

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Carrera de Ingeniería Agrícola



Trabajo de Diploma

IMPACTO AMBIENTAL PROVOCADO POR EFLUENTES DE
INSTALACIONES DE BIOGÁS DE PEQUEÑA Y MEDIANA
ESCALA EN LAS PROVINCIAS DE LA REGION CENTRAL DE
CUBA

Autor: Yosiel Francesena López

Tutor: Dr. C. Carlos M. Martínez Hernández

Santa Clara, Cuba

2016

Pensamiento

Pensamiento

“El tamaño de tus sueños siempre debe exceder tu capacidad actual para alcanzarlos”.

Ellen Johnson Sirleaf, Premio Nobel de la Paz

Dedicatoria



Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma en primer lugar a mi abuelo Alberto López Álvarez

(q.e.p.d) que me dio estudio hasta su último día de vida.

A mis Padres: Nery B. López Hernández y Joel Francesena Álvarez por tener la paciencia y dedicación como forjadores para concluir mis metas en mis estudios superiores de profesionalización.

A mi abuela Nereida F. Hernández Calderón.

A mí querido Adonis González Portieles

A mis tías Pomposa M. Hernández Calderón y Marilyn Francesena.

A mi madrina Zenaida Iznaga Palacio.

A mi segunda mamá Idania M. Rodríguez Jiménez.

A mi amigo y hermano Osley.

A mis amigas del alma Carmen Rosa y Niurisleidys, Niudys.

A todos a los que de una u otra forma me ayudaron en la realización de esta tesis.

Yosiel Francesena

Agradecimientos



Agradecimientos

A Dios que me dio la vida, el ser, la inteligencia y me iluminó para hacer este trabajo.

A mis padres Bárbara y Joel por su hermosa guía, por ser siempre luz en mi vida y su extraordinario sacrificio.

A mi Agui que es la razón de mi existir.

A Adonis mi segundo papá que ocupa un lugar especial en mi corazón.

A mis tías Marilyn y Mercedes por su cariño y amor.

A mi madrina Zenaida por creer en mí aun cuando yo no lo hacía.

A mi segunda madre del alma Idania por su amor y comprensión en mis momentos más difíciles.

A mis amigos de la UCLV por ser mi familia todo este tiempo en especial a mis nuevos hermanos Mario, Ale, Lanyer, Javi, Frandy y Yainel.

A mi tutor Carlos Martínez por su tiempo, esfuerzo y su gran dedicación en la confección de este trabajo.

A mi fiel amiga Gabriela por todo su afecto y ternura.

A mis vecinos que siempre esperaron lo mejor de mí.

En fin a todas las personas que de una forma u otra compartieron en algún momento en mi estancia por la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.

Resumen



Resumen

El trabajo se realizó con el objetivo de determinar las propiedades de los efluentes (digestatos) como biofertilizantes; así como la posibilidad de la descontaminación de los mismos. Los efluentes fueron tomados, en tres digestores anaerobios de cúpula fija ubicados en la región central del país. Para llevar a cabo esta investigación se determinaron los siguientes aspectos: las características físico-químicas y microbiológicas de los afluentes y efluentes, el estudio de diferentes cargas contaminantes, la utilización de filtros secundarios y terciarios (biofiltros); así como su efecto como biofertilizante, en dependencia de diferentes grados de dilución en agua (50, 75 y 90%). Como conclusiones se arriban a los siguientes criterios: la carga microbiana puede ser reducida utilizando filtros secundarios y terciarios (<1000 NMP/100 mL). El análisis de los efluentes como bioestimulantes mostró un efecto positivo cuando los mismos son diluidos en un 90% con agua (80 % germinación). La remoción de DQO, mostro efectos positivos cuando se aplican filtros secundarios y terciarios (8 - 69,69%), sin embargo en algunos casos aun no cumple con la norma cubana de vertimientos NC-27.1999.

Abstract



Abstract

The work was carried out with the objective of determining the properties of the effluents (digestate) as biofertilizer; as well as the possibility of the decontamination of the same ones. The effluents were taken, in three anaerobic digesters of fixed dome located in the central region of Cuba. To carry out this investigation the following aspects were determined: the physical-chemical and microbiological characteristics of the influents and effluents, the study of different loads pollutants, the use of secondary and third filters (bio-filters); as well as their effect like biofertilizers, in dependence of different degrees of water dilution (50, 75 and 90%). As summations it arrives to the following approaches: the microbial load can be reduced using secondary and third filters (<1000 NMP/100 mL). The analysis of the effluents like bio-stimulates showed a positive effect when the same ones are diluted in 90% with water (80% germination). The removal of DQO, showed positive effects when secondary and third filters are applied (8 - 69, 69%), however in some cases not yet fulfills the Cuban norm NC-27.1999.

Índice



Índice

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 1. Sistemas de producción porcina..... | 4 |
| 2. Efectos de la producción porcina y potencial de los desechos producidos | 5 |
| 3. Tasas de excreción porcinas | 6 |
| 4. Características de los efluentes porcinos | 8 |
| 4.1 Propiedades, nutrientes y sustancias que proporcionan valor | 9 |
| 4.2. Parámetros Físicos | 11 |
| 4.3. Parámetros Físico-químicos | 13 |
| 4.4. Parámetros Biológicos..... | 17 |
| 5. Sistemas de tratamiento de aguas residuales | 17 |
| 5.1. Biodigestores | 19 |
| 6. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales (<i>Lemna minor</i>) | 22 |
| 7. Filtros sanitarios | 23 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 26 |
| 2.1 Descripción de los filtros secundarios y las piscinas experimentales (biofiltro) a pequeña escala para la valoración de los efluentes..... | 26 |
| 2.2 Diagnóstico del estado actual de biodigestores anaerobios de diferentes tecnologías instalados a pequeña escala | 28 |
| 2.3 Características físico-químicas y microbiológicas de los afluentes y efluentes de los biodigestores objeto de estudio | 28 |
| 2.3.1 Determinación del pH en los afluentes y los efluentes..... | 28 |
| 2.3.2 Determinación de la carga microbiana patógena en los afluentes y los efluentes | 28 |
| 2.3.3. Cálculo del crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en el biofiltro. | 29 |
| 2.3.4 Cálculo del flujo o caudal de afluentes y efluentes: | 30 |
| 2.3.5. Producción cuantitativa del flujo de efluentes (digestato) en el plantel porcino de la UCLV..... | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.6. Determinación de las características de los efluentes obtenidos en cada biodigestor. Propiedades como bioestimulantes..... | 31 |
| 2.3.7. Análisis microbiológico del suelo | 32 |
| 2.3.8. Propuesta de filtros sanitarios secundarios y terciarios a escala real | 32 |
| 2.4 Análisis estadístico..... | 32 |
| CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 34 |
| 3.2 Resultados del diagnóstico del estado actual de biodigestores anaerobios de diferentes tecnologías instalados a pequeña escala | 34 |
| 3.3 Resultados de la caracterización química y microbiológica de los afluentes y efluentes de los biodigestores objeto de estudio | 34 |
| 3.3.1. Resultados de la determinación del pH en los afluentes y los efluentes | 34 |
| 3.3.2. Resultados de la determinación de la carga microbiana patógena en los afluentes y los efluentes..... | 35 |
| 3.3.3. Resultados del crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada lenteja de agua (Lemna minor) en el biofiltro. | 37 |
| 3.3.4. Resultados de la producción cuantitativa del flujo de efluentes (digestato) en el plantel porcino de la UCLV..... | 37 |
| 3.3.5. Resultados de las propiedades de los efluentes como bioestimulantes..... | 38 |
| 3.3.6. Resultados con respecto a la carga contaminante (DQO) de los sustratos evaluados..... | 38 |
| 3.3.7. Resultados del análisis microbiológico del suelo | 39 |
| 3.3.8. Resultado de la propuesta de filtros sanitarios secundarios y terciarios a escala real..... | 40 |
| 4. Resultados del análisis estadístico..... | 43 |
| CONCLUSIONES | 47 |
| RECOMENDACIONES | 50 |
| BIBLIOGRAFÍA | |
| ANEXOS | |

Introducción



Introducción

INTRODUCCIÓN

La rama porcina en Cuba comenzó a desarrollarse a un ritmo acelerado y creciente a partir de 1969 con la creación del Combinado Porcino Nacional (Figuroa, 1994). Según informes del MINAGRI, en 2009 las ventas de carne porcina al Estado por el sector cooperativo y campesino significaron el 70% de lo producido nacionalmente.

Algunos de los impactos ambientales de esta producción son: contaminación del aire, la pérdida de la biodiversidad de especies, la contaminación del agua por vertimientos directo al medio sin tratamiento adecuado hacia cuerpos receptores de cuencas de ríos, presas que son utilizadas para regadíos o el consumo.

Las emisiones al medio ambiente generadas por una granja de porcino se pueden originar en la propia granja, o bien durante el almacenamiento, tratamiento o aplicación del purín. Pueden ser emisiones directas al suelo, aguas subterráneas y superficiales, básicamente en forma de purín; o emisiones al aire, en forma de gases, olores, polvo o ruido. Las emisiones más importantes son las relacionadas con el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que fomentan especialmente los fenómenos de: 1) eutrofización o enriquecimiento de nutrientes en el agua (el aumento de la concentración de compuestos de nitrógeno y fósforo provoca un crecimiento acelerado de las algas o las plantas acuáticas superiores, causando trastornos negativos en el equilibrio de las poblaciones biológicas presentes en el medio acuático y en la propia calidad del agua); y 2) acidificación de suelos y aguas (la reacción ácida de los distintos compuestos producen variaciones del pH que afectan al ecosistema en general)(Espejo and García, 2010)

Con el fortalecimiento que se está dando a las leyes sobre el vertimiento de aguas residuales es necesario que todas las actividades susceptibles de degradar el ambiente establezcan sistemas de descontaminación eficientes. Desafortunadamente en el país se ha avanzado relativamente poco sobre sistemas de 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).

Los procesos biológicos utilizados en su mayoría se han enfocado en la remoción de materia orgánica (digestores anaerobios, lagunas anaerobias y facultativas).Utilizando para el tratamiento de las aguas residuales porcinas en su gran parte procesos biológicos y muy poco los químicos(Escalante, 2002).

El manejo de estas aguas residuales ha sido desde tiempo atrás un problema debido a las grandes inversiones que deben de realizarse en plantas de tratamiento con el fin de depurar esta agua antes de su vertimiento a una fuente superficial. De allí ha surgido la necesidad de investigar técnicas innovadoras para el tratamiento de estos desechos, a bajos costos, como es el caso del tratamiento con plantas acuáticas (Barba, 2002). Las especies de “Jacinto de agua” (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna minor*) se han usado previamente para la descontaminación o reducción de los niveles de contaminantes en el agua (Arenas et al., 2011).

Una solución lógica es la de tratar los efluentes con tecnologías de tipo pasivo que necesitan muy poca intervención técnica. El proceso de biofiltración sobre medio de soporte orgánico representa una de estas soluciones(Garzón-Zúñiga et al., 2012).La gran diseminación actual de instalaciones de biogás de pequeño formato a escala productiva en las provincias centrales de Cuba y teniendo en cuenta los pocos estudios publicados sobre el uso y disposición final de los efluentes (digestatos) de estas instalaciones, hace necesario acometer un estudio exhaustivo de esta temática.

Ante la problemática expuesta nuestro trabajo abordara el siguiente **Problema científico**: ¿Cómo mejorar la inocuidad de los efluentes (digestatos) porcinos que se vierten indiscriminadamente al medio ambiente?

Por todo lo antes mencionado el **objeto de estudio** de esta investigación se centra en los efluentes (digestatos) que salen de los digestores anaerobios de pequeña escala y de las diferentes tecnologías más utilizados en la región central de Cuba.

Por esta razón, en este trabajo se planteó la siguiente **hipótesis**: con el empleo de los filtros sanitarios secundarios y terciarios, será posible disminuir la carga contaminante de los efluentes porcinos.

Objetivo general:

Determinar el grado de inocuidad de los efluentes (digestatos); así como sus cualidades como biofertilizantes.

Objetivos específicos:

1. Diagnosticar el estado actual de los filtros sanitarios secundarios y terciarios (biofiltros) en digestores anaerobios de tecnologías de cúpula fija instalados a pequeña escala.
2. Determinar las características físico-químicas y microbiológicas de los afluentes y efluentes (digestatos) en digestores de las tecnologías de cúpula fija.
3. Proponer el diseño de filtros sanitarios secundarios y terciarios (biofiltros) en digestores de las tecnologías de cúpula fija.

Capítulo I

CAPITULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Sistemas de producción porcina

Tanto en nuestro país como en el resto del mundo existen distintos grados de intensidad en la explotación del cerdo, esto significa diferentes relaciones entre proporciones de capital y mano de obra empleados por cada unidad de tierra en ocupación, tal como se definen a continuación.

- Sistema extensivo: Este sistema también llamado “a campo” se define por una baja inversión por hectárea. Consiste en producir grupos de cerdos en corrales con pasturas, bebederos y refugios. En la alimentación pueden encontrarse diferentes variantes: la más difundida está basada en pasturas con suplementación de granos. Los sistemas al aire libre pertenecen mayoritariamente a establecimientos de pequeña a mediana magnitud asociados con agricultura. Esta característica le confiere mayor sustentabilidad al sistema a partir de la diversificación de la empresa. La rotación de lotes agrícolas con porcinos mantiene la estructura de los suelos y asegura estabilidad en el rendimiento de los granos. El capital invertido en instalaciones es menor que en otros sistemas pero se necesitan grandes extensiones de campo (Vicari, 2012).

Este sistema no alcanzó en el país los índices productivos que el potencial del sistema lo permite, observándose en el manejo reproductivo y del parto y la lactancia los puntos críticos más importantes.

- Sistema mixto: Este sistema consiste en la combinación estratégica de las características de los sistemas extensivos y en confinamiento, con el objetivo de aprovechar racional y económicamente la superficie disponible ofreciendo a los animales las condiciones apropiadas de manejo. Se define por desarrollar etapas como gestación y parto-lactancia a campo y destete-terminación confinados. Del sistema extensivo aprovecha las ventajas proporcionadas por el suelo. Del intensivo utiliza los beneficios que brindan el servicio y parto controlados, y la terminación en confinamiento. Este tipo de producción requiere una inversión moderada de capital.

- Sistema intensivo: El sistema intensivo es el conjunto de instalaciones y prácticas que tienen como finalidad la producción de cerdos utilizando la menor área posible. Este caso presenta la máxima relación de intensidad, siendo la clave el empleo de una superficie mínima aún a costa de una gran inversión en capital y mano de obra. Se procede al confinamiento de los animales durante toda su vida. Debido a esto se requieren instalaciones adecuadas a cada etapa del desarrollo, estricto control de las raciones proporcionadas haciéndose imprescindible la aplicación del conocimiento técnico especializado (Vicari, 2012).

2. Efectos de la producción porcina y potencial de los desechos producidos

La contaminación producida por una explotación porcina puede variar de acuerdo al estado fisiológico de los animales y al tipo de alimentación utilizada. El grado en que esta contaminación afecta las fuentes de agua depende de la cantidad de agua usada, la separación de sólidos y el manejo dado a los residuos.

Estos contaminantes en muchos casos, al menos en explotaciones porcinas tradicionales, son comunes que sean vertidos a algún río, quebrada o canal de drenaje cercano. Vale la pena examinar entonces, algunas características de la producción porcina en particular y de los sistemas productivos agropecuarios, en general, que estimulan la generación y vertimiento de residuos al ambiente.

Algunas de estas características se explican a continuación:

- Producción especializada con poca o nula integración: La existencia de producciones de una sola especie vegetal (monocultivos) o animal hace que la mayoría de los insumos necesarios en el proceso productivo sean importados y que los desechos producidos se descarguen al ambiente. Se estimula entonces la entrada y salida de recursos con poco o nulo reciclaje dentro del sistema.
- No hay reutilización de las aguas servidas por la falta de integración: Como consecuencia de lo expuesto en el punto anterior, los residuos líquidos y sólidos, en especial las excretas, no pueden ser usadas en actividades de fertilización o producción de energía.
- Pérdida de energía y nutrientes en el proceso: Los residuos que resultan de la explotación poseen energía, materia orgánica y nutriente, que pueden ser utilizados

y se pierden en el proceso. Estos recursos no aprovechados deben obtenerse en el mercado, lo que a su vez tiene implicaciones económicas.

- **Prioridad al rendimiento financiero en el corto plazo:** La preocupación por los efectos ambientales negativos de la producción ha sido generalmente olvidada o relegada a un segundo plano. Recientemente ha crecido la conciencia hacia dichos efectos o simplemente éstos han sido impuestos mediante regulaciones ambientales. En este orden de ideas, tradicionalmente lo más importante era la posibilidad de un rendimiento económico en el corto plazo.

Los planteamientos anteriormente mencionados indican que la contaminación aparece como resultado de un proceso ineficiente o incompleto que no utiliza de manera apropiada los recursos que posee o que genera. Un contaminante, desde esta perspectiva, es un recurso en el lugar equivocado (Living, 1996).

De esta forma, en lugar de considerar los desechos porcinos como un problema, se pueden mirar como una fuente de recursos útiles en la producción agropecuaria. La contaminación es el resultado de formas de producción inadecuadas que permiten enormes fugas en el proceso y que, por tanto, son ineficientes en el uso de los recursos y poco rentables a largo plazo. La tendencia predominante hacia la especialización de los rubros productivos dificulta la utilización de los subproductos resultantes en el proceso, por lo cual se privilegia la entrada y salida de insumos y no el reciclaje interno. En este tipo de sistemas lo más importante es el rendimiento económico a corto plazo desestimando el deterioro que se causa a los recursos naturales.

3. Tasas de excreción porcinas

Parte del alimento sólido y del agua se transforma en ganancia de peso y parte en formas de energía liberada al medio. Normalmente, un cerdo en crecimiento excreta entre 50 y 60% de los sólidos fijos y entre 10 y 20% de la materia orgánica del alimento (Taiganides, 1963). Los principales componentes de la materia sólida en las excretas son los sólidos orgánicos e inorgánicos.

Las tasas de excreción de heces y orina están relacionadas con la edad del animal, su madurez fisiológica, la cantidad y calidad del alimento ingerido, el volumen de

agua consumida, el clima y otros factores menos importantes. Por tal motivo, no es posible, ni práctico, definir con precisión la cantidad de excretas por día. La Tabla 1 muestra las tasas de excreción tomadas de ocho diferentes fuentes, ubicadas en Estados Unidos, Sudamérica y de las regiones tropicales de Asia, como resultado de un promedio estadístico en una gran variedad de granjas.

Tabla1. Tasa diaria de excreción (Kg estiércol/100 Kg PV) Fuente:(Taiganides et al., 1996)

| Cerdo | Lechón | Destete | Hembra lactante | Crecimiento | Finalización | Hembra seca | Hembra gestante | Verraco | Promedio |
|----------|--------|---------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|---------|----------|
| Mínimo | 6,8 | 6,6 | 6,0 | 5,9 | 5,8 | 3,3 | 2,7 | 2,1 | 5,0 |
| Promedio | 9,0 | 8,6 | 8,1 | 7,1 | 7,0 | 5,0 | 3,4 | 2,9 | 6,2 |
| Máximo | 12,3 | 11,7 | 11 | 9,7 | 9,5 | 6,9 | 4,6 | 4,0 | 8,0 |

En la Figura 1 se observa las tasas de excreción diaria por cada tipo de cerdo, expresado en porcentaje de peso vivo (PV) por día o Kg de excrementos por un cerdo de 100 Kg de peso vivo o Unidad de Producción Animal (UPA) por día. Los lechones, destetes y hembras lactantes excretan entre el 8–9% de su PV por día; los cerdos en crecimiento y finalización excretan cerca del 7% de su PV, mientras que los sementales y las hembras gestantes y secas, animales que se les limita el acceso al alimento, excretan cerca del 3% de su PV por día.

Con base a las fuentes anteriormente mencionadas, la orina representa menos del 50% de la excreta. El contenido de humedad de las excretas es de 88%, por lo que el contenido de materia seca es el resto (12%). Por otra parte, la densidad de heces y orina es menor a 1,0 g/cm³ (Taiganides et al., 1996).

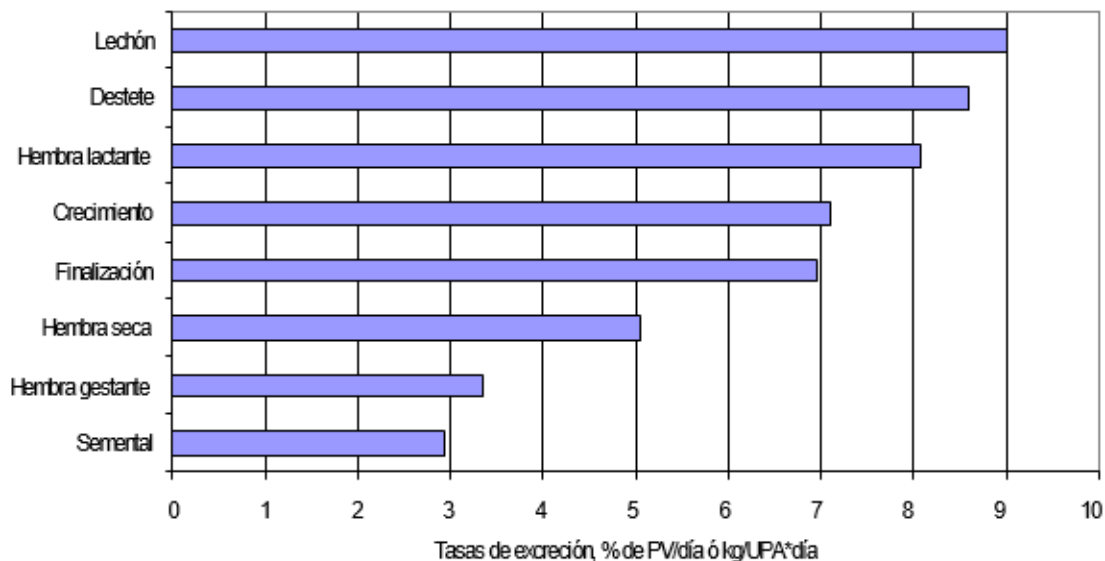


Fig.1. Tasas de excreción diaria de los cerdos. Fuente:(Taiganides et al., 1996).

En cuanto a la generación de excretas, en la Tabla 1.2 se muestra la producción de heces y orina por tipo de cerdo, expresado en Kg/día, observándose que tanto las cerdas y el verraco excretan en mayor cantidad, mientras los otros tipos de cerdo producen menos.

Tabla 1.2. Producción de heces y orina procedentes de diferentes tipos de cerdos. Fuente:(Taiganides et al., 1996)

| Tipo de cerdo | Heces (Kg/día) | Orina (Kg/día) | Total (Kg/día) |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Destetados (30-60días) | 0,9-1,4 | 1,6-2,0 | 2,5-3,4 |
| Ceba (60-220días) | 3,0-3,4 | 3,5-4,0 | 6,5-7,4 |
| Cerda | 7,5-8,5 | 8,0-9,0 | 15,5-17,5 |
| Verraco | 7,0-8,0 | 8,0-8,5 | 14,0-16,5 |

4. Características de los efluentes porcinos

Las características de las deyecciones se presentan en términos de cantidades de sólidos, contenido de nutrientes primarios y secundarios, micronutrientes, metales, entre otros.

Es de importancia destacar que las relaciones entre los diferentes constituyentes de los sólidos totales cambian con la adición de agua y con el tiempo, sobre todo por tratarse de materia orgánica que se descompone una vez excretada.

La determinación de las características físico – químicas de los efluentes líquidos de granjas porcinas han permitido clasificarlos como altamente agresivos. A continuación se presentan los parámetros que se determinan para conocer la calidad del efluente que luego se compararan con la normativa ambiental vigente, en descarga a cuerpos de agua y calidad mínima para agua de regadío (Quintero et al., 2002).

4.1 Propiedades, nutrientes y sustancias que proporcionan valor

De acuerdo con la GUIA SOBRE EL BIOGAS (2013) las propiedades y constituyentes del digestato se determinan esencialmente por los materiales utilizados para la digestión anaeróbica; así como por el proceso de digestión mismo. Las plantas de biogás agrícola en Alemania usan principalmente lodo líquido de ganado y cerdos, bosta de ganado y cerdos y guano de aves de engorde de aves. Es menos común el uso de fertilizante agrícola proveniente de granjas de gallinas ponedoras debido a los altos concentrados de amoníaco y a los residuos de la alimentación suplementaria con calcio. Debido a las reglas sobre remuneración estipuladas en la Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG), sólo algunos operadores de plantas continúan concentrándose exclusivamente en el uso de cultivos energéticos. No obstante, se debe mencionar los efectos que se conocen y valoran desde hace tiempo de la digestión del fertilizante agrícola sobre las propiedades del digestato:

- 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, zoonosis y fitopatógