

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Tratamiento y utilización de efluentes de instalaciones de biogás como abonos orgánicos, revisión y análisis

Treatment and use of effluents in biogas facilities like biofertilizer, revision and analysis

Carlos M. Martínez Hernández¹ y Yosiel Francesena López²

¹ Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km.5,5. Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830

² Delegación del Ministerio de la Agricultura, Sancti Spiritus, Cuba. CP 60100

E-mail: carlosmh@uclv.edu.cu

RESUMEN

Al tener en cuenta el auge de la producción porcina en Cuba, unido a la importancia que tiene la utilización de efluentes (digestatos) provenientes de plantas de biogás, a escala internacional y nacional, como biofertilizantes y mejoradores de suelo, minimizando los aspectos de contaminación medioambiental, se realiza este trabajo en tres partes. Primeramente, se describen tecnologías y métodos sobre cómo tratar los efluentes y poder utilizarlos. Después son abordadas las particularidades para llevar a efecto estos tratamientos y posteriormente, en la tercera parte es analizada la posible utilización en el caso cubano. Como resultado del mismo, se muestra el estado del arte en la utilización de los digestatos para potenciar su calidad y uso.

Palabras clave: digestatos, biodigestores, calidad, contaminación ambiental, mejoradores de suelo

ABSTRACT

When taking into account the boom in pork production in Cuba, together with the importance of the use of effluents (digestates) from biogas plants, on an international and national scale, such as biofertilizers and soil improvers, minimizing the environmental pollution aspects, this work is carried out in three parts. First, technologies and methods on how to treat effluents and use them are described. After the particularities are addressed to effect these treatments and then the third part is analyzed the possible use in the Cuban case. As a result, the state of the art in the use of digestates is shown to enhance its quality and use.

Keywords: digestates, biodigesters, quality, environmental contamination, soil improvers

INTRODUCCIÓN

En Alemania las propiedades y constituyentes del digestato se determinan esencialmente por los materiales utilizados para la digestión anaeróbica y por el proceso de digestión mismo (FNR,

2013). Las plantas agrícolas de biogás utilizan principalmente lodo líquido proveniente de excretas de ganado, cerdos y guano de aves de engorde. Es menos común el uso de fertilizantes agrícolas procedentes de las granjas con gallinas ponedoras debido a los altos concentrados de amoníaco y residuos de la alimentación suplementaria con calcio. Además, las reglas sobre remuneración estipuladas en la Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG, 2008), hace que solo algunos operadores de plantas continúan concentrándose en el uso de cultivos energéticos. No obstante, deben mencionarse algunos efectos que se conocen de la digestión del fertilizante agrícola sobre las propiedades del digestato como: menores emisiones de olores por la degradación de compuestos orgánicos volátiles, mejor eficiencia del nitrógeno en el corto plazo a través de una mayor concentración de nitrógeno de acción rápida, muerte o desactivación de semillas de hierbas y gérmenes (patógenos humanos, zoonos y fitopatógenos).

El hecho de que sea principalmente la fracción de carbono del sustrato la que sufre cambio a través de la digestión significa que los nutrientes que contiene se preservan en su integridad. En todo caso, son más solubles por el proceso de degradación anaeróbica y, por lo tanto, fáciles de absorber (Döhler *et al.*, 1999).

Los principales parámetros de los digestatos y su comparación pueden ser consultados en LTZ (2008). Estudios realizados a digestatos provenientes de la digestión de bosta (excretas) de ganado y cultivos energéticos, bosta de cerdo y cultivos energéticos, cultivos energéticos y residuos han permitido conocer que: el contenido de materia seca del digestato es aproximadamente 2 % menor que el de bosta cruda, la concentración total de nitrógeno es ligeramente mayor que en bosta de ganado, la proporción de C:N en los digestatos es alrededor de 5 o 6, significativamente menor que en bosta cruda (C:N =10), la degradación de la materia orgánica hace que el nitrógeno enlazado orgánicamente se convierta en nitrógeno enlazado inorgánicamente.

Según Cuba (2015) la producción porcina ha tenido un importante crecimiento en los últimos años, con entregas para el sacrificio de 3 379,6 miles de cabezas (Mcabz). Villa Clara se destaca a nivel nacional en esta actividad, sin embargo, algunos problemas relacionados con el uso y disposición final de los efluentes ha llamado la atención de las autoridades sanitarias

en el territorio. De acuerdo con informaciones brindadas por funcionarios de la delegación del MINAG, en Villa Clara existen más de 412 biodigestores, destacándose los tubulares de geo membrana, introducidos durante los últimos tres años.

