tanques reactores y controlar las condiciones y parámetros (presentados en la tabla 3) que intervienen durante su operación¹⁹.

En el caso del diseño de digestores anaeróbicos con flujo continuo o semicontinuo se requiere determinar la tasa de carga de lodos residuales (B_v), el tiempo de retención deseado TR (días) para alcanzar la producción máxima de biogás, la cantidad diaria de lodos que se desean digerir Q (m³ /d), la concentración de sólidos volátiles por metro cúbico de lodos (kg/m³) y V el volumen del tanque reactor m³ ¹⁹ (ecuación 2).

$$B_V = \frac{QC_0}{V} = \frac{C_0}{TR} \quad (2)$$

Para determinar el volumen⁴⁰ (ecuación 3):

$$V_D = C_f \text{ (L/día)} \times TR \text{ (días)} \quad (3)$$

Donde V_D es el volumen del digestor (m^3), C_f la cantidad diaria de lodos residuales y TR el tiempo de retención deseado.

Para el diseño de digestores anaeróbicos tipo “batch” o por lote, la consideración a tomar es que el volumen total del digestor debe ser suficiente para contener la cantidad de lodos residuales que quieren fermentar y considerar que el 25% del volumen debe ser ocupado por los lodos residuales y dejar un 75% de espacio para albergar el biogás producido³⁴.

Para el diseño de digestores anaeróbicos ya sean de flujo continuo o por lote, debe considerarse que para obtener la cantidad de biogás máxima producida la mezcla del sustrato debe de tener entre un 11-13% de fase sólida; el resto debe ser fase líquida y considerar que el factor de producción de biogás para un tiempo de retención de 25 días es de 1.65 (Q/V); el volumen de biogás producido por día está expresado³⁴ en la ecuación 4:

$$V_B = Q/V \times V \text{ (m}^3\text{)} \quad (4)$$

Sistema para generación de energía eléctrica

Un sistema de digestión anaeróbica puede ser de una etapa o de dos etapas. Los sistemas más convencionales para la digestión de lodos residuales son los de dos etapas debido a que en el primer tanque los lodos residuales permanecen menor tiempo durante la fase de hidrólisis y acidogénesis, y un segundo tanque para las fases de acetogénesis y metanogénesis³².

Posterior a la fase de digestión es necesario colocar filtros de CO_2 y de H_2S y eliminar el vapor de agua, con la finalidad de purificar el biogás para aumentar la obtención del porcentaje total de CH_4 , con la finalidad de potenciar la producción de energía eléctrica y de que los equipos donde se lleve a cabo la combustión del gas y la generación de energía eléctrica tengan mayor tiempo de vida. Además, el CO_2 inhibe la combustión, por lo que disminuye en un 50% la capacidad del motor donde esta se realice. Por su parte, el H_2S es sumamente corrosivo por lo que al no extraerlo del biogás e introducirlo en el motor de combustión el tiempo promedio de vida del equipo es de 4 meses a 1 año, dependiendo de la cantidad de H_2S que contenga el biogás⁴¹⁻⁴³.

Existen diversas tecnologías para la depuración del biogás pero la más utilizada es la del carbón activado, ya que es sencillo de utilizar y eficiente en su tasa de remoción⁴⁴.

Una vez que el biogás es depurado, se inyecta en un motogenerador, en turbinas de gas o microturbinas (para cualquiera de estos equipos la eficiencia de producción de energía eléctrica varía del 20-40% de eficiencia); se puede aumentar la eficiencia si se utilizan sistemas de cogeneración donde se combinen la producción de calor y electricidad⁴².

Para determinar el equipo adecuado a utilizar, es necesario calcular el potencial de generación eléctrica mediante la ecuación 5⁴³:

$$\eta = \frac{W}{Mb \times LHV} \quad (5)$$

Donde W es la potencia estimada del equipo, M_b el consumo de biogás o de metano (según este operando el sistema) del equipo, y LHV el poder calórico del biogás o del metano.

El diagrama del sistema de digestión anaeróbica que incluye el aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica se presenta en la figura 1, y un sistema de digestión anaeróbica con recuperación de biogás para generación de energía eléctrica está constituido por los siguientes equipos⁴⁰: tanque recolector: se mezcla el material de fermentación con agua, para obtener la proporción de mezcla deseada; reactor (digestor): las bacterias, al consumir la materia orgánica presente, producen biogás; depósito de gas: se acumula el biogás o el CH_4 ; tanque receptor: depósito para el lodo residual ya fermentado (biosólidos) que es desplazado por el biogás; filtros de CO_2 y de H_2S : localizados hacia el sitio de consumo o depósito de biogás; moto generador (motor que funciona con CH_4 y que hace girar un generador transformando la energía mecánica del motor en energía eléctrica), tablero de fuerza y control y tablero de distribución.

