

Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes Tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de residuales porcinos

Tania Pérez- Pérez¹, Ileana Pereda- Reyes², Deny Oliva-Merencio³ and Marcelo Zaiat⁴

¹*Instituto de Ciencia Animal, Apartado Postal 24, San José de las Lajas, Mayabeque*

²*Centro de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” (CUJAE).
Marianao, La Habana*

³*Centro de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). IUniversidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría”.
(CUJAE). Marianao, La Habana*

⁴*Biological Processes Laboratory, Center for Research, Development and Innovation in Environmental Engineering, São
Carlos School of Engineering (EESC), University of São Paulo (USP), Brazil
Email: taniap@ica.co.cu*

The growth of pork production in the world favors the excessive generation of manures, so that anaerobic digestion plays an important role as a technology for the treatment of these wastes. The literature shows that in the world, in the last years, the application of high load technologies for the treatment of wastes generated by the pig breeding has increased. In contrast, the anaerobic biodigesters used in Cuban pig breeding currently use high hydraulic retention times and low volumetric organic loads. This involves the use of reactors with high volumes, which lead to huge investments for the treatment of these wastes, which makes these technologies inefficient. It is necessary, from a scientific perspective, to examine the technologies that are used today in the world and to develop researches that allow the fulfillment of the established in the Cuban standards in force on this subject.

Key words: *anaerobic digesters, pig breeding wastes, high load technology.*

El crecimiento de la producción porcina en el mundo favorece la generación desmedida de estiércoles, por lo que la digestión anaerobia desempeña una función importante como tecnología para el tratamiento de estos residuales. La literatura demuestra que en el mundo, en los últimos años, se ha incrementado la aplicación de tecnologías de alta carga para el tratamiento de los residuos generados por la porcicultura. Por el contrario, los biodigestores anaerobios empleados en la porcicultura cubana en la actualidad usan altos tiempos de retención hidráulica y bajas cargas orgánicas volumétricas. Esto implica el uso de reactores con grandes volúmenes, que conllevan a enormes inversiones para el tratamiento de estos residuales, lo que convierte a estas tecnologías en poco eficientes. Es preciso entonces, desde una perspectiva científica, examinar las tecnologías que se utilizan hoy en el mundo y desarrollar investigaciones que permitan el cumplimiento de lo establecido en las normas cubanas vigentes acerca de este tema.

Palabras clave: *digestores anaerobios, residuos de porcicultura, tecnologías de alta carga*

INTRODUCTION

During the last decades, the number of small pork producers has decreased, while the animal population per farm has increased (Deng *et al.* 2014). These conditions have led to a higher concentration of waste in small areas, which requires urgent development of easy-to-implement solutions.

Among the potential solutions for wastes treatment the anaerobic digestion (AD) deserves special attention due to its efficiency and economic feasibility (Sakar *et al.* 2009), as well as its potential for the bioenergy (CH₄) production, reduction of emissions of greenhouse gases and deactivation of pathogens (Massé *et al.* 2011, Abbasi *et al.* 2012, Franke-Whittle *et al.* 2014).

In recent years, significant progress has been obtained in the world through the evolution of high-rate anaerobic reactors, which deal with high volumes of wastewater. Due to their different advantages, the most used include the anaerobic filter (AF), anaerobic sequential broken reactor (ASBR) and the upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB). However,

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas ha disminuido la cantidad de pequeños productores de carne de cerdo, mientras que la población de animales por granja ha aumentado (Deng *et al.* 2014). Estas condiciones han dado lugar a una mayor concentración de los residuos en pequeñas áreas, lo que requiere desarrollar con urgencia soluciones de fácil implementación.

Entre las soluciones potenciales para el tratamiento de residuales, la digestión anaerobia (DA) merece una atención especial, debido a su eficiencia y factibilidad económica (Sakar *et al.* 2009), además de sus potencialidades para la producción de bioenergía (CH₄), reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y desactivación de agentes patógenos (Massé *et al.* 2011, Abbasi *et al.* 2012, Franke-Whittle *et al.* 2014).

En el mundo, en los últimos años, se han obtenido progresos significativos mediante la evolución de los reactores anaerobios de alta tasa, que tratan elevados volúmenes de aguas residuales. Por sus disímiles ventajas, los más utilizados incluyen el filtro anaerobio (FA), el reactor anaerobio discontinuo secuencial (ASBR, por

in Cuba, today, the most used technologies for the treatment of pig wastes comprise low-load reactors, which are inefficient due to their high hydraulic retention times (HRT), which lead to high volumes of reactors and high costs.

The objective of this study is to make a review about the anaerobic technologies applied worldwide in the treatment of pig wastes. It is also intended, to examine the particularities of this theme in Cuba.

PIG WASTES

The world pig production has increased more than 3.5 times over the past 40 years. The tendency is to increase the concentration of animals per farm, even reaching values of thousands of heads. As the demand of pork meat increases, huge amounts of waste are generated around the world, which is associated with increased excreta and wastewater (Lee and Shoda 2008).

In previous decades, pig wastes were used as fertilizers and soil conditioners in which they were generated. However, the intensive cattle rearing has caused serious damage to the environment, including health risks, atmospheric emissions, surface and groundwater contamination, odor dispersion and soil damage (Massé *et al.* 2004, Lim and Fox 2011). Due to the characteristics these wastes have.

Among the atmospheric emissions, the greenhouse gases (methane and nitrous oxide) are highlight, which are the result of spontaneous self-purification of wastes. In turn, the action of manures and slurries in waters and soils is mainly concentrated, in the dispersion of ammonia and nitrates, due to their potential effect on the acidification of the environment and water eutrophication (Benyoucef *et al.* 2013).

Extensive are the studies carried out in the characterization and treatment of pig wastes, in order to reduce their negative effects on the environment. Andreadakis (1992) showed that, approximately, 60.0 % of the total organic matter in the pig wastewater is biodegradable. Similarly, Deng *et al.* (2008) reported that pig manure is composed of readily biodegradable material, and is a good base substrate for biological processes, such as anaerobic digestion, since it contains buffer capacity and a wide variety of nutrients (González-Fernández and García-Encina 2009, Rodríguez *et al.* 2011). These results show that the compounds present in pig manure contribute to the concentration of biochemical oxygen demand (BOD), the main indicator of the organic load responsible for the pollutant power of these wastes.

sus siglas en inglés) y el reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés). Sin embargo, en Cuba, en la actualidad, las tecnologías más usadas para el tratamiento de residuales porcinos comprenden reactores de baja carga, que resultan ineficientes por sus elevados tiempos de retención hidráulica (TRH), que conllevan a grandes volúmenes de los reactores y por consiguiente, a elevados costos.

El objetivo del presente trabajo es realizar una revisión acerca de las tecnologías anaerobias aplicadas mundialmente en el tratamiento de residuales porcinos. Se pretende además, examinar las particularidades de esta temática en Cuba.

RESIDUALES PORCINOS

La producción porcina mundial se ha incrementado en más de 3.5 veces durante los últimos 40 años. La tendencia es a aumentar la concentración de animales por granja, llegando incluso a valores de miles de cabezas. A medida que la demanda de carne de cerdo aumenta, se generan enormes cantidades de desechos en todo el mundo, lo que se asocia al incremento de la cantidad de excreta y aguas residuales (Lee y Shoda 2008).

En décadas anteriores, los desechos de cerdos se utilizaban como fertilizantes y acondicionadores del suelo en el que eran generados. Sin embargo, la cría intensiva de ganado ha ocasionado daños graves al ambiente, que incluyen riesgos sanitarios, emisiones atmosféricas, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, dispersión de olor y daños en suelos (Massé *et al.* 2004, Lim y Fox 2011), debido a las características que presentan estos desechos.

Entre las emisiones atmosféricas, se destacan los gases de efecto invernadero (metano y óxido nitroso), que son el resultado de la espontánea autodepuración de los residuos. A su vez, la acción de los estiércoles y purines en las aguas y suelos se concentra, principalmente, en la dispersión de amoníaco y nitratos, por su efecto potencial en la acidificación del medio y eutrofización de aguas (Benyoucef *et al.* 2013).

Amplios son los estudios realizados en la caracterización y tratamiento de los residuales porcinos, con el propósito de disminuir sus efectos negativos en el ambiente. Andreadakis (1992) mostró que, aproximadamente, 60.0 % de la materia orgánica total en las aguas residuales porcinas es biodegradable. De igual forma, Deng *et al.* (2008) comentaron que el estiércol porcino está compuesto por material fácilmente biodegradable, y constituye buen sustrato base para procesos biológicos, como la digestión anaerobia, pues contiene capacidad tampón y amplia variedad de nutrientes (González-Fernández y García-Encina 2009, Rodríguez *et al.* 2011). Estos resultados muestran que los compuestos presentes en el estiércol porcino contribuyen a la concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), indicador principal de la carga orgánica

Other indicators that cause contamination in the wastes from pig facilities, due to their high concentrations, are suspended solids, chemical oxygen demand (COD), nitrogen, phosphorus and potassium compounds (Girard *et al.* 2004, Klomjek 2016) and gaseous substances such as ammonia, methyl mercaptan and hydrogen sulfide (Rumsey *et al.* 2014).

As is showed, pig wastes have great pollutant power and require an effective treatment before being poured into receivers. Due to the high concentration of biodegradable compounds present in these wastes, the anaerobic treatment can be an effective option to contribute to the environment care.

ANAEROBIC DIGESTION FOR THE BIOGAS PRODUCTION

The anaerobic digestion (AD) is the biological conversion, in the absence of oxygen, that make the facultative and anaerobic bacteria and methanogenic archaeas, from the synthesis of organic matter present in solid wastes (domestic and urban), from animals and plants, and its transformation into methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂), ammonia (NH₃), hydrogen sulfide (H₂S) and nitrogen (N₂) (Batstone and Jensen 2011). This gas mixture is called biogas.

The production of bioenergy from the organic waste, AD is a promising option to mitigate climate change and is considered a sustainable treatment technology (Pantaleo *et al.* 2013). This is because it not only contributes net production of positive energy, but the produced biogas can substitute fossil fuels, so it has a positive effect on the reduction of greenhouse gases (Bernet and Béline 2009, Shanmugam and Horan 2009, Weiland 2010). The AD also generates an effluent that can be applied in agricultural fields for the nutrients recovery, for its properties as fertilizer (Rajagopal *et al.* 2011). This biological process, when compared to aerobic processes, offers many significant advantages, such as low sludge production, lower energy requirements and green energy recovery (Massé *et al.* 2010, Xia *et al.* 2012). In AD, 90.0 % of the available energy is transformed into CH₄ by direct oxidation, and only 10.0 % of the energy is consumed in the microbial growth, while in the aerobic process is consumed, approximately, 50.0 %.

The initial step of the Ad process is the hydrolysis of organic matter. In this one, bacteria and fungi convert macromolecules (proteins, carbohydrates and fats) into amino acids, sugars and volatile fatty acids (Nielsen *et al.* 2007, Leis *et al.* 2014). In the second stage of the process, called acidogenesis, the acidogenic bacteria turn sugars, amino acids and fatty acids into organic acids, alcohols and ketones, acetate, CO₂ and hydrogen. The acetogenic bacteria

responsable del poder contaminante de estos residuos.

Otros indicadores que causan contaminación en los residuos de las instalaciones porcinas, debido a sus altas concentraciones, son los sólidos en suspensión, la demanda química de oxígeno (DQO), los compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio (Girard *et al.* 2014, Klomjek 2016) y las sustancias gaseosas, como el amoníaco, metil-mercaptano e hidrógeno sulfuro (Rumsey *et al.* 2014).

Como se evidencia, los residuales porcinos tienen gran poder contaminante y precisan de un tratamiento efectivo antes de verterse a cuerpos receptores. Debido a la alta concentración de compuestos biodegradables presentes en estos residuales, el tratamiento por vía anaerobia puede ser una opción eficaz para contribuir al cuidado del ambiente.

LA DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

La digestión anaerobia (DA) es la conversión biológica, en ausencia de oxígeno, que realizan las bacterias facultativas y anaerobias y arqueas metanogénicas, a partir de la síntesis de la materia orgánica presente en residuos sólidos (domésticos y urbanos), de animales y plantas, y su transformación en metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y nitrógeno (N₂) (Batstone y Jensen 2011). A esta mezcla de gases se le denomina biogás.

La producción de bioenergía a partir de la DA de residuos orgánicos es una opción prometedora para mitigar el cambio climático y se considera una tecnología de tratamiento sostenible (Pantaleo *et al.* 2013). Esto se debe a que no solo aporta producción neta de energía positiva, sino que el biogás producido puede sustituir combustibles fósiles, por lo que tiene efecto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero (Bernet y Béline 2009, Shanmugam y Horan 2009, Weiland 2010). La DA genera además, un efluente que puede aplicarse en campos agrícolas para la recuperación de nutrientes, por sus propiedades como fertilizante (Rajagopal *et al.* 2011). Este proceso biológico, si se compara con los procesos aerobios ofrece numerosas ventajas significativas, como la baja producción de lodos, menores requerimientos de energía y recuperación de energía verde (Massé *et al.* 2010, Xia *et al.* 2012). En la DA, 90.0 % de la energía disponible se transforma en CH₄ por oxidación directa, y solo 10.0 % de la energía se consume en el crecimiento microbiano, mientras que en el proceso aerobio se consume, aproximadamente, 50.0 %.

El paso inicial del proceso de DA es la hidrólisis de la materia orgánica. En este, las bacterias y hongos convierten las macromoléculas (proteínas, carbohidratos y grasas) en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos volátiles (Nielsen *et al.* 2007, Leis *et al.* 2014). En la segunda etapa del proceso, denominada acidogénesis, las bacterias acidogénicas convierten azúcares, aminoácidos y ácidos grasos a ácidos orgánicos, alcoholes y cetonas, acetato,

transform fatty acids and alcohols into acetate, H₂ and CO₂ in the third stage of the process (acetogenesis). These products are used by methanogenic archaea to form biogas in the fourth stage of AD, called methanogenesis (Pereda *et al.* 2015). In most of the anaerobic treatments of biodegradable wastes, this last step is limiting and therefore, it defines the main parameters of monitoring and control in the process. Methane can be produced by acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens. The changes in the environmental and operational conditions of the reactor (pH, temperature, hydraulic retention time, substrate composition) influence on the composition and dynamics of these communities (Kim *et al.* 2013, Solli *et al.* 2014, Yu *et al.* 2014).

It can be explained that the AD of pig wastes is important because of its environmental and energy effect. Due to the rising fossil fuel costs and the need to mitigate anthropogenic global warming, the biodegradable waste AD is a sustainable management strategy. The biogas production from several types of raw materials has proven to be a renewable source of energy that can be produced sustainably in many countries. Likewise, the generation of an effluent with fertilizing characteristics, gives this process higher relevance. However, the effective treatment of wastes should consider the use of appropriate and economically feasible technologies to comply the environmental standards established in each country.

ANAEROBIC DIGESTION TECHNOLOGIES USED IN THE WORLD FOR PIG WASTES TREATMENT

Anaerobic processes are widely used for pig wastes treatment in reactors of various designs and scales, with the purpose of stabilizing the organic matter with the consequent production of energy in methane form (Hwang *et al.* 2001, Angenent *et al.* 2002, Ahring 2003). The most studied are AF (Oleszkiewicz 1983, Ng and Chin 1988), ASBR (Mace and Mata-Alvarez 2002, Massé *et al.* 2003, 2004, Kim *et al.* 2004, Ga & Ra 2009) and UASB (Lo *et al.* 1994, Sanchez *et al.* 2005, Song *et al.* 2010). The latter are the most used on an industrial scale. Other types of high-load technologies, such as EGSB, have also been considered for the treatment of these wastes, but on a lower scale (López-Fernández *et al.* 2011, Lee and Han 2012). These technologies have as main objective to achieve high of elimination efficiencies, when treating higher volumetric organic loads (VOL) in the lower reactor volume, which guarantees lower HRT with high retention of active biomass (SRT).

The AF is characterized by being robust systems,

CO₂ e hidrógeno. Las bacterias acetogénicas transforman entonces los ácidos grasos y alcoholes en acetato, H₂ y CO₂ en la tercera etapa del proceso (acetogénesis). Estos productos se usan por las arqueas metanogénicas para formar el biogás en la cuarta etapa de la DA, denominada metanogénesis (Pereda *et al.* 2015). En la mayoría de los tratamientos anaerobios de residuos biodegradables, esta última etapa resulta limitante y por consiguiente, define los principales parámetros de seguimiento y control en el proceso. El metano se puede producir por metanógenos acetotróficos e hidrogenotróficos. Los cambios en las condiciones medioambientales y operacionales del reactor (pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica, composición del sustrato) influyen en la composición y dinámica de estas comunidades (Kim *et al.* 2013, Solli *et al.* 2014, Yu *et al.* 2014).

Se puede plantear que la DA de los residuos porcinos tiene importancia por su efecto medioambiental y energético. Debido a los crecientes costos de los combustibles fósiles y la necesidad de mitigar el calentamiento global antropogénico, la DA de residuos biodegradables es una estrategia de gestión sostenible. La producción de biogás a partir de varios tipos de materias primas ha demostrado ser una fuente renovable de energía que se puede producir de forma sostenible en muchos países. De igual forma, la generación de un efluente con características fertilizantes, le confiere a este proceso mayor relevancia. No obstante, el tratamiento efectivo de los residuos debe considerar el uso de tecnologías apropiadas y económicamente factibles para cumplir con las normas medioambientales establecidas en cada país.

TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA UTILIZADAS EN EL MUNDO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUALES PORCINOS

Los procesos anaerobios se utilizan ampliamente para el tratamiento de residuales porcinos en reactores de varios diseños y escalas, con el propósito de estabilizar la materia orgánica con la consecuente producción de energía en forma de metano (Hwang *et al.* 2001, Angenent *et al.* 2002, Ahring 2003). Los más estudiados son los FA (Oleszkiewicz 1983, Ng y Chin 1988), el ASBR (Mace y Mata-Alvarez 2002, Massé *et al.* 2003, 2004, Kim *et al.* 2004, Ga & Ra 2009) y el UASB (Lo *et al.* 1994, Sanchez *et al.* 2005, Song *et al.* 2010). Estos últimos son los más empleados a escala industrial. Otros tipos de tecnologías de alta carga, como los EGSB, también han sido considerados para el tratamiento de estos residuales, pero a menor escala (López-Fernández *et al.* 2011, Lee y Han 2012). Estas tecnologías tienen como objetivo fundamental lograr altas eficiencias de eliminación de DQO, al tratar mayores cargas orgánicas volumétricas (COV) en menor volumen del reactor, lo que garantiza menores TRH con altas retenciones de biomasa activa (TRS).

Los FA se caracterizan por ser sistemas robustos,

with good retention of microorganisms in the medium, which can work at high VOL and low HRT. Oleszkiewicz (1983) studied the treatment of pig wastewater with an AF at 23 °C and obtained removal efficiency of COD of 73.0 % at a VOL of 4.0 kg COD / m³d. Ng and Chin (1988), when treating pig wastewater with an expanded bed anaerobic filter at 30 °C, reported total suspended solids (TSS) and volatile (VSS) of 93.0 % in a HRT of five days. However, the removal efficiency of TSS decreased dramatically to 74.0 % when the HRT decreased to four days. Regardless of its advantages, this configuration is limited to low values of ascending speed, to avoid the dragging of solids with the effluent. This does not allow, sometimes, a good biomass-substrate contact and the efficiency can be affected in some cases.

Likewise, the ASBR is a technology that highlight for its flexibility in operation. Its main advantages are that the reaction and sedimentation occur in the same unit, and as a consequence the biomass is in a dynamic state of abundance. These characteristics make possible that these systems treat solids and liquids waste, and the operating and maintenance costs be minimal (Islam *et al.* 2011). There are several experiences with this type of reactor. Massé *et al.* (2003) used an ASBR at laboratory scale to treat pig excreta and they observed that removal efficiency of COD decreased with decreasing temperature. The values obtained by these authors were 94.2 ± 1.1 % at 20 °C, 78.8 ± 3.0% at 15 °C and 60.4 ± 6.4 % at 10 °C. but Massé *et al.* (2004) in a pilot-scale reactor obtained removal efficiency of COD of 79.5% at 20 °C. Likewise, Ng (1989), with this same configuration, but at a 28 °C temperature, obtained removal efficiency of VSS of 89.0 % at a VOL of 0.4 kg COD / m³d. However, when the latter increased, the efficiency was markedly deteriorated. Similarly, Ndegwa *et al.* (2008) studied an ASBR at different temperatures and obtained that the biogas production remained practically constant at 20 and 35 °C. However, the COD removal slightly decreased from 85.0 to 80.0 % with increasing temperature.

According to the above results, it can be inferred that temperature, such as the VOL and the HRT, has a marked influence on the removal efficiencies of solids and organic matter in the mentioned configurations. For this reason, Zaiat *et al.* (2001) recommended increasing the solids retention time (SRT) to improve the organic matter removal in ASBR reactors.

Many researchers have reported satisfactory performances in the treatment processes of pig wastes with high-rate reactors, based on sludge granulation where high biogas quality is obtained in the range of 70.0-80.0% of the methane content (Mahmoud *et al.* 2003, Kim *et al.* 2004, Najafpour *et al.* 2006). These reactors allow the accumulation of high biomass

con buena retención de microorganismos en el medio soporte, que pueden trabajar a altas COV y TRH bajos. Oleszkiewicz (1983) estudió el tratamiento de las aguas residuales porcinas con un FA a 23 °C y obtuvo eficiencia de eliminación de DQO de 73.0 % a una COV de 4.0 kg DQO/m³d. Ng y Chin (1988), al tratar aguas residuales porcinas con un filtro anaerobio de lecho expandido a 30 °C, informaron eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV) de 93.0 % en un TRH de cinco días. Sin embargo, la eficiencia de remoción de los SST disminuyó drásticamente hasta 74.0 % cuando el TRH disminuyó a cuatro días. Independientemente de sus ventajas, esta configuración se limita a valores pequeños de velocidad ascensional, para evitar el arrastre de sólidos con el efluente. Esto no permite, en ocasiones, un buen contacto biomasa-sustrato y la eficiencia se puede ver afectada en algunos casos.

Asimismo, el ASBR es una tecnología que se destaca por su flexibilidad en la operación. Sus principales ventajas son que la reacción y sedimentación ocurren en la misma unidad, y como consecuencia la biomasa se encuentra en un estado dinámico de abundancia. Estas características facilitan que estos sistemas traten residuos sólidos como líquidos, y que sean mínimos los costos de operación y mantenimiento (Islam *et al.* 2011). Son varias las experiencias con este tipo de reactor. Massé *et al.* (2003) usaron un ASBR a escala de laboratorio para tratar excreta porcina y observaron que la eficiencia de eliminación de DQO disminuyó con la disminución de la temperatura. Los valores obtenidos por estos autores fueron 94.2 ± 1.1% a 20 °C, 78.8 ± 3.0 % a 15 °C y 60.4 ± 6.4 % a 10 °C, pero . Massé *et al.* (2004) en un reactor a escala piloto obtuvieron eficiencia de eliminación de DQO de 79.5 % a 20 °C. Asimismo, Ng (1989), con esta misma configuración, pero a una temperatura de 28°C, obtuvo eficiencia de remoción de SSV de 89.0 % a una COV de 0.4 kg DQO/m³d. Sin embargo, cuando esta última aumentó, la eficiencia se deterioró notablemente. Igualmente, Ndegwa *et al.* (2008) estudiaron un ASBR a diferentes temperaturas y obtuvieron que la producción de biogás se mantuvo prácticamente constante a 20 y 35 °C. Sin embargo, la eliminación de DQO disminuyó ligeramente de 85.0 a 80.0 % con aumento de la temperatura.

De acuerdo con los resultados antes mostrados, se puede inferir que la temperatura, como la COV y el TRH, tienen una marcada influencia en las eficiencias de eliminación de sólidos y materia orgánica en las configuraciones citadas. Por este motivo, Zaiat *et al.* (2001) recomendaron incrementar el tiempo de retención de sólidos (TRS) para mejorar la remoción de materia orgánica en reactores ASBR.

Muchos investigadores han informado comportamientos satisfactorios en los procesos de tratamiento de residuales porcinos con reactores de alta tasa, basados en la granulación del lodo donde se obtiene elevada calidad de biogás en el intervalo entre 70.0 y 80.0 % del contenido de metano (Mahmoud *et al.* 2003,

concentrations in granular sludge form, which results in a process of high efficiency and stability, with short HRT (McHugh *et al.* 2003a, 2003b, Najafpour *et al.* 2006).

Deng *et al.* (2006), when treating pig wastewater in an internal circulation reactor (IC), obtained elimination efficiencies of COD in the range of 60.0 to 80.0 % with organic loads of 6.0 to 7.0 kg COD / m³d. This effluent was subsequently treated in a sequential broken reactor and the COD removal exceeded 95.0 %.

In particular, the upflow sludge blanket reactor (UASB) has converted anaerobic digestion into a competitive technology for high organic load wastewater (Torkian *et al.* 2003, Kim *et al.* 2004). To achieve the advantages of suspended growth and adherence growth, Lo *et al.* (1994) treated pig wastewater in a UASB reactor, to which a carrier medium was placed in the center of the reactor, in a temperature range between 22 and 28 °C. These authors obtained removal efficiency of COD from 95.0 % to VOL of 1.65 kg COD / m³d. However, this efficiency decreased to 57.0 % at a VOL of 3.5 kg/m³d. Campos *et al.* (2005), with the same configuration at 20 h HRT and VOL of 1.42 kg COD/m³d, obtained removal efficiency of COD of 84.0 %.

Pereira-Ramírez *et al.* (2004) used a UASB reactor with recirculation of effluent and HRT of 12 h for treating pig wastewater, varying COD/alkalinity relationship. In this study, the efficiency of COD removal of 85.0% was obtained, for an accessional speed of 0.35 m / h with high VOL (23 kg COD/m³d), while superior speeds promoted instability in the functioning of the reactor, and caused a reduction of organic matter removal, which reached 65.0%.

Rodrigues *et al.* (2010), in a reactor of 11.5 m³, at HRT from 1.7 to 4.1 d, and with VOL between 1.1 and 17.5 kg COD/ m³d, obtained COD removal efficiencies of 92.0 %.

Song *et al.* (2010) studied different hydraulic retention times (7.0, 6.4, 5.0 and 3.5 d) in a volume of 35 m³. During the functioning period, efficiencies of COD and VFA removal were in the range from 74.0 to 78.7% and 89.3 to 96.6%, respectively. These effluent concentrations constituted an efficient removal of organic matter and stable functioning. Associated to high removal efficiency, for different HRT, methane yield values were 71.0, 83.3, 76.9 and 71.9 %, respectively.

Results of the studies in this configuration show that this technology is suitable for the treatment of pig wastes. However, Sánchez *et al.* (2005) concluded that the UASB is not suitable for the treatment of pig manure, based on poor yield for low HRT and high VOL.

As previously stated, treating these wastes with UASB is effective, due to its ability of forming

Kim *et al.* 2004, Najafpour *et al.* 2006). Estos reactores permiten la acumulación de altas concentraciones de biomasa en forma de lodo granular, lo que resulta en un proceso de alta eficiencia y estabilidad, con cortos TRH (McHugh *et al.* 2003a, 2003b, Najafpour *et al.* 2006).

Deng *et al.* (2006), al tratar aguas residuales porcinas en un reactor de circulación interna (CI), obtuvieron eficiencias de eliminación de DQO en el intervalo de 60.0 a 80.0 % con cargas orgánicas de 6.0 a 7.0 kg DQO/m³d. Este efluente se trató posteriormente en un reactor discontinuo secuencial y la eliminación de DQO superó 95.0 %.

En particular, el reactor de flujo ascendente de manto de lodos (UASB) ha convertido a la digestión anaerobia en una tecnología competitiva para aguas residuales de alta carga orgánica (Torkian *et al.* 2003, Kim *et al.* 2004). Para lograr las ventajas del crecimiento suspendido y las del crecimiento adherido, Lo *et al.* (1994) trataron aguas residuales porcinas en un UASB, al que se le colocó un medio soporte en el centro del reactor, en un intervalo de temperaturas entre 22 y 28 °C. Estos autores obtuvieron eficiencia de eliminación de DQO de 95.0 % a COV de 1.65 kg DQO/m³d. Sin embargo, esta eficiencia disminuyó hasta 57.0 % a una COV de 3.5 kg/m³d. Campos *et al.* (2005), con esta misma configuración a TRH de 20 h y COV de 1.42 kg DQO/m³d, obtuvieron eficiencia de eliminación de DQO de 84.0 %.

Pereira-Ramírez *et al.* (2004) utilizaron un reactor UASB con recirculación del efluente y TRH de 12 h para el tratamiento de aguas residuales porcinas, variando la relación DQO/Alcalinidad. En este estudio, la eficiencia de eliminación de DQO de 85.0 % se obtuvo para una velocidad ascensional de 0.35 m/h con elevada COV (23 kgDQO/m³d), mientras que velocidades superiores promovieron inestabilidad en el funcionamiento del reactor, y ocasionaron disminución de la remoción de la materia orgánica, que llegó hasta 65.0 %.

Rodrigues *et al.* (2010), en un reactor de 11.5 m³ a TRH en el intervalo de 1.7 a 4.1 d, y con COV entre 1.1 y 17.5 kg DQO/m³d, obtuvieron eficiencias de eliminación de DQO de 92.0 %.

Song *et al.* (2010) estudiaron en un volumen de 35 m³ diferentes tiempos de retención hidráulica (7.0, 6.4, 5.0 y 3.5 d). Durante el período de operación, las eficiencias de eliminación de DQO y AGVs estuvieron en el intervalo de 74.0 a 78.7 % y de 89.3 a 96.6 %, respectivamente. Estas concentraciones del efluente representaron eficiente remoción de materia orgánica y operación estable. Asociados a una alta eficiencia de remoción, para los diferentes TRH, los valores de rendimiento de metano fueron de 71.0, 83.3, 76.9 y 71.9 %, respectivamente.

Los resultados de los estudios en esta configuración demuestran que esta tecnología es recomendable para el tratamiento de residuales porcinos. Sin embargo, Sánchez *et al.* (2005) concluyeron que el UASB no es adecuado para el tratamiento de estiércol de cerdo basado en un rendimiento deficiente para bajos TRH y altas COV.

Como se puede observar, es eficaz el tratamiento de

a granular sludge with excellent sedimentation characteristics, which allows to study in a wider range of VOL and lower HRT than in other configurations.

Apart from the different advantages that have made it successful, studies by various authors (Hickey *et al.* 1991, McHugh *et al.* 2004) show that one of the major disadvantages of UASB reactors are the long starting periods, due to the time required for the process of anaerobic granulation. Together with this fact, a good degree of mixture between biological sludge and feeding is not always achieved, resulting in insufficient mass transfer and appearance of concentration gradients. For this reason, a modified version of this configuration is produced, which is called anaerobic reactor of expanded granular sludge bed (EGSB), which operates at higher accessional speeds by recirculation of the effluent and is designed with higher height/diameter ratio, around 20 (Kato *et al.* 1994, O'Reilly and Colleran 2005). High accessional speed of the liquid applied to these reactors, allows a better hydraulic agitation of the sludge bed, resulting in a higher expansion of the bed and, consequently, improves biomass-substrate contact. This may reduce considerably the volume of dead zones, preferential flows and shortcuts (Nicolella 2000, Fuentes *et al.* 2011) and influence positively on the increase of treatment efficiency (López and Borzacconi 2011). In recent years, there has been more focus on EGSB reactors than on UASB reactors, because they endure higher organic loads, which favor their hydrodynamics (Puñal *et al.* 2003, Teixeira *et al.* 2014)

These reactors have been little studied, compared to UASB. However, due to its many advantages, they are considered as a technology with broad prospects for high-load wastes. Some research have used an EGSB reactor for treating effluents from pig breeding, mainly the studies of López-Fernández *et al.* (2011), Lee and Han (2012).

The first combined the EGSB reactor with ultrafiltration system and functioning at a HRT of 3.8 d and VOL of 2.76 g COD/Ld, obtained total COD removal efficiency of about 70.0 %. The second authors, using also a combination of reactors, with a batch reactor after EGSB, obtained COD removal efficiency of 42.5%, with VOL between 2.0 and 6.0 kg COD/m³d at a HRT of 24 h.

It is considered here that previous results do not reflect the actual efficiency of this technology by the use of one or more units of treatment previous to the bioreactor, so it is more suitable, for these cases, to refer to efficiency only in terms of BOD. In these units, biodegradable fraction decreases and refractal fraction of the waste remains constant, which is demonstrated by the low efficiencies obtained in terms of removed COD. Due to the high relation of

estos residuales con el UASB, debido a su capacidad de formación de un lodo granular con excelentes características de sedimentación, que permite que se trabaje en un amplio intervalo de COV y menores TRH que en otras configuraciones.

Independientemente de las disímiles ventajas que lo han hecho exitoso, estudios realizados por diferentes autores (Hickey *et al.* 1991, McHugh *et al.* 2004) reflejan que uno de los grandes inconvenientes de los reactores UASB son los prolongados períodos de arrancada, como consecuencia del tiempo que requiere el proceso de granulación anaeróbica. Unido a esto, no siempre se logra un buen grado de mezcla entre el lodo biológico y la alimentación, lo que resulta en insuficiente transferencia de masa y aparición de gradientes de concentración. Por este motivo, se crea una versión modificada de esta configuración, a la que se le llama reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB), que opera a mayores velocidades ascensionales por la recirculación del efluente y está diseñado con mayor relación altura/diámetro, aproximadamente igual a 20 (Kato *et al.* 1994, O'Reilly y Colleran 2005). La alta velocidad ascensional del líquido aplicada a estos reactores permite mejor agitación hidráulica del lecho de lodo, lo que resulta en una mayor expansión del lecho y consecuentemente, mejora el contacto biomasa-sustrato. Esto puede reducir considerablemente el volumen de zonas muertas, flujos preferenciales y cortocircuitos (Nicolella 2000, Fuentes *et al.* 2011) e influir de manera positiva en el aumento de la eficiencia del tratamiento (López y Borzacconi 2011). En los últimos años, se ha prestado mayor atención a los reactores EGSB que a los UASB, debido a que soportan mayores cargas orgánicas, lo que favorece su hidrodinámica (Puñal *et al.* 2003, Teixeira *et al.* 2014).

Estos reactores han sido poco estudiados si se comparan con los UASB. Sin embargo, debido a sus múltiples ventajas constituyen una tecnología con amplias perspectivas para residuales de alta carga. Entre las investigaciones encontradas que utilizaron un reactor EGSB para el tratamiento de efluentes de porcicultura, se destacan los trabajos de López-Fernández *et al.* (2011), Lee y Han (2012).

Los primeros combinaron el EGSB con el sistema de ultrafiltración y operando a TRH de 3.8 d y COV de 2.76 g DQO/Ld, obtuvieron eficiencia de eliminación de DQO total de aproximadamente 70.0 %. Los segundos, al utilizar también combinación de reactores, con reactor discontinuo después del EGSB, obtuvieron eficiencia de eliminación de DQO de 42.5 %, con COV entre 2.0 y 6.0 kg DQO/m³d a TRH de 24 h.

Se considera aquí que los resultados anteriores no reflejan la eficiencia real que tiene esta tecnología por el uso de una o varias unidades de tratamiento anteriores al biorreactor, por lo que resulta más adecuado para estos casos, referir la eficiencia solo en términos de DBO. En estas unidades se disminuye la fracción biodegradable y permanece constante la fracción refractaria del residual, lo que se demuestra en las bajas eficiencias obtenidas en

biodegradability (BOD/COD) of pig waste, which is between 0.3 and 0.8 (Ng 1989, Villamar *et al.* 2013, Mofokeng *et al.* 2016), and high VOL, to which EGSB reactors are able to function, it should be used as the only treatment unit.

Apart from the fact that high load technologies are more complex in their functioning, they allow to obtain higher robustness to operate with lower HRT and high VOL, leading to a better cost-benefit relationship. However, studies on training and development of granules should be widened, in order to reduce startup time and improve efficiency of organic load removal with a more appropriate balance of environmental conditions inside the reactors.

ANAEROBIC TREATMENTS USED IN CUBA

For many years, breeding pig wastes were treated in conventional anaerobic biodigesters. However, this type of reactor, normally used in the treatment of these semi-solid wastes, with total solids concentrations around 6.0 %, are not suitable for the treatment of dilute wastewater, with solids concentrations of 0.1 to 3.0 %, due to the need of very high HRT and consequently, biodigesters with very high volumes.

One of the most used biodigestors, not only in Cuba but in the world, is the fixed dome. In our country there are approximately 400 plants of this type, according to the latest census conducted by the National Biogas Group (NBG) in 2015. The designs that currently exist allow adequate treatment of wastewater, up to 500 pigs (Sosa *et al.* 2014), because as its operation explained, they are located underground and lead to the movement of important volumes of soil. The efficiency of the fixed dome technology reduces the contaminant load between 75.0-90.0 %, depending on the pig waste characteristics, as well as the efficiency and control of operation of the biodigester. The effluents treated in fixed dome biodigesters can be arranged in an oxidation pond and used for crop irrigation, due to their low total solids percent.

There are also, to a lesser number, the tubular biodigesters or "Plug Flow", many of them installed by researchers and specialists of the Center for the Development of Biogas (CPDB) from the Institute of Pig Research and, approximately, 120 have been installed in the Western provinces. In Cuba, these biodigesters are used in farms of up to 150 pigs, since for their correct functioning and adequate treatment of wastes, they must have a diameter/length (d/l) of 1/6 relation (Sosa *et al.* 2014).

These reactors are not effective for the treatment of large volumes of wastewater (Oviedo 2011, Guardado

términos de DQO eliminada. Debido a la alta relación de biodegradabilidad (DBO/DQO) que poseen los residuales porcinos, la que se encuentra entre 0.3 y 0.8 (Ng 1989, Villamar *et al.* 2013, Mofokeng *et al.* 2016), y las altas COV a las que son capaces de operar los reactores EGSB, se deben usar como única unidad de tratamiento.

Independientemente de que las tecnologías de alta carga son más complejas en su funcionamiento, permiten obtener mayor robustez al operar con menores TRH y elevadas COV, lo que conlleva a que sea mayor la relación costo-beneficio. No obstante, se debe profundizar en los estudios de formación y desarrollo de los gránulos, para disminuir el tiempo de arrancada y mejorar la eficiencia en la eliminación de la carga orgánica con un balance más apropiado de las condiciones medioambientales dentro de los reactores.

TRATAMIENTOS ANAEROBIOS UTILIZADOS EN CUBA

Durante muchos años, los residuos de la porcicultura se trataron en biodigestores anaerobios convencionales. Sin embargo, este tipo de reactor, normalmente utilizado en el tratamiento de estos residuos semi-sólidos, con concentraciones de sólidos totales en torno al 6.0 %, no son adecuados para el tratamiento de aguas residuales diluidas, con concentraciones de sólidos de 0.1 a 3.0 %, debido a la necesidad de TRH muy altos y consecuentemente, biodigestores con volúmenes muy elevados.

Uno de los biodigestores más empleados, no solo en Cuba sino en el mundo, es el de cúpula fija. En nuestro país existen aproximadamente 400 plantas de este tipo, según el último censo realizado por el Grupo Nacional de Biogás (GNB) en el 2015. Los diseños que existen actualmente permiten el tratamiento adecuado de aguas residuales, hasta de 500 cerdos (Sosa *et al.* 2014), ya que como explica su funcionamiento, se ubican de forma soterrada y conllevan al movimiento de volúmenes importantes de suelo. La eficiencia de la tecnología de cúpula fija reduce la carga contaminante entre 75.0-90.0 %, en dependencia de las características del residual porcino, así como de la eficiencia y control de operación del biodigester. Los efluentes tratados en biodigestores de cúpula fija pueden ser dispuestos en una laguna de oxidación y empleados para el riego de cultivos, debido a su bajo por ciento de sólidos totales.

También existen, en menor número, los biodigestores tubulares o "Plug Flow", muchos de ellos instalados por investigadores y especialistas del Centro para el Desarrollo del Biogás (CPDB) del Instituto de Investigaciones Porcinas y, aproximadamente, 120 se han instalado en las provincias occidentales. En Cuba, estos biodigestores se utilizan en granjas de hasta 150 cerdos, ya que para su correcto funcionamiento y adecuado tratamiento de los residuales, deben tener una relación diámetro/largo (d/l) de 1/6 (Sosa *et al.* 2014).

Estos reactores no son efectivos para el tratamiento

2013). For this reason, the technology used in Cuba for pig integral centers with a capacity higher than 500 pigs, is a piston-flow reactor with rigid cover, which allows the treatment of the generated load up to 2000 heads. These plants are capable of generating a volume of biogas that supplies the consumption of the farms where they are installed (Díaz 2012). However, due to the high HRT and the low loads, large volume reactors are needed, with the consequent low effectiveness in the treatment of these wastes.

A tendency in recent years has been the use of covered ponds which use structures and domes of geomembrane, in which the organic matter oxidation and gas retention occur. High removal efficiencies of COD are obtained in this technology, ranging from 78.0 to 90.0 %, but at high hydraulic retention times (HRT) with a minimum of 10 d (Blanco *et al.* 2015). On the other hand, the useful life of the geomembranes is short, so it is expensive, not only for the large volumes of ponds, but also for the cost of replacing or maintaining the geomembranes.

Although international experiences show that high-load technologies are more robust and effective from the environmental and energy point of view, in the design of treatment plants of pig wastes in Cuban industrial facilities there is no projection of the use of these technologies.

FINAL CONSIDERATIONS

Taking into account the characteristics of the pig wastes, the anaerobic digestion technology allows its degradation with high efficiency. In the world, the UASB technology is the most used in the anaerobic treatment of these wastes, because it allows the accumulation of high biomass concentrations in granular sludge form. This results in a process of high efficiency and stability, in which it is possible to work at high VOL and lower HRT than in other configurations. Regardless of this, biomass-substrate contact is still insufficient, which does not favor the hydrodynamic performance. For these reasons, the international experience shows that EGSB technology has higher advantages and is promising for the treatment of high-load wastes.

According to what has been analyzed so far, the UASB and EGSB configurations have wide potentialities of use in pig wastes treatment which are generated in facilities on an industrial scale in Cuba. However, in both cases, studies should be carried out to establish the most appropriate environmental and operational conditions, in which higher efficiencies of removal of solids and organic matter were obtained, allowing the disposal of a higher quality effluent.

de grandes volúmenes de aguas residuales (Oviedo 2011, Guardado 2013). Por este motivo, la tecnología empleada en Cuba para los centros integrales porcinos con capacidad superior a 500 cerdos, es un reactor de flujo pistón con cubierta rígida, que permite el tratamiento de la carga generada hasta 2000 cabezas. Estas plantas son capaces de generar un volumen de biogás que abastece el consumo de las granjas donde se encuentran instaladas (Díaz 2012). Sin embargo, debido a los altos TRH y las bajas cargas, se necesitan reactores de grandes volúmenes, con la consecuente baja efectividad en el tratamiento de estos residuales.

Una tendencia en los últimos años ha sido el uso de las lagunas tapadas que utilizan estructuras y cúpulas de geomembrana, en las que ocurre la oxidación de la materia orgánica y la retención de los gases. En esta tecnología se obtienen altas eficiencias de eliminación de DQO, en el intervalo de 78.0 a 90.0 %, pero a elevados tiempos de retención hidráulicos (TRH) con mínimo de 10 d (Blanco *et al.* 2015). Por otra parte, el tiempo de vida útil de las geomembranas es corto, por lo que se ve encarecida, no solo por los grandes volúmenes de las lagunas, sino también por el costo que representa el reemplazo o mantenimiento de las geomembranas.

A pesar de que las experiencias internacionales demuestran que las tecnologías de alta carga son más robustas y efectivas desde el punto de vista ambiental y energético, en la concepción de las plantas de tratamiento de residuales porcinos en instalaciones industriales cubanas no existe la proyección del uso de estas tecnologías.

CONSIDERACIONES FINALES

Teniendo en cuenta las características de los residuales porcinos, la tecnología de digestión anaerobia permite su degradación con altas eficiencia. En el mundo, la tecnología UASB es la más empleada en el tratamiento anaerobio de estos residuales, debido a que permite la acumulación de altas concentraciones de biomasa en forma de lodo granular. Esto resulta en un proceso de alta eficiencia y estabilidad, en el que es posible trabajar a elevadas COV y menores TRH que en otras configuraciones. Independientemente de esto, aún es insuficiente el contacto biomasa-sustrato, lo que no favorece el comportamiento hidrodinámico. Por estos motivos, la experiencia internacional demuestra que la tecnología EGSB tiene mayores ventajas y es promisoría para el tratamiento de residuales de alta carga.

De acuerdo con lo analizado hasta aquí, las configuraciones UASB y EGSB tienen amplias potencialidades de uso en el tratamiento de residuales porcinos que se generan en instalaciones a escala industrial en Cuba. No obstante, en ambos casos, se debe profundizar en estudios para establecer las condiciones medioambientales y operacionales más apropiadas, en las que se obtengan mayores eficiencias de eliminación de sólidos y materia orgánica, lo que permite la disposición de un efluente con mayor calidad.

References

- Abbasi, T., Tauseef, S. M. & Abbasi, S. A. 2012. "Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5): 3228–3242, ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.046.
- Ahring, B.K. 2003. Perspectives for anaerobic digestion. In: Ahring, B.K. (Ed.), *Biomethanation*. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, pp. 3–7.
- Andreadakis, A. D. 1992. "Anaerobic Digestion of Piggery Wastes". *Water Science and Technology*, 25(1): 9–16, ISSN: 0273-1223, 1996-9732.
- Angenent, L.T., Sung, S., Raskin, L. 2002. "Methanogenic population dynamics during startup of a full-scale anaerobic sequencing batch reactor treating swine waste". *Water Research*, 36: 4648–4654.
- Batstone, D. J. & Jensen, P. D. 2011. "Anaerobic Processes". In: *Treatise on Water Science*, vol. 4, Oxford, U.K.: Academic Press, pp. 615–639, ISBN: 978-0-444-53199-5, DOI: 10.1016/B978-0-444-53199-5.00097-X, Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978044453199500097X>, [Consulted: November 10, 2016].
- Bernet, N. & Béline, F. 2009. "Challenges and innovations on biological treatment of livestock effluents". *Bioresource Technology*, 100(22): 5431–5436, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.02.003.
- Blanco, D., Suárez, J., Jiménez, J., González, F., Álvarez, L. M., Cabeza E. & Verde, J. 2015. Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 38(4): 441-447, ISSN: 2078-8452
- Campos, C. M. M., Damasceno, L. H. S., Mochizuki, E. T. & Botelho, C. G. 2005. "Avaliação do desempenho do reator anaeróbico de manta de lodo (uasb) em escala laboratorial na remoção da carga orgânica de águas residuárias da suinocultura". *Ciência e Agrotecnologia*, 29(2): 390–399, ISSN: 1413-7054, DOI: 10.1590/S1413-70542005000200017.
- Deng, L., Li, Y., Chen, Z., Liu, G. & Yang, H. 2014. "Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation". *Applied Energy*, 114: 504–511, ISSN: 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.018.
- Deng, L., Zheng, P., Chen, Z. & Mahmood, Q. 2008. "Improvement in post-treatment of digested swine wastewater". *Bioresource Technology*, 99(8): 3136–3145, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.061.
- Deng, L.-W., Zheng, P. & Chen, Z.-A. 2006. "Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC–SBR process with bypass of raw wastewater". *Process Biochemistry*, 41(4): 965–969, ISSN: 1359-5113, DOI: 10.1016/j.procbio.2005.10.022.
- Díaz, Y. M. 2012. Influencia de la adición de residuos de matadero procesados a dietas porcinas en la producción y calidad del biogás y los biofertilizantes en biodigestores de cúpula fija La Habana. M.Sc. Thesis, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba.
- Durán-Barrantes, M. de la M., Álvarez-Mateos, M. P., Carta, E. F. de los Á., Romero, G. F. & Fiestas-Ros, de U. J. A. 2008. "Kinetics and effect of temperature in anaerobic fluidised bed reactors with clayey supports". *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 22(4): 393–399, ISSN: 0352-9568.
- Franke-Whittle, I. H., Walter, A., Ebner, C. & Insam, H. 2014. "Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities". *Waste Management*, 34(11): 2080–2089, ISSN: 0956-053X, DOI: 10.1016/j.wasman.2014.07.020.
- Fuentes, M., Scenna, N. J. & Aguirre, P. A. 2011. "A coupling model for EGSB bioreactors: Hydrodynamics and anaerobic digestion processes". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(3): 316–324, ISSN: 0255-2701, DOI: 10.1016/j.cep.2011.01.005.
- Ga, C. H. & Ra, C. S. 2009. "Real-time control of oxic phase using pH (mV)-time profile in swine wastewater treatment". *Journal of Hazardous Materials*, 172(1): 61–67, ISSN: 0304-3894, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.133.
- Girard, M., Nikiema, J., Brzezinski, R., Buelna, G. & Heitz, M. 2014. "A review of the environmental pollution originating from the piggery industry and of the available mitigation technologies: towards the simultaneous biofiltration of swine slurry and methane". *Journal of Environmental Engineering and Science*, 9(1): 80–92, ISSN: 1496-2551, 1496-256X, DOI: 10.1680/jees.2014.9.1.80.
- González-Fernández, C. & García-Encina, P. A. 2009. "Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry". *Biomass and Bioenergy*, 33(8): 1065–1069, ISSN: 0961-9534, DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.03.008.
- Guardado, J. A. 2013. "El uso de biodigestores de cúpula fija en el tratamiento de residuales porcinos. Experiencias y lecciones aprendidas en Cuba". In: *Transferencia de tecnología para el tratamiento anaeróbico de pequeñas y medianas instalaciones porcinas*, La Habana, Cuba: PNUD.
- Hickey, R.F., Wu, W.M., Veiga, M.C. & Jones S. 1991. Start-up, operation, monitoring and control of high-rate anaerobic treatment system. *Water Science and Technology*, 24 (8): 207-255.
- Hwang, S., Lee, Y., Yang, K. 2001. "Maximization of acetic acid production in partial acidogenesis of swine wastewater". *Biotechnology and Bioengineering*, 75: 521–529.
- Islam, M.N., Park, K.J. & Alam, M.J. 2011. Treatment of swine wastewater using sequencing batch reactor. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 4(2): 4753,
- Kato, M. T., Field, J. A., Versteeg, P. & Lettinga, G. 1994. "Feasibility of expanded granular sludge bed reactors for the anaerobic treatment of low-strength soluble wastewaters". *Biotechnology and Bioengineering*, 44(4): 469–479, ISSN: 0006-3592, 1097-0290, DOI: 10.1002/bit.260440410.
- Kim, J., Kim, W. & Lee, C. 2013. "Absolute dominance of hydrogenotrophic methanogens in full-scale anaerobic sewage sludge digesters". *Journal of Environmental Sciences*, 25(11): 2272–2280, ISSN: 1001-0742, DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60299-X.

- Klomjek, P. 2016. "Swine wastewater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland planted with Napier grass". *Sustainable Environment Research*, 26(5): 217–223, ISSN: 2468-2039, DOI: 10.1016/j.serj.2016.03.001.
- Lee, H. & Shoda, M. 2008. "Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method". *Journal of Hazardous Materials*, 153(3): 1314–1319, ISSN: 0304-3894, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.097.
- Lee, Y.-S. & Han, G.-B. 2012. "Pig slurry treatment by a hybrid multi-stage unit system consisting of an ATAD and an EGSB followed by a SBR reactor". *Biosystems Engineering*, 111(3): 243–250, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.11.014.
- Leis, S., Dresch, P., Peintner, U., Fliegerová, K., Sandbichler, A. M., Insam, H. & Podmirseg, S. M. 2014. "Finding a robust strain for biomethanation: Anaerobic fungi (Neocallimastigomycota) from the Alpine ibex (*Capra ibex*) and their associated methanogens". *Anaerobe*, 29: 34–43, ISSN: 1075-9964, DOI: 10.1016/j.anaerobe.2013.12.002.
- Lim, S. J. & Fox, P. 2011. "A kinetic evaluation of anaerobic treatment of swine wastewater at two temperatures in a temperate climate zone". *Bioresource Technology*, 102(4): 3724–3729, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.11.113.
- Lo, K. V., Liao, P. H. & Gao, Y. C. 1994. "Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors". *Bioresource Technology*, 47(2): 153–157, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/0960-8524(94)90114-7.
- López, I. & Borzacconi, L. 2011. "Modelling of an EGSB treating sugarcane vinasse using first-order variable kinetics". *Water Science & Technology*, 64(10): 2080–2088, ISSN: 0273-1223, DOI: 10.2166/wst.2011.697.
- López-Fernández, R., Aristizábal, C. & Irusta, R. 2011. "Ultrafiltration as an advanced tertiary treatment of anaerobically digested swine manure liquid fraction: A practical and theoretical study". *Journal of Membrane Science*, 375(1–2): 268–275, ISSN: 0376-7388, DOI: 10.1016/j.memsci.2011.03.051.
- Mace, S. & Mata-Alvarez, J. 2002. "Utilization of SBR technology for wastewater treatment: an overview". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(23): 5539–5553, ISSN: 0888-5885, DOI: 10.1021/ie0201821.
- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H. & Lettinga, G. 2003. "Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review". *Bioresource Technology*, 90(1): 1–9, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00095-6.
- Massé, D., Gilbert, Y. & Topp, E. 2011. "Pathogen removal in farm-scale psychrophilic anaerobic digesters processing swine manure". *Bioresource Technology*, 102(2): 641–646, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.020.
- Massé, D. I., Croteau, F., Masse, L. & Danesh, S. 2004. "The effect of scale-up on the digestion of swine manure slurry in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors". *Transactions of the ASAE*, 47(4): 1367–1373, ISSN: 2151-0059, DOI: 10.13031/2013.16541.
- Massé, D., Masse, L. & Croteau, F. 2003. "The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure". *Bioresource Technology*, 89(1): 57–62, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00009-9.
- McHugh, S., Carton, M., Mahony, T. & O'Flaherty, V. 2003a. "Methanogenic population structure in a variety of anaerobic bioreactors". *FEMS Microbiology Letters*, 219(2): 297–304, ISSN: 03781097, 15746968, DOI: 10.1016/S0378-1097(03)00055-7.
- McHugh, S., O'Reilly, C., Mahony, T., Colleran, E. & O'Flaherty, V. 2003b. "Anaerobic Granular Sludge Bioreactor Technology". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2(2–4): 225–245, ISSN: 1569-1705, DOI: 10.1023/B:RESB.0000040465.45300.97.
- McHugh, S., Carton, M., Collins, G. & O'Flaherty, V. 2004. "Reactor performance and microbial community dynamics during anaerobic biological treatment of wastewaters at 16–37 °C". *FEMS Microbiology Ecology*, 48 (3): 369–378.
- Mofokeng, D.S., Adeleke, R. & Aiyegoro O. A. 2016. The analysis of physicochemical characteristics of pig farm seepage and its possible impact on the receiving natural environment. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 10(8): 242-252, ISSN: 1996-0786, DOI: 10.5897/AJEST2016.2084
- Najafpour, G. D., Zinatizadeh, A. A. L., Mohamed, A. R., Hasnain Isa, M. & Nasrollahzadeh, H. 2006. "High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor". *Process Biochemistry*, 41(2): 370–379, ISSN: 1359-5113, DOI: 10.1016/j.procbio.2005.06.031.
- Ndegwa, P.M., Hamilton, D.W., Lalman, J.A. & Cumba, H.J. 2008. "Effects of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs) treating swine waste". *Bioresource Technology*, 99:1972–1980,
- Ng, W. J. 1989. "A sequencing batch anaerobic reactor for treating piggery wastewater". *Biological Wastes*, 28(1): 39–51, ISSN: 0269-7483, DOI: 10.1016/0269-7483(89)90048-7.
- Ng, W. J. & Chin, K. K. 1988. "Treatment of piggery wastewater by expanded-bed anaerobic filters". *Biological Wastes*, 26(3): 215–228, ISSN: 0269-7483, DOI: 10.1016/0269-7483(88)90167-X.
- Nicolella, C. 2000. "Wastewater treatment with particulate biofilm reactors". *Journal of Biotechnology*, 80(1): 1–33, ISSN: 0168-1656, DOI: 10.1016/S0168-1656(00)00229-7.
- Nielsen, H., Uellendahl, H. & Ahring, B. 2007. "Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter". *Biomass and Bioenergy*, 31(11–12): 820–830, ISSN: 0961-9534, DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.04.004.
- Oleszkiewicz, J. A. 1983. "A comparison of anaerobic treatments of low concentration piggery wastewaters". *Agricultural Wastes*, 8(4): 215–231, ISSN: 0141-4607, DOI: 10.1016/0141-4607(83)90091-4.
- O'Reilly, C. & Colleran, E. 2005. "Microbial sulphate reduction during anaerobic digestion: EGSB process performance and potential for nitrite suppression of SRB activity". *Water Science and Technology*, 52(1–2): 371–376, ISSN: 0273-1223, 1996-9732.
- Oviedo, H. 2011. *Biogás: experiencias en el municipio Bartolomé Masó*. Bayamo, Cuba: Universidad de Granma.
- Pantaleo, A., Gennaro, B. D. & Shah, N. 2013. "Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20: 57–70, ISSN: 1364-0321,

- DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.068.
- Pereda-Reyes, I. Pagés-Díaz, J. & Sárvári-Horváth, I. 2015. Biodegradation and Bioremediation of Polluted Systems - New Advances and Technologies. Chapter 3: Anaerobic Biodegradation of Solid Substrates from Agroindustrial Activities - Slaughterhouse Wastes and Agrowastes.
- Pereira-Ramírez, O., Quadro, M., Antunes, R. & Koetz, P. 2004. "Influência da recirculação e da alcalinidade no desempenho de um reator uasb no tratamento de efluente de suinocultura". *Current Agricultural Science and Technology*, 10(1): 103–110, ISSN: 2317-2436, DOI: 10.18539/cast.v10i1.664.
- Puñal, A., Brauchi, S., Reyes, J. G. & Chamy, R. 2003. "Dynamics of extracellular polymeric substances in UASB and EGSB reactors treating medium and low concentrated wastewaters". *Water Science and Technology*, 48(6): 41–49, ISSN: 0273-1223, 1996-9732.
- Rajagopal, R., Rousseau, P., Bernet, N. & Béline, F. 2011. "Combined anaerobic and activated sludge anoxic/oxic treatment for piggery wastewater". *Bioresource Technology*, 102(3): 2185–2192, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.09.112.
- Rodrigues, L. S., da Silva, I. J., Zocrato, M. C. de O., Papa, D. N., Sperling, M. V. & de Oliveira, P. R. 2010. "Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(1): 94–100, ISSN: 1807-1929, DOI: 10.1590/S1415-43662010000100013.
- Rodríguez, D. C., Belmonte, M., Peñuela, G., Campos, J. L. & Vidal, G. 2011. "Behaviour of molecular weight distribution for the liquid fraction of pig slurry treated by anaerobic digestion". *Environmental Technology*, 32(4): 419–425, ISSN: 0959-3330, 1479-487X, DOI: 10.1080/09593330.2010.501821.
- Rumsey, I. C., Aneja, V. P. & Lonneman, W. A. 2014. "Characterizing reduced sulfur compounds emissions from a swine concentrated animal feeding operation". *Atmospheric Environment*, 94: 458–466, ISSN: 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.041.
- Sakar, S., Yetilmmezsoy, K. & Kocak, E. 2009. "Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment - a literature review". *Waste Management & Research*, 27(1): 3–18, ISSN: 0734-242X, DOI: 10.1177/0734242X07079060.
- Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A. & Colmenarejo, M. F. 2005. "Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste". *Bioresource Technology*, 96(3): 335–344, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2004.04.003.
- Shanmugam, P. & Horan, N. J. 2009. "Optimising the biogas production from leather fleshing waste by co-digestion with MSW". *Bioresource Technology*, 100(18): 4117–4120, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.052.
- Solli, L., Bergersen, O., Sørheim, R. & Briseid, T. 2014. "Effects of a gradually increased load of fish waste silage in co-digestion with cow manure on methane production". *Waste Management*, 34(8): 1553–1559, ISSN: 0956-053X, DOI: 10.1016/j.wasman.2014.04.011.
- Song, M., Shin, S. G. & Hwang, S. 2010. "Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater". *Bioresource Technology*, 101(1): S23–S28, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.054.
- Sosa, R., Díaz, Y. M., Cruz, T. & de la Fuente, J. L. 2014. "Diversification and overviews of anaerobic digestion of Cuban pig breeding". *Cuban Journal of Agricultural Science*, 48(1): 67–72, ISSN: 2079-3480.
- Teixeira, C. G., Pérez, T.P., Pereda, R. I., Oliva, M. D., Zaiat, M. & Hong, K. W. 2014. "Mathematical Modeling of the Hydrodynamics of an EGSB Reactor". *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 8(6): 602–610, ISSN: 1934-7375.
- Torkian, A., Eqbali, A., Hashemian, S.J. 2003. "The effect of organic loading rate on the performance of UASB reactor treating slaughterhouse effluent". *Resources Conservation and Recycling*, 40: 1–11,
- Villamar, C.A., Rodríguez, D.C., López, D., Peñuela, G. & Vidal, G. 2013. "Effect of the generation and physical-chemical characterization of swine and dairy cattle slurries on treatment technologies". *Waste Manage Res.*, 31(8): 820–828
- Weiland, P. 2010. "Biogas production: current state and perspectives". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4): 849–860, ISSN: 0175-7598, 1432-0614, DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7.
- Yu, D., Kurolo, J. M., Lähde, K., Kymäläinen, M., Sinkkonen, A. & Romantschuk, M. 2014. "Biogas production and methanogenic archaeal community in mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion processes". *Journal of Environmental Management*, 143: 54–60, ISSN: 0301-4797, DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.04.025.
- Zaiat, M., Rodrigues, J. A. D., Ratusznei, S. M., de Camargo, E. F. M. & Borzani, W. 2001. "Anaerobic sequencing batch reactors for wastewater treatment: a developing technology". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55(1): 29–35, ISSN: 0175-7598, 1432-0614, DOI: 10.1007/s002530000475.