Francesena (2016) refiere que algunos de los impactos ambientales de esta producción son: contaminación del aire, pérdida de la biodiversidad de especies y contaminación del agua (por vertimientos directos al medio sin tratamiento adecuado hacia cuerpos receptores de cuencas de ríos y presas que son utilizadas para regadíos o el consumo). Las emisiones más importantes son las relacionadas con el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que fomentan especialmente los fenómenos de eutrofización o enriquecimiento de nutrientes en el agua (el aumento de compuestos nitrogenados y fosfóricos provoca un crecimiento acelerado de algas o plantas acuáticas, causando trastornos negativos en el equilibrio de las poblaciones biológicas en el medio acuático y en la calidad del agua); acidificación de suelos y aguas (la reacción ácida de compuestos producen variaciones del pH que afectan al ecosistema en general) (Espejo y García, 2010).

Motivado por el fortalecimiento que se está dando a las leyes sobre vertimiento de aguas residuales en Cuba es necesario que se establezcan sistemas de descontaminación eficientes. La norma cubana NC-27:2012 establece límites admisibles para el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua superficiales. Desafortunadamente, se ha avanzado relativamente poco en los sistemas para la descontaminación de aguas residuales porcinas. Ante esta situación, es necesario promover el desarrollo de tecnologías que ayuden a mejorar la calidad de los efluentes y que, al mismo tiempo, sean adecuadas al contexto socioeconómico del país (Quintero *et al.*, 2002).

La caracterización físico-química y microbiología de los efluentes ha demostrado las potencialidades para producir biogás con fines energéticos destacándose los que tratan estiércoles porcinos, donde el metano supera el 70 %. Sin embargo, la carga microbiana limita su uso como biofertilizantes. Esto demuestra el necesario pos tratamiento que necesitan los efluentes en estos sistemas (Obaja *et al.*, 2005). Sosa (2015) refiere que la inocuidad de los afluentes y efluentes por biodigestores puede confirmarse si cumplen con lo establecido en

las normas cubanas. Igualmente, Martínez *et al.* (2014) expresan claramente la necesidad de realizar un pos tratamiento a los efluentes, para que cumplan con las normas cubanas (NC-27:2012, NC-1095: 2015) y no sean vertidos indiscriminadamente al medio ambiente.

El uso como fertilizante de los efluentes es en la actualidad una aspiración y está muy lejos de ser una realidad en la práctica productiva cubana. Aunque se reportan investigaciones puntuales en este campo, como las efectuadas por Robles (2008) cuando expresa que el Bioabono o Biol es un producto muy importante, desde el punto de vista económico y ambiental (efluente líquido del biodigestor conocido como Biol, químicamente formado en su mayoría por nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), presentes en el material a fermentar que no se pierde durante el proceso fermentativo).

De acuerdo con Rodríguez *et al.* (1998), los lodos sólidos o Biosol son obtenidos después de ser llevado a cabo el proceso de digestión anaerobia de los efluentes porcinos y están constituidos principalmente por los sólidos sedimentables resultados de este proceso, formando unos lodos estabilizados. Estudios realizados han demostrado que debido a su composición aminoacídica, calidad sanitaria, concentraciones de nitrógeno y proteína bruta, puede ser utilizado como alimento animal (Figueroa, 1993).

Ponce (2007) describe que en Cuba se han aplicado lodos anaerobios como bioabono, observando que se estimula la germinación y el crecimiento de las plantas, además de existir un incremento de los rendimientos en los cultivos de pepino, remolacha y habichuela (en condiciones de organopónico, sobre un sustrato formado por un 75 % de lodo y 25 % de suelo). Esta materia orgánica también es factible de mejorar por diferentes vías, tales como el compostaje aeróbico o lombricultura.

Debido a que en el proceso de fermentación solo se remueven los gases generados (CO_2 , CH_4 , H_2S) que representan del 5 al 10 % del volumen total de material de carga, mientras que la mayoría de los nutrientes nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg) y elementos menores contenidos en el líquido, se conservan durante el proceso de digestión, los nutrientes solubles se quedan en el residuo líquido, y son absorbidos por algunas sustancias sólidas. Los residuales de los biodigestores (efluentes) según Pérez (2006), son más nutritivos que

los fertilizantes tradicionales, ya que además de los nutrientes mencionados contienen otras sustancias útiles para las plantas.

La estabilidad biológica de los residuos del biogás se evidencia por el hecho de que no existen malos olores ni atracción de moscas. La mayor parte de la materia orgánica que queda sin digerir en el efluente se descompone en forma lenta por la acción de las bacterias aeróbicas y no sirven como alimento para insectos y otras plagas dañinas a la agricultura. Los residuos que se obtienen se dividen en dos tipos: los líquidos, que contiene sustancias disueltas y los condensados (sedimentos en el fondo del digestor). López *et al.* (2017) describe el efecto agronómico del efluente de la digestión anaerobia de origen porcina en el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el fitopatógeno *Rhizoctonia solani* Kühn.

Al tener en cuenta la gran variedad de estudios realizados, es necesario crear conciencia en este sentido, ya que estas tecnologías reportan importantes dividendos desde los puntos de vista energético, económico y medioambiental. Asimismo, están suficientemente estudiadas con resultados maduros para su introducción, sin embargo, lamentablemente esto no es así, constituyendo un serio problema ambiental el uso de los efluentes sin un previo pos tratamiento.

MATERIALES Y METODOS

Este trabajo fue elaborado tomando referencias bibliográficas enmarcadas en el período comprendido entre los años 1990 al 2017. Las fuentes fundamentales citadas son de origen alemán, aunque también son mencionados trabajos realizados en España, México, Colombia, Venezuela y Cuba. Las localidades geográficas que aparecen en las citas se relacionan fundamentalmente con Alemania y Cuba respectivamente.

Los criterios de selección han estado relacionados con el tratamiento y usos de los efluentes de instalaciones productoras de biogás como biofertilizantes. Por lo tanto, constituye una recopilación bibliográfica de las técnicas y procedimientos más utilizados internacionalmente, aunque el propósito no fue describir de forma explícita: áreas de estudios, tipos de suelo donde aplicar los lodos tratados, materias primas inoculadas en el proceso de digestión y sus porcentajes, características físico-químicas y microbiológicas de los efluentes, así como los tipos de tratamientos y criterios de

selección para lograr un efluente postratado apto como abono orgánico o mejorador de suelo; esas consideraciones están fuera del objetivo de este trabajo.

DESARROLLO

Los métodos de tratamientos para los efluentes (digestatos) tienen como objeto el mejoramiento de las cualidades como biofertilizantes y mejoradores de suelo, además de la posibilidad de eliminar patógenos y elementos contaminantes. Sin embargo, estos tratamientos muestran ciertas particularidades tales como: incremento de los costos de manipulación, de los requisitos legislativos para la estabilización y remoción de posibles patógenos, tendencia al manejo de mayores límites de nitrógeno. Por tal motivo, es necesario un análisis de los tratamientos a utilizar en dependencia del tipo, actuación y costos. Se debe hacer énfasis en los principales tratamientos los cuales están relacionados con: tratamientos físicos, químicos y biológicos.

El número y tamaño de las plantas de biogás en Alemania están elevándose de manera abrupta. Hay una intensificación de las explotaciones pecuarias incluyendo regiones con alta densidad de ganado. El resultado es una producción regionalmente alta de fertilizantes provenientes de los fundos por lo que frecuentemente no tiene sentido utilizar los digestatos como fertilizantes. Estos fertilizantes no solamente tienen potencial alto en nutrientes, sino que pueden sobrecargar los ciclos metabólicos naturales salvo que se usen correctamente (FNR, 2013).

La manera más simple de utilizar el digestato es aplicándolo como fertilizante en tierra agrícola sin tratamiento previo. Sin embargo, los altos alquileres por tierras apropiadas o las largas distancias de transporte y los altos costos de transporte que se les asocian pueden hacer que sea difícil utilizar los digestatos de manera económica. Debido a lo expuesto, se utilizan varios procesos para hacer que los digestatos sean más económicos de transportar. Estos procesos pueden ser de naturaleza física, química o biológica. Una clasificación de los procesos de tratamientos por tipo es: físicos (separación de sólidos, secado, evaporación, tecnología de membrana, remoción), químicos (con agentes limpiadores, mediante precipitación), biológicos (compostaje, nitrificación/desnitrificación) (FNR, 2013).

Utilización del digestato sin tratamiento (almacenamiento del digestato no tratado y aplicación al suelo)

En el interés del reciclaje de nutrientes, es deseable que los digestatos se apliquen sobre la misma tierra que se utilizó para cultivar los cultivos energéticos utilizados para la digestión. Como esa tierra estará normalmente en la vecindad inmediata de la planta de biogás, las distancias requeridas de transporte son cortas. Generalmente, cuando se incrementa la distancia del transporte, los costos se elevan significativamente debido a que el contenido de nutrientes del digestato con referencia a su masa es relativamente bajo. Por lo tanto, la finalidad del tratamiento es reducir el contenido de agua inerte e incrementar selectivamente la concentración de fracciones de nutrientes.

- **Separación de sólidos:** La separación de sólidos es fundamental para el tratamiento. Tiene la ventaja de reducir el volumen de almacenamiento de los digestatos líquidos así como de aminorar la incidencia de las capas flotantes y las capas que se hundan durante el almacenamiento. Sin embargo, se fracciona los nutrientes porque, aunque soluble, el nitrógeno mineral se queda principalmente en la fase líquida, y la mayoría del nitrógeno y fósforo enlazados orgánicamente se separan con la fase sólida. La fase líquida, baja en materia seca, se puede esparcir en campos, mientras que los sólidos se pueden compostar o secar. Dependiendo del grado requerido de separación, se usa sobre todo separadores de prensa de tornillo, prensas con tambor clivador, prensas con faja clivadora y decantadores. El desempeño de la separación de todos los procesos depende mucho de las propiedades del digestato y del ajuste del separador. Cuanto más alto sea el contenido de DM (materia seca), mayor será la reducción de volumen y la separación de fósforo y nitrógeno orgánico con la fase sólida que se puede lograr. Los separadores de prensa de tornillo pueden lograr concentraciones de materia seca del 30 %. A veces se usa floculantes para mejorar el desempeño de la separación, pero es necesario tener en cuenta los temas conectados con las legislaciones sobre fertilizantes en relación con ellos.
- **Tratamiento posterior de la fase sólida:** Es posible la aplicación directa en el campo de la fase sólida separada. No obstante, como

eso puede llevar a una inmovilización del nitrógeno, desarrollo de olores o dispersión de semillas de malas hierbas, normalmente se somete a los sólidos separados a un tratamiento adicional.

- **Compostaje:** es una forma de tratamiento aeróbico de los residuos orgánicos y sus objetivos son estabilizar sus componentes orgánicos, eliminar los gérmenes patógenos, semillas de plantas indeseables y eliminar los compuestos que desprenden muchos olores. Como el digestato carece de estructura como material, el compostaje exitoso exige la adición de material estructural (como mantillo de corteza) o el re-apilado frecuente del material. De manera similar al compost convencional, el compost resultante puede utilizarse directamente como acondicionador de suelos (Ebertseder, 2007).
- **Secado:** Se puede utilizar para este propósito algunos procesos de secado ya establecidos en algunas áreas. Estos incluyen secadores de tambor, secadores de faja, secadores de alimentación y giro. En la mayoría de sistemas de secadores se transmite el calor por aire caliente que fluye por encima y a través del material a ser secado. En una planta de biogás, se puede utilizar el calor residual para este propósito a menos que existan otros usos para el mismo. Durante el secado, la mayoría de amonio obtenido en la fase sólida se pasa al aire residual del secador en la forma de amoníaco. Por esta razón, se puede requerir tratamiento del aire residual para evitar emisiones. Por medio del secado se puede lograr concentraciones de materia seca de al menos el 80 % en la fase sólida. Esto hace que el digestato sea conveniente para el almacenamiento y transporte.
- **Tratamiento posterior de la fase líquida:** Las concentraciones más bajas de DM en la fase líquida separada permiten el almacenamiento y la aplicación más fácilmente que el digestato no tratado. Sin embargo, frecuentemente, son deseables la reducción adicional del volumen y/o el enriquecimiento de nutrientes. Esto se puede lograr a través de los procesos de tecnología de membrana, evaporación y remoción.
- **Utilización de digestatos tratados:** En términos de propiedades, los sólidos provenientes del proceso de separación son comparables con los del compost fresco

y pueden utilizarse como fertilizante e incrementar la concentración de materia orgánica en los suelos. La Asociación Federal Alemana de Calidad del Compost (BGK) ha desarrollado criterios de calidad para los digestatos sólidos y otorga un sello de calidad. No obstante, el compost fresco se utiliza principalmente en la agricultura ya que puede haber molestias por olores en su almacenamiento y aplicación.

Otra opción es incinerar los sólidos secados, empero el digestato no está aprobado como un combustible de acuerdo con la Ley de Control de la Contaminación de Alemania si se codigiere bosta o excremento. Para digestatos de origen exclusivamente vegetal, la necesidad de regulación no es clara. En algunas plantas de biogás, la fase líquida proveniente de la separación se usa a veces como recirculado. El contenido reducido de DM también permite una aplicación más precisa en los campos con menores pérdidas de NH_3 . La aplicación en el campo por medio de aplicador de manguera remolcada, tal como se emplea en la aplicación de la bosta y el digestato, requiere volúmenes de aplicación suficientemente altos para permitir una distribución uniforme de los nutrientes en el suelo (FNR, 2009).

Los fertilizantes minerales líquidos, como la solución de amonio y urea, con una concentración de nitrógeno del 28 %, se aplican frecuentemente con rociadores de pesticidas, lo que tiene usualmente una capacidad de aplicación limitada. Los volúmenes de aplicación que están significativamente por encima de $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ son difíciles de lograr utilizando tecnología estándar. La solución de sulfato de amonio proveniente de la remoción es la más cercana a cumplir con las normas requeridas en un producto comercializable.

Los cálculos económicos no asumen el costo de utilización o ingresos de los productos del tratamiento de la fase líquida sin nutrientes o con pocos nutrientes. Los ingresos son posibles si se puede encontrar demandantes para agua de proceso, esto parece más probable en el caso de la tecnología de membrana, la cual produce un permeado directamente descargable de la ósmosis inversa; de no existir esas opciones, se requiere la conexión a una planta de tratamiento de agua con capacidades hidráulicas y biológicas apropiadas. Esto resulta en costos adicionales que deben tomarse en consideración.

Comparación de los procesos de tratamiento del digestato

Los procesos de tratamiento difieren de manera significativa en términos de su difusión y confiabilidad. Los de separación del digestato son de última generación y se usan comúnmente, sin embargo, el tratamiento parcial no reduce normalmente el volumen para la aplicación en el campo y el costo de la aplicación se incrementa. Los procesos para secar la fase sólida ya se han establecido en otras áreas de aplicación y están adaptados para el secado de digestatos. El secado es una propuesta económicamente atractiva solo en los casos donde, una vez que el digestato se seca, se puede utilizar de manera rentable. Los procesos para el tratamiento de la fase líquida todavía necesitan desarrollarse más, siendo la tecnología de membranas la más avanzada. Pese a eso, todavía hay potencial para modificar el proceso de modo que se reduzca el desgaste y consumo de energía.

Los procesos para la evaporación y remoción todavía no están avanzados en términos de operación a escala comercial. Por esta razón, la evaluación económica y la calidad esperada del producto siguen siendo objeto de mucha incertidumbre, siendo los riesgos técnicos comparativamente altos.

Almacenamiento del digestato

El almacenamiento en un tanque conveniente es un requisito previo para la utilización del digestato. De igual manera que con el fertilizante agrícola no tratado, durante el almacenamiento existen emisiones de gases relevantes al clima como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) así como emisiones de amoníaco (NH_3) y sustancias olorosas.

- Emisiones de amoníaco: La concentración de amoníaco se incrementa debido al proceso de digestión, y los altos valores de pH durante el almacenamiento. A menudo, es posible la formación de una capa flotante de manera limitada. Para evitar pérdidas y malos olores asociados al amoníaco (proveniente de los tanques abiertos), se recomienda cubrir el digestato, por ejemplo, con paja cortada.
- Emisiones dañinas para el medio ambiente: En comparación con la bosta no tratada, la formación de metano proveniente de la bosta digerida se reduce considerablemente durante el proceso anaeróbico, ya que parte de la materia orgánica ha sido metabolizada

en el digestor. Por lo tanto, la medida en la que se reduzcan las emisiones de metano dependerá decisivamente del grado en el que se ha degradado la materia orgánica y en el tiempo de retención del sustrato dentro del digestor. Si el tiempo de retención es muy corto, puede haber mayores emisiones de metano en comparación con bostas no tratadas (Clemens *et al.*, 2002).

Las plantas de etapas múltiples tienden a exhibir un potencial de gas residual más bajo a 20 - 22 °C y a 37 °C. Eso se debe sobre todo al hecho de que una planta de etapas múltiples tiene un tiempo de retención más alto. Debido al alto potencial de invernadero, es deseable reducir o evitar las emisiones de CH_4 de los tanques. Las plantas sin almacenamiento final a prueba de fugas de gas, satisfacen al menos uno de los siguientes requisitos: tiempo promedio de retención hidráulica del volumen del sustrato total de al menos 100 días a una temperatura continua a lo largo del año, al menos de 30 °C, o la tasa de carga orgánica del digestor que debe ser menor de 2,5 kg VS/m³ d.

El cálculo del volumen del sustrato debe tomar en cuenta todos los insumos en el (los) tanque (s) de digestión (incluyendo, por ejemplo, agua y/o recirculado). Si no se cumple con los requisitos mencionados anteriormente, se debe esperar que las emisiones de metano excedan los valores promedio. El (los) tanque (s) de almacenamiento deben cumplir con los siguientes requisitos:

- a) no debe haber control activo de la temperatura
- b) el tanque debe estar conectado al sistema de transporte de gas

Se logra una prevención efectiva de emisiones de CH_4 del digestato cubriendo al mismo durante los primeros 60 días de almacenamiento porque la formación de metano en las condiciones prevalecientes (una planta del mundo real) habrá culminado dentro de ese periodo.

Propiedades higiénicas: La bosta líquida y otros residuos orgánicos pueden contener patógenos capaces de causar infecciones a humanos y animales (Tabla 1). Aunque el porcentaje de hallazgos positivos de salmonella está por debajo del 5 %, se afecta al ganado clínicamente saludable. Para romper el ciclo de infección, es necesario higienizar los digestatos

Tabla 1. Patógenos en bosta líquida y residuos orgánicos

Bacterias	Virus	Parásitos
Salmonella (CS, PS, PE)	Patógenos de la fiebre aftosa	Gusanos redondos
Escherichia coli (CS)	Fiebre porcina	Gusanos en empalizada
Bacterias del ántrax (CS)	Enfermedad vesicular porcina	Trematodos
Brucelas (CS, PS)	Gripe porcina	Trematodo hepático
Leptospiras (CS, CP)	Gastroenteritis transmisible (TGE)	Gusanos pulmonares
Micro bacterias (CS, PS, PE)	Infecciones por rotavirus	Gusanos gastro-intestinales
Bacterias de la erisipela (PS)	Enfermedad de Teschen	
Clostridios (PE)	Enfermedad de Aujeszky	
Estreptococos	Gripe aviar atípica	
Enterobacter	Enfermedad catarral bovina	
	Retro-parvo, echo-entorovirus	

Fuente: Klingler (1996), Alemania

que se han producido exclusivamente a partir de fertilizantes agrícolas de origen animal. Aunque otros sustratos de origen animal, y bioresiduos están sujetos a reglas estrictas sobre higienización, estas reglas no siempre se cumplen; sin embargo, en muchos casos es legalmente permisible no higienizar los fertilizantes de una planta de biogás.

Referente a la fito-higiene, se deben aplicar medidas de higienización, en particular para evitar la expansión de plagas cuarentenadas como son algunas enfermedades de la papa y la remolacha (*Clavibacter michiganensis*, *Synchytrium endobioticum*, *Rhizoctonia solani*, *Polymyxa betae* y *Plasmodiophora brassicae*). Por esta razón, los residuos y el agua residual proveniente de la industria alimentaria deben siempre higienizarse antes de ser utilizada en una planta de biogás (Steinmüller *et al.*, 2007).

Estudios realizados por LTZ (2008) revelaron que al examinar casi 200 bostas y digestatos respecto de fitopatógenos fúngicos característicos del maíz y otros cereales solo se detectó un patógeno en un caso.

En Alemania, de acuerdo con la Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG, 2008) la cobertura de tanques para el almacenamiento de digestatos es un requisito previo necesario si se quiere recibir el bono NawaRo (cultivos energéticos). Esto incluye a todas las plantas cuya capacidad de combustión total excede 1 MW (equivalente a aproximadamente 380 kWel) o cuya capacidad

de almacenamiento de bosta excede 2 500 m³. Aunque eso se aplica a las nuevas plantas, la interpretación de la Ley sigue estando en discusión respecto de las existentes porque, en muchos casos, el re-acondicionamiento de los tanques solamente es posible hasta cierto punto.

A pesar de lo expuesto, el alza del precio de los fertilizantes minerales ha hecho que el transporte, la aplicación de los digestatos y de fertilizantes provenientes de los fundos agrícolas se hagan económicamente interesantes. La consecuencia es que vale la pena afrontar el costo de transporte de los digestatos debido a su valor en nutrientes. Además, las estrategias de fertilización basadas en digestatos y en fertilizantes provenientes de fundos agrícolas son más beneficiosas en términos del equilibrio de energía (Döhler, 1996).

Esos son algunos aspectos de la forma en que Alemania aborda esta problemática, pero al analizar Cuba, se puede apreciar algunas investigaciones referidas al uso de efluentes de biodigestores, dentro de las cuales, se destacan las conducidas por Negrín y Jiménez (2012), ejecutadas con efluentes de origen vacuno y frijoles (variedad "Milagro villaclareño"). Estos autores, a los 90 días de establecido el frijol apreciaron diferencias significativas entre los tratamientos. Con la mayor aplicación del biosólido (9 t ha⁻¹) alcanzaron rendimientos de 2,40 t ha⁻¹.

Utria *et al.* (2008) refieren que la digestión anaeróbica degrada los componentes a formas

moleculares más simples como NH_4^+ , NO_3^- y P_2O_5 , facilitando la asimilación de estos nutrientes por el sistema radicular de las plantas, lo que favorece el rendimiento final de la cosecha. Los abonos orgánicos de origen vegetal o animal tienen la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo y por ende la producción y productividad de los cultivos (Socorro y Martín, 1998; Negrín y Jiménez, 2012). Otros autores mencionados anteriormente en la introducción del tema, han abordado esta situación, sin embargo, se debe tener algunas consideraciones como la factibilidad económico-ambiental del biosólido como abono orgánico.

Según Negrín y Jiménez (2012) los mayores constituyentes de los biosólidos están representados por la materia orgánica oxidable (MO), el calcio (Ca), el nitrógeno (N) y el fósforo (P), condicionado por la alta carga orgánica presente en las excretas del ganado porcino y vacuno principalmente, en relación directa con la base alimentaria de estas especies. El incremento del contenido de materia orgánica facilita la formación de agregados estables y el aumento de la porosidad, permitiendo así que el agua penetre y se mueva dentro del suelo (Abad, 2008).

En Cuba hasta el presente no se utiliza la codigestión de excretas, las instalaciones de biogás existentes son de pequeño formato y una sola etapa. Igualmente, utilizan la mono-fermentación (excretas porcinas o vacunas más agua), siendo muy poco utilizados los tratamientos de los digestatos (solo en el ámbito de proyectos de investigación y en algunas instalaciones de biogás muy puntuales se han ejecutado proyectos en este sentido). Los biodigestores cubanos de forma general están constituidos por: rampa para alimentar la biomasa (excretas más agua), pozo de carga, canal de estabilización, gasómetro, llave de paso y válvula para la salida del biogás, biodigestor y pozo de descarga de los efluentes; sin embargo, hasta el presente se reportan pocos estudios sistemáticos referidos al tratamiento y uso de los efluentes. En la práctica productiva de Villa Clara se aprecia poco uso de los digestatos como biofertilizantes y mejoradores de suelo, lo que puede resolverse si se enfrenta el siguiente **problema**: ¿Cómo mejorar la calidad y utilización de los efluentes en Cuba? Respuesta que es alcanzable con la utilización de los tratamientos más viables desde los puntos de vista técnico y económico para nuestro país.

El desarrollo de cada una de estas técnicas

de tratamientos se basa en protocolos y normas nacionales e internacionales, las cuales son de estricto cumplimiento de acuerdo con las leyes de vertimiento de cada país; sin embargo, se hace necesario la capacitación y el equipamiento suficiente para poder decidir cuál de ellas es más racional. En el caso cubano, esto es posible y factible ya que se cuenta con ambas premisas.

CONCLUSIONES

En Villa Clara y Sancti Spiritus, se ha podido confirmar que el grado de contaminación con que los efluentes abandonan los biodigestores es alta y no cumplen lo establecido en la norma cubana.

En el caso cubano se utiliza de forma generalizada en los biodigestores el método de tratamiento denominado: utilización del digestato sin tratamiento; prácticamente no se manejan los métodos: separación de sólidos, tratamiento posterior de la fase sólida, compostaje, secado, tratamiento posterior de la fase líquida, tecnología de membrana, evaporación y remoción.

Se dispone del conocimiento y equipamiento necesario para llevar a cabo investigaciones y desarrollar las mismas en las condiciones actuales de Cuba.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAD, M. 2008. Aprovechamiento del compost de residuos sólidos urbanos en agricultura. p. 53. En: Orozco, F. y Osorio, W., eds. Residuos orgánicos, aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. Medellín: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Colombia, 151 p.
- CLEMENS, J., WOLTER, M., WULF, S., AHLGRIMM, H.-J. 2002. Methan- und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, in: KTBL-Schrift 406, Emissionen der Tierhaltung, Alemania. pp. 203-214.
- Cuba. 2015. Anuario Estadístico de Cuba. ONEI. Oficina Nacional de Estadística e Información. República de Cuba. Capítulo 9. Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca. pp. 219-246.
- DÖHLER, H. 1996. Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffe, Komposte und Wirtschaftsdünger. In Wasser und Boden, Jahrgang, Alemania, 48 p.

- DÖHLER, H, K. SCHIESSL, M. SCHWAB. 1999. BMBF-Förderschwerpunkt, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und – verwertung. KTBL documento de trabajo 272. KTBL Darmstadt. Alemania.
- ESPEJO, C. y GARCÍA, R. 2010. Tratamiento de purines de ganado porcino en España para minimizar la contaminación de suelos y su impacto ambiental. Universidad de Murcia. España. Disponible en: congresos.um.es/icod/icod2009/paper/view/5391/5181 [Consulta: 20 de enero 2016].
- EBERTSEDER, T. 2007. Düngewirkung von Kompost und von flüssigen Gärrückständen im Vergleich. Humus und Kompost 172008, pp. 64-67. Alemania.
- FRANCESENA, Y. 2016. Impacto ambiental provocado por efluentes de instalaciones de biogás de pequeña y mediana escala en las provincias de la región central de Cuba. Trabajo de diploma (en opción al título de Ingeniero agrícola). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2016. 50 p.
- FNR (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE). 2013. Calidad y utilización de digestato. Editorial FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Alemania. p. 204-220.
- EEG. 2008. Ley sobre el Otorgamiento de Prioridad a Fuentes de Energía Renovable (Ley de Fuentes de Energía Renovable – EEG). 25 de octubre de 2008, Diario Oficial de Leyes Federales I: 2074. Alemania.
- FIGUEROA, V. 1993. La producción porcina en Cuba, Revista ACPA. Vol. 12. No.1, ene/jun 1993. ISSN: 0138-6247.
- FNR. 2009. Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich, Gülzow. Alemania. ISBN: 978-3-9803927-8-5.
- KLINGLER, B. 1996. Hygienisierung von Gülle in Biogasanlagen. En: Biogas-Praxis Grundlagen-Planung-Anlagenbau-Beispiele. Ökobuch Staufen bei Freiburg: 141. Alemania.
- LTZ. 2008. Inhaltsstoffe in Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Informe del proyecto, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ). Alemania.
- LÓPEZ. E., CALERO, A., GÓMEZ, Y., GIL, Z., HENDERSON, D. y JIMÉNEZ, J. 2017. Efecto Agronómico del Biosólido en Cultivo de Tomate (*Solanum lycopersicum*): Control Biológico de *Rhizoctonia solani*. *Cultivos Tropicales*, 38 (1): 13-23.
- MARTÍNEZ, C., MARAÑÓN, E., GARCIA, Y., CUPULL, R., DELGADO, V. 2014. Studies at the biogas plant called “Niña Bonita.” Central University “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba. AGROCENTRO, 2014. (VIth Edition of Agricultural Engineering Symposium). 8 p. ISBN.978-959-250-973-3.
- NEGRÍN, A., JIMÉNEZ, Y. 2012. Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L). *Rev. Cultivos Tropicales*, 33 (2): 13-19.
- NC-27: 2012. “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado”. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (ONN). NC 27:2012. La Habana, Cuba.
- NC-1095-2015. Microbiología del agua. Detección y enumeración de coliformes. Técnicas del número más probable (NMP). Oficina Nacional de Normalización (NC). La Habana. Cuba. 2015. 23 p.
- OBAJA, D., MACÉ, S., MATA-ALVAREZ, J. 2005. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater. *Bioresource Technology*, 96 (1): 7-14.
- PONCE, Y. R. Z. 2007. Implantación de una tecnología sostenible de producción de biogás en la comunidad rural “El Caney de las Mercedes”, en Cuba. Madrid. Tesis (en opción al grado científico de Doctor), Universidad Politécnica de Madrid. España.
- PÉREZ, A. C. L. 2006. Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás.

- Disponible en: www.academia.edu. [Consulta: 8 de septiembre 2015].
- QUINTERO, J. G., VELACO, N. & FERNÁNDEZ, J. F. 2002. Evaluación de una alternativa tecnológica para un sistema de producción de cerdos bajo el enfoque de tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- ROBLES, S. A. y JANSEN, A. 2008. Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso “Fermentación Anaeróbica” para Producción de Biogás. German ProfEC GmbH y German ProfEC-Perú SAC. Reporte No.BM-4-00-1108-1239. Alemania. 10 p.
- RODRÍGUEZ, S., VALDÉS, W., TERRY, A., MONTOTO, V., LÓPEZ, C. (1998). Utilización de los lodos de digestión como bioabonos para el cultivo de especies hortícolas. V taller y Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Viña del Mar, Chile.
- SOCORRO, M., MARTÍN, D. 1998. GRANOS. Talleres Gráficos de la Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos del Instituto Politécnico Nacional. Tresgueras 27 Centro Histórico, México, 1998. DF. 318 p. Mexico.
- SOSAC.M. 2015. Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala y diferentes tecnologías. Trabajo de diploma (en opción al título de Ingeniero Agrícola). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. 80 p.
- STEINMÖLLER, S., MÜLLER, P., PIETSCH, M. 2007. Phytohygienische Anforderungen an Klärschlämme–Regelungsnotwendigkeiten und-möglichkeiten. En: Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453, KTBL, Darmstadt. Alemania.
- UTRIA, E., INÉS, M., REYNALDO, J. A., MORALES, D. Y GOFFE, S. 2008. Los biosólidos de aguas residuales urbanas aplicados con diferentes frecuencias en las propiedades químicas y microbiológicas del suelo, el rendimiento y la calidad de los frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 2008, vol. 29, no. 4, p. 5-11.

Recibido el 14 de febrero de 2017 y aceptado el 12 de diciembre de 2017