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en México existe un potencial de generación de energía eléctrica de 3.000 MW proveniente de la utilizando de biogás y de metano obtenido a partir de la digestión de residuos animales, residuos sólidos urbanos y tratamiento de aguas residuales (esta mediante la captura de los gases generados durante el sistema de tratamiento y de los lodos residuales resultantes)⁴⁵.

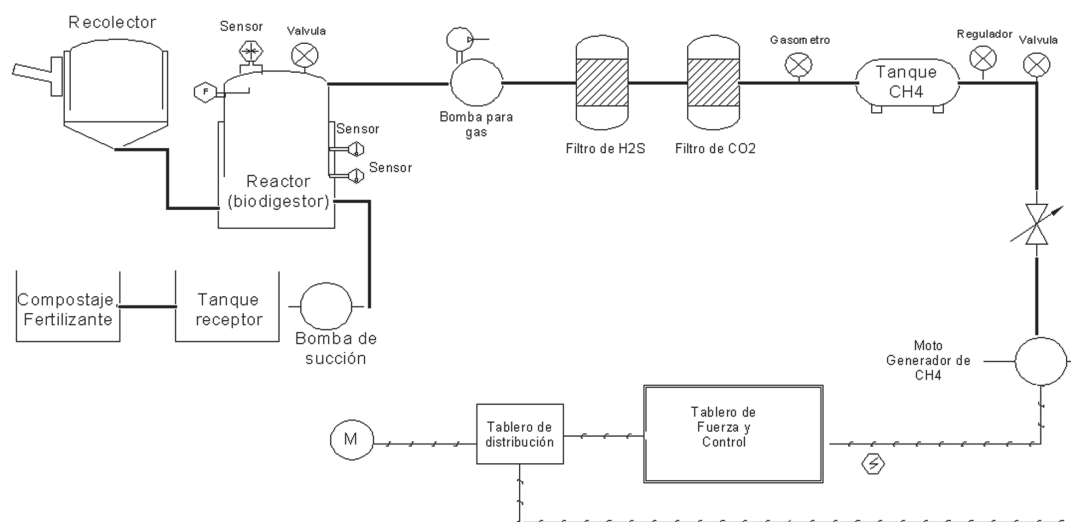


Figura 1. Sistema de digestión anaeróbica con depuración de biogás para producción de energía eléctrica a partir de la combustión del metano

Fuente: elaboración propia.

Factibilidad financiera de aprovechamiento de lodos residuales como fuente de energía

Como se mencionó con anterioridad, el tratamiento y disposición de los lodos residuales y biosólidos es un problema económico y serio en el mundo, que se incrementa proporcionalmente al crecimiento demográfico, por lo que implica un reto generar y encontrar formas de solucionar los problemas derivados de este residuo que sean innovadoras, costeables y eficientes principalmente porque en

un futuro las restricciones de calidad de los lodos serán mayores, por lo que el grado de tratamiento deberá ser mejorado⁴⁶.

Se calcula que en los Estados Unidos y en países desarrollados, la inversión necesaria para la instalación de un sistema de digestión anaeróbica es de aproximadamente \$2.1 millones de dólares⁴⁷, para una PTAR con capacidad de tratamiento de 1,000-30,000 litros por segundo⁴⁸.

De acuerdo con Rittman⁴⁹, el aprovechamiento del biogás producido por la digestión anaerobia de lodos residuales tiene beneficios económicos debido a que existe una reducción en los costos por manejo y disposición de los biosólidos (aprox. \$250 usd/ton/año) y una reducción en los gastos de energía eléctrica al utilizar el biogás como fuente de energía (aprox. \$12,000 usd/año) por lo que se considera que los ahorros anuales en los gastos de operación son entre 40-60%. Lo anterior implica que la inversión para una instalación típica se recupera en aproximadamente tres años en una PTAR de tipo estándar con una capacidad de tratamiento de entre 500-1,000 litros por segundo y una producción de 380 t/d de lodos residuales.

Como parte de la viabilidad económica para la instalación de un sistema de digestión anaeróbica con recuperación energética, se debe considerar que la producción mínima por hora de CH₄ debe ser de 5 m³⁵⁰.

Percepción social y riesgos a la salud

Los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales contienen, además de materia orgánica, metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, aceites, emulsiones, productos químicos y contaminantes emergentes (productos de limpieza, productos de cuidado personal y medicamentos) en diferentes cantidades⁵¹. De acuerdo con el tratamiento que reciban los lodos residuales será su capacidad de generar afectaciones a la salud humana. De acuerdo con Cardoso⁷ los lodos que reciben un tratamiento mediante la digestión anaeróbica son biosólidos de buena calidad, con concentraciones reducidas de materia orgánica, metales pesados y materia inorgánica, por lo que se reducen los riesgos a la salud.

La aceptación social para el aprovechamiento de los lodos residuales es importante, debido a que de esto depende su aceptación para ser reusado. De acuerdo con un estudio de percepción realizado en Estados Unidos en 2002⁹ el desconocimiento de la gente sobre la existencia de los lodos residuales y su rechazo a ser reutilizados han ocasionado que recientemente se haya acordado que los lodos residuales que pueden aprovecharse benéficamente se denominen “biosólidos”; esto con la intención de no ser tipificado como un residuo negativo.

En promedio, el 71% de los lodos residuales generados en países desarrollados recibe un tratamiento de estabilización; sin embargo, el 30% de estos biosólidos es depositado en vertederos o en rellenos a cielo abierto, lo que implica que, según Renner⁵², los residentes dentro de aproximadamente 1 kilómetro a la redonda de las PTAR y de donde se depositan lodos residuales o biosólidos se quejan de erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, y problemas pulmonares. También se encontró que los pobladores cercanos a las PTAR y vertederos de lodos/biosólidos son 25 veces más propensos a padecer enfermedades ocasionadas por microorganismos, dando lugar a padecimientos que van desde infecciones leves en la piel, hasta dermatitis aguda, asma e infecciones gastrointestinales.

Sin embargo, no solamente los residentes de las zonas aledañas a las PTAR y vertederos de lodos residuales/biosólidos tienen afectaciones a la salud; también los trabajadores de las mismas, ya que están expuestos directamente a compuestos orgánicos, metales pesados, compuestos inorgánicos y gases tales como dióxido de carbono, metano, y dióxido de azufre. Los trabajadores no solamente sufren de las afectaciones a la salud mencionadas, sino que el 38.4% de los trabajadores de los rellenos en tierra a cielo abierto de lodos residuales/biosólidos tienen una percepción del gusto y del olor incorrecta⁵³.

En el caso de los olores emitidos por las PTAR y los vertederos de lodos residuales y biosólidos; estos pueden disminuirse si los lodos residuales son digeridos de manera anaeróbica y se incorpora hierro a la mezcla de digestión, ya que el hierro al adherirse a las proteínas presentes en los lodos genera reacciones químicas internas que disminuyen la cantidad de compuestos orgánicos volátiles de azufre causantes del mal olor⁵⁴.

Aunque los efectos nocivos a la salud de los residentes pueden verse disminuidos por la incorporación de sistemas de digestión anaeróbica que estabilicen los lodos residuales y los aprovechen para la producción de energía, es importante que los residentes de las zonas donde se encuentran ubicadas las PTAR acepten que un riesgo seguirá existiendo, pues las instalaciones de los sistemas de digestión anaeróbica conllevan la producción y concentración de gases, que pueden ser explosivos.

La importancia de la percepción de la sociedad consiste en que conozcan el riesgo y que estén dispuestos a aceptar la construcción y operación de un sistema de digestión anaeróbica, que disminuirá los riesgos para su salud.

En el caso de México, el 76% de los lodos residuales y biosólidos es depositado en vertederos o rellenos a cielo abierto⁵⁵, que por lo general se encuentran en terrenos aledaños a las PTAR, por lo que implican un riesgo a la salud para los habitantes de la zona donde se encuentran ubicadas. Para evitarlo se requiere de inversión en infraestructura y de la generación de nuevas tecnologías que disminuyan las cantidades de lodos generados y que, además, los biosólidos resultantes tengan bajos contenidos de bacterias, microorganismos, contaminantes emergentes, y compuestos de azufre, con la finalidad de mitigar los efectos nocivos a la salud de los trabajadores, los habitantes contiguos a la PTAR y vertederos, y de los que aprovechen los biosólidos como fertilizante agrícola y composta.

Con la finalidad de generar nuevas tecnologías para el tratamiento del agua residual y de sus lodos, es necesario que se apoye la investigación y desarrollo tecnológico para aumentar la calidad del agua tratada y de los biosólidos para que puedan ser aprovechados en nuevos procesos productivos.

Aspectos legales del manejo de lodos residuales y biosólidos

La necesidad de regular el manejo de los lodos residuales, su tratamiento, aprovechamiento y disposición radica en la importancia de mitigar los efectos negativos al medio ambiente, efectos nocivos a la salud y riesgos al ser reutilizados o aprovechados de diversas formas.

En los últimos 10 años a escala mundial se ha incrementado en un 50% la producción de lodos residuales debido a las exigencias ambientales para el tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de disminuir los impactos ambientales al ser descargadas en cuerpos de agua³⁹.

En el caso de la Unión Europea desde 1992 se han emitido reglamentaciones con la finalidad de reutilizar los lodos residuales, lo cual generó que en 2006 se emitiera una ley general para la reutilización y aprovechamiento de los lodos residuales con la finalidad de promover entre los países europeos la elaboración de reglamentos locales que lograra obligar a las PTAR dar tratamiento de sus lodos residuales para ser aprovechados como biosólidos.

La implementación de esta ley y sus reglamentos particulares ha logrado que en al menos 7 países pertenecientes a la Comunidad Europea se haya reutilizado el 50% de sus lodos como fertilizante agrícola, mejorador de suelos y materia prima para fábricas de composta³⁹. Tales regulaciones consideran concentraciones y límites máximos permisibles de metales pesados, coliformes fecales, salmonella, huevos de helmintos, niveles de: toxicidad, reactividad, corrosividad, explosividad y presencia de agentes biológico-infecciosos, para lodos y biosólidos, y máximas cantidades permitidas para su aplicación en tierra u otro aprovechamiento.

En los Estados Unidos, la EPA se encarga de regular el manejo, tratamiento y disposición de los lodos residuales, así como de los biosólidos. También cuenta con estadísticas y datos sobre cantidades y tratamientos por PTAR, lo que hace que se tengan datos oficiales sobre su calidad, su aprovechamiento y su disposición final. Adicionalmente, la EPA establece los requisitos y procedimientos para cada uno de los diversos tipos de tratamientos, lo que implica que regule adecuadamente los sistemas de digestión anaeróbica y las condiciones bajo las cuales se genera energía a partir del biogás producido. Clasifica los biosólidos resultantes de diversos tipos de tratamiento en A, B y C; donde A es el biosólido con mayor calidad, por lo que puede ser aplicado en la agricultura, mejorador de suelos, composta ornamental y aditivo como materiales para la construcción.

En Sudáfrica desde 1997 se establecieron los criterios de calidad y composición de los biosólidos con la finalidad de poder ser aprovechados¹⁰ y son clasificados en cuatro tipos, de acuerdo con el tratamiento que recibieron: A (no requiere tratamiento por su calidad), B (tratamiento de digestión aeróbica), C (tratamiento mediante digestión anaeróbica, compostaje, irradiación y pasteurización) y D (lo mismo que para C pero con menor contenido de metales pesados)¹⁴.

China basa su legislación en la aplicación de biosólidos como fertilizante agrícola y mejorador de suelos controlando la duración y cantidad que es aplicada, en términos de la textura tanto del suelo como del biosólido, y del nivel del agua subterránea; la legislación es muy estricta con respecto a los máximos permisibles de metales pesados y no establece límites para organismos patógenos¹⁴.

Brasil toma como referencia la clasificación que establece la EPA, tanto para utilización de biosólidos de acuerdo con su calidad, como para límites máximos permisibles de patógenos y de metales pesados.

En cambio, Guatemala cuenta con reglamentación sobre el reúso y disposición de lodos, pero no contempla regulaciones sobre los tratamientos. Por su parte, en Nicaragua el manejo y disposición de los lodos residuales debe realizarse conforme las recomendaciones que en su momento emita la comisión de medio ambiente⁵⁶.

En cuanto a Chile, el Congreso Nacional chileno (CNC) en 2009⁵⁷ publicó el decreto mediante el cual se establece el reglamento para el manejo de los lodos residuales generados por las PTAR. En este se considera la clasificación sanitaria para el reúso de lodos residuales y sus diferentes aprovechamientos, así como los lugares en los que deberán de disponerse cuando estos sean considerados como residuos peligrosos por su composición. Adicionalmente, hace referencia a los diferentes tratamientos mediante los cuales pueden ser estabilizados los lodos residuales y los clasifica de acuerdo con su composición fisicoquímica para poder ser aprovechados en tres categorías: A, B y C, considerando que el biosólido con mayor calidad y que se puede aprovechar para más usos es el A⁵⁷.

La legislación usualmente es un reflejo de las necesidades detectadas por cada país. Los países desarrollados conocen el problema ambiental y de salud pública que representan los lodos residuales, por lo que su legislación es específica, mientras que los países en vías de desarrollo consideran que los lodos residuales pueden ocasionar problemas, por lo que deben regularse; sin embargo, no son específicos pues dan prioridad a legislación que tenga que ver con cuestiones de alimentación y atención a la pobreza.

Legislación mexicana

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos⁵⁸ clasifica los lodos residuales como un residuo sólido urbano, y los considera como de manejo especial, por lo que hay que disponerlos adecuadamente según sus propiedades contaminantes.

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002²⁸, todas las PTAR deben analizar los lodos residuales generados, en periodos de acuerdo con las cantidades generadas mensualmente y considerando lími-

tes máximos permisibles para el contenido de metales pesados, microorganismos patógenos y análisis CRETIB (corrosividad, radioactividad, explosividad, toxicidad y biológico infecciosos), de acuerdo con la NOM-087-SEMARNAT-SSAI-2002⁵⁹ y la NOM-053-SEMARNAT-1993⁶⁰ con la finalidad de clasificarlos y poder aprovecharlos sin poner en riesgo la salud o el medioambiente.

Como todo residuo sólido, los lodos residuales una vez analizados, en caso de no cumplir con los parámetros establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002²⁸ o el análisis CRETIB, deben ser tratados como residuo peligroso y ser dispuestos en confinamientos o vertederos controlados y especificados para la depositación de este tipo de residuos, de acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-2005⁶¹.

En el caso de la normativa mexicana, no existe regulación sobre los tratamientos a los que se deben someter los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en biosólidos, ni para su construcción y operación.

Por tanto, en el caso de la utilización de los biosólidos como materia prima para la generación de energía eléctrica, no existe una normativa específica. La Comisión Federal de Electricidad (CFE), que regula la generación y distribución de la energía eléctrica en el país, permite generar energía eléctrica para consumo propio pero no para su posible distribución o venta, por lo que la energía excedente debe ser reincorporada a las líneas eléctricas propiedad de CFE, sin beneficios adicionales por ingresos económicos para la institución o empresa generadora de energía eléctrica más que la del incentivo de disminuir los gastos energéticos por consumo u operación.

La legislación mexicana debiera incluir las regulaciones necesarias para exigir que todos los lodos residuales reciban un proceso de estabilización que permita aprovecharlos en diferentes usos sin que presenten un riesgo para la salud.

Adicionalmente, México debe implementar la normativa para la construcción y operación de sistemas de digestión anaeróbica, que permitan recuperar la energía, con la finalidad de disminuir los gastos energéticos y operativos de las PTAR y contribuir a la producción de energía renovable.

Prevención de generación de lodos residuales

Como se mencionó anteriormente, los lodos residuales están compuestos por distintos tipos de contaminantes comúnmente conocidos (metales pesados, químicos y microbiológico); adicionalmente, el empleo de diversos productos entre los que se encuentran fármacos con esteroides, medicamentos, hormonas, productos para el cuidado personal y de limpieza del hogar (contaminantes emergentes), al ser desechados por medio de la excreta y orina o tirarse en las alcantarillas, se incorporan a las aguas residuales; estos contaminantes, por su composición química, son difíciles de extraer tanto del agua como de los lodos resultantes de su tratamiento, lo que implica que disminuya su calidad y, por lo tanto, el potencial de poder ser reutilizados o aprovechados⁶².

Lo anterior implica que el contenido de materia orgánica, de materia inorgánica y de contaminantes emergentes presentes en los lodos residuales y biosólidos aumente, incrementando su volumen y su calidad⁶³, así como la dificultad de su tratamiento para que no causen un riesgo a la salud o al ambiente cuando estos sean aplicados como fertilizante agrícola, mejorador de suelos o en rellenos a cielo abierto.

Por lo anterior, de acuerdo con la Universidad de Ferrara, Italia (UNIFE)⁶⁴, es importante no solo diseñar programas y tecnología para el manejo de lodos residuales y de los aspectos de resolución del problema una vez que estos se generen, sino que se considere el prevenir su generación en grandes cantidades, lo que ayudaría a reducir los costos de manejo, y los riesgos presentes a la salud.

La manera en la que se puede prevenir la generación de lodos residuales y biosólidos con altos contenidos de materia orgánica y de otros contaminantes es el cambio en el consumo de productos para el cuidado personal y la limpieza del hogar⁶⁴.

CONCLUSIONES

Con el fin de garantizar la distribución de agua a las nuevas generaciones y que minimice el impacto ambiental, por el incremento en los lodos residuales es necesario invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la solución del problema de disponibilidad de agua y al tratamiento de los lodos residuales.

El utilizar los biosólidos resultantes de distintos sistemas de tratamiento, pero en específico la digestión anaeróbica, permite aprovechar un residuo alto en nutrientes como fertilizante agrícola, restaurador de suelos (contrarrestar los problemas actuales de desertificación), elaboración de composta, aditamento para materiales de la construcción y como materia prima para la producción de energía; permite capturar los GEI generados evitando el contacto directo con los trabajadores y permite hacer uso de una energía renovable limpia para abastecer los requerimientos energéticos de las PTAR, del sistema de digestión e incluso en algunos países abastecer de energía eléctrica a comunidades pequeñas.

En México hace falta poner atención en los lodos residuales, ya que aunque se contempla como un residuo sólido urbano, la mayoría de la población no sabe que existe, y la que conoce de su existencia no cuenta con la información necesaria, por lo que desconfía de que su aprovechamiento o reutilización como materia prima para muchos propósitos sea benéfica y no cause algún riesgo para su salud.

Por lo anterior hay que transmitir los beneficios que se tienen al aprovechar los lodos residuales y de implementar sistemas de digestión anaeróbica.

Además, en México hace falta que se trabaje en la elaboración de regulaciones que incluyan controles y límites más estrictos para la estabilización y control de los lodos residuales, así como la estandarización de procedimientos para la instalación y operación de sistemas de recuperación energética de lodos.

Los países desarrollados cuentan con legislación detallada sobre el manejo, aprovechamiento y disposición de los lodos residuales y biosólidos, e invierten en infraestructura que les permita minimizar los riesgos a la salud y los problemas ambientales, lo que posibilita que aprovechen entre el 50% y el 80% de sus biosólidos de manera benéfica. Las leyes y reglamentos facilitan llevar un control sobre las cantidades generadas, los tratamientos y el aprovechamiento final de los biosólidos.

Hace falta desarrollar investigación y trabajos interdisciplinarios, ya que de acuerdo con la revisión de referencias analizadas, los proyectos de investigación se dedican solamente a abordar el tema de los sistemas de digestión anaeróbica desde una disciplina, sin considerar la integración del conocimiento que permita realizar proyectos que contemplen a todos los actores involucrados en el manejo, tratamiento y disposición de los lodos residuales.

Adicionalmente, es necesario adelantar estudios sobre el manejo y aprovechamiento de lodos residuales en México con la finalidad de tener datos específicos sobre la cantidad de lodos residuales generados y los tratamientos que cada PTAR maneja, con la finalidad de crear nuevos sistemas y tecnología que ayuden a disminuir la emisión de GEI, los problemas a la salud de los habitantes cercanos a las PTAR y de sus trabajadores, reducir los costos de operación de las PTAR y contribuir a la generación de energía eléctrica renovable.

De lo anterior, surge la importancia de la incorporación de proyectos e instalación de sistemas de digestión anaeróbica y plantas de biogás para la recuperación energética, no solo en las PTAR públicas y privadas existentes actualmente en México, sino la incorporación de estos sistemas, desde la realización del proyecto de construcción de nuevas PTAR, ya que esto implicaría que la instalación de cualquier PTAR en México contemple una operación integral, es decir, no solo del agua residual a tratar, sino también de los residuos que se generan.

Lo anterior permite que los lodos residuales o biosólidos generados en las PTAR sean aprovechados de manera benéfica, reduciendo así el impacto ambiental y social que estos pudiesen tener.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, así mismo a los Docentes de la Universidad Autónoma de Baja California por su apoyo para la realización del proyecto "Potencial de recuperación energética empleando biosólidos como materia prima en Ensenada, B. C." y al Director de tesis Dr. Leopoldo Mendoza Espinosa por su apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MÉXICO. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). Agenda del agua 2030. 2011. p. 70.
2. ORTIZ, M.; GUTIÉRREZ, M. and SÁNCHEZ, E. Propuesta de manejo de lodos residuales de la Planta de tratamiento de la ciudad industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 1995. Vol. 11, N° 2, p.105-115.
3. DAGUER, G. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Congreso internacional ACODAL sociedad, ambiente y futuro. (29-31, octubre: Colombia). Memorias. Santiago de Cali. 2003.
4. GHAZY, M.; DOCKHORN, T. & DICHTL, N. Sewage Sludge Management in Egypt: Current Status and Perspectives towards a Sustainable Agricultural Use. En: World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. Vol. 57. p. 492-500.
5. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS, COMISIÓN CANADIENSE PARA EL MANEJO DE LODOS Y COMISIÓN DE ALCANTARILLADO Y LODOS RESIDUALES (UN-HABITAT). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. 2ª ed. New Brunswick, Canada: United Nations Human Settlements Programme, 2008. 632 p.
6. MAHAMUD, M. y GUTIÉRREZ, A. Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. En: Ingeniería del Agua. 1996. Vol.3. N° 2. p. 47-62.
7. CARDOSO, L.; *et al.* Manejo de lodos residuales en México. En: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (3-8, diciembre: Brasil). Memorias. Puerto Alegre, Brasil. 2003. p. 1-7.
8. ONYECHE, T. Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. En: CUTEC-Institute. 2010. Vol. 1. p. 417-422.
9. BEECHER, N.; *et al.* Risk Perception, Risk Communication, and Stakeholder Involvement for Biosolids Management and Research. En: J. Environmental Qual. 2005. Vol. 34. p. 122-128.
10. SNYMAN, H.; ALEXANDER, W. & MARX, C. Land disposal and agricultural reuse of sewage sludge within the framework of the current south african guidelines. En: WISA 2000 Biennial Conference. (28-01, mayo, junio: South Africa). Memorias. Sun City, South Africa. 2000.
11. OROPEZA, N. Lodos residuales: estabilización y manejo. En: Caos Conciencia. 2006. Vol. 1. p. 51-58.

12. KARGBO, D. Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges. En: Energy Fuels. 2010. Vol. 24. p. 2791-2794.
13. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). Programa Nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012. México, D. F.: SEMARNAT, 2008. p. 174.
14. JIMÉNEZ, B. & WANG, L. Sludge Treatment and Management. En: Municipal Waste Water Management in Developing Countries: Principles and Engineering. London, UK: IWA Publishing, 2006. p. 237-292.
15. BEECHER, N. A Greenhouse gas emissions analysis of biosolids management options for Merrimack, NH. New Hampshire, EUA: North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA), 2008. p. 35.
16. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Biosolids Technology Fact Sheet Land Application of Biosolids. Manual. Washington: EPA, 2000. p. 99.
17. NÚÑEZ, D. Wastewater treatment and sewage sludge management in Galicia: Agricultural and environmental aspects. En: EJEAFChE. 2002. Vol. 1. N° 1. p. 23-29.
18. DOHÁNYOS, M. & ZABRANSKÁ, J. Anaerobic digestion. En: Sludge into biosolids: Processing, Disposal, Utilization. (L. Spinosa, P.A. Vesilind, Eds.) . London, UK: IWA publishing, 2001. p. 223-241.
19. DEUBLEIN, D. & STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources, An Introduction. 2ª ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Alemania. 2011. p. 520.
20. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) AND METHANE TO MARKETS. Emisiones mundiales de metano y oportunidades de atenuación. Washington: Environmental Protection Agency & Methane to Markets, 2008. p. 4.
21. MÉXICO. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. México: Instituto Nacional de Ecología, 2006. p. 50.
22. ARVIZU, J. Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2006 en la categoría de desechos. Instituto de investigaciones eléctricas e Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.: INE, 2008. p. 137.
23. MANTILLA, G.; CHACÓN, J. y MOELLER, G. Emisiones de gas de efecto invernadero: aportes generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en México. En: XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (12-15, octubre: Chile). Memorias. Santiago, Chile. 2008.
24. UNITED NATIONS. Protocolo de Kyoto. Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention On Climate Change. Japón, 2005. p. 21.
25. RULKENS, W. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. En: Energy Fuels. 2007. Vol. 22. p. 9-15.
26. MALIK, S. and BHARTI, U. Biogas production from Sludge of Sewage Treatment Plant at Haridwar. En: Asian J. Exp. Sci. 2009. Vol. 23. N° 1. p. 95-98.
27. NAKASIMA, M.; VELÁSQUEZ, N. y OJEDA, S. Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía. En: 4to. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. (5-7, Octubre: México). Memorias. México, D. F. 2011. pp. 535-542.

28. MÉXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental; lodos y biosólidos; especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México: SEMARNAT, 2002.
29. RUBIA, M.; *et al.* Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Municipal Sludge Digestion. *En: Chem. Biochem. Eng. Q.* 2002. Vol. 16. N° 3. p. 119-124.
30. CISNEROS, M.; *et al.* Digestión anaerobia en dos etapas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de México (UNAM). 2005. p. 6.
31. ARTHUR, R. & BREW-HAMMOND, A. Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology, Ghana. *En: IJEE.* 2010. Vol. 1. N° 6. p. 1009-1016.
32. WATER ENVIRONMENT FEDERATION & AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (WEF & ASCE). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants Volume III. 4a ed. Water environment federation preserving & embracing the global water environment, 1998. p. 280.
33. AGLER, M.; *et al.* Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. *En: Bior. Tech.* 2010. Vol. 101. p. 5842-5851.
34. DUQUE, D.; GALEANO, U. y MANTILLA, G. Evaluación de un digestor tipo "Plug Flow". [En línea]. 2006. [Consultado el 25 de noviembre de 2011]. Url disponible en <http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>.
35. AKERLUND, A. Evaluation of a disintegration technique for increased biogas production from excess activated sludge. Department of Microbiology. *En: Swedish University of Agricultural Science.* 2008. p. 53.
36. GILROYED, B.; *et al.* Anaerobic digestion of specified risk materials with cattle manure for biogas production. *En: Bior. Tech.* 2010. Vol. 101. p. 5780-5785.
37. INFANTES P. Diseño de Biodigestores, Tabla de valores TS. [En línea]. 2007. [Consultado el 25 de marzo de 2011]. Url disponible en <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/disenio-biodigestores-t976/p0.htm>
38. GUARDADO CHACÓN, José Antonio. Tecnología del biogás. Manual del Usuario. La Habana, Cuba: Cuba solar, 2006. p. 22.
39. RIZZARDINI, C. & GOI, D. Considerations About European Directives and Italian Regulation on Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants: Current Status and Future Prospective. *En: The Open Waste Management Journal.* 2009. Vol. 2. p. 17-26.
40. SOLARI, G. Ficha Técnica Planta de biogás. [En línea]. 2004. [Consultado el 05 de noviembre de 2011]. Url disponible en www.solucionespracticas.org.pe.
41. COELHO, S.; *et al.* Rational energy use and alternatives sources use of biogas at USP-PU-REFA. *En: International Workshop Bioenergy for a sustainable development (8-9, noviembre: Chile).* Memorias. Viña del Mar, Chile. 2004.
42. COELHO, S.; *et al.* Energy Generation by a Renewable Source-Sewage Biogas. *En: Evento del Cambio climático y Energía. (17-18, noviembre: Brasil).* Memorias. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
43. COELHO, S.; *et al.* The Production of Sewage Biogas and its Use for Energy Generation. *En: Conferencia y exhibición mundial de bioenergía. (30-01, mayo, junio: Suecia).* Memorias. Jönköping, Suecia, 2006.

44. RELEA, F.; *et al.* Proyecto MICROPHILOX: Valorización energética de biogás en depósitos controlados mediante microturbinas. *En:* Infoenviro. 2009. Vol. 1. p. 1-3.
45. MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, Horizonte 2030. México, D. F.: IMTA, 2012. p. 57.
46. HALL, J. Ecological and economical balance for sludge management options. Marlow, United Kingdom: WRc plc, Medmenham, 2000. p. 59.
47. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Emerging Technology for biosolids management. Manual. United States: EPA, 2006. p. 135.
48. PAVAN, P.; *et al.* Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes in small wastewater treatment plants: an economic considerations evaluation. *En:* Water Science & Technology. 2007. Vol. 56. p. 45-53.
49. RITTMAN, B.; *et al.* Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *En:* Water Science & Technology. 2008. Vol. 58. p. 1895-1901.
50. GRUPO AQUA LIMPIA. Información Técnica de moto generadores para combustión de metano. [En línea]. 2011. [Consultado el 04 de noviembre de 2011]. Url disponible en <http://www.aqualimpia.com>.
51. MISRA, V. & PANDEY, S. Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *En:* Env. Int. 2005. Vol. 31. p. 417-431.
52. RENNER, R. NRC targets pathogens in sludge for research. *En:* Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 1. p. 338.
53. DZAMAN, K.; *et al.* Taste and smell perception among sewage treatment and landfill workers. *En:* International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2009. Vol. 22. N° 3. p. 227-234.
54. ZEYNEP, E.; *et al.* Recent findings on biosolids cake odor reduction: Results of WERF phase 3 biosolids odor research. *En:* Journal of Environmental Science and Health. 2008. Vol. 43. p. 1575-1580.
55. JIMÉNEZ, B. Latin America: Mexico. *En:* Wastewater sludge: a global overview of the current status and future projects. (L. Spinoso, Ed.). London, UK: IWA publishing, 2011. p. 47-50.
56. MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. Políticas públicas y normatividad sobre agua y lodos residuales. México, D. F.: IMTA, 2000. p. 8.
57. CHILE. BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL. Decreto 4. Reglamento para el manejo de lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Chile: La Biblioteca, 2009.
58. MÉXICO. CÁMARA DE DIPUTADOS DEL CONGRESO DE LA UNIÓN. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LEGEPIR). México: La Cámara, 2007.
59. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) Y SECRETARÍA DE SALUD (SSA). NOM-087-SEMARNAT-SSA I-2002. Protección ambiental, Salud ambiental, Residuos peligrosos biológico infecciosos, Clasificación y especificaciones de manejo. México: La Secretaría, 2003.

60. MÉXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-053-SEMARNAT-1993. Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. México: La Secretaría, 2003.
61. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-052-SEMARNAT-2005. Características, procedimiento de identificación y clasificación de los residuos peligrosos. México: La Secretaría, 2006.
62. BECERRIL, J. Contaminantes emergentes en el agua. En: Revista Digital UNAM. 2009. Vol. 10. p. 1-6.
63. CLARKE, B. & SMITH, S. Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids. En: Environmental International. 2011. Vol. 37. p. 226-247.
64. ITALIA. UNIVERSIDAD DE FERRARA. (UNIFE). Reuse of drinking water treatment plants sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations. Italia: UNIFE, 2000. p. 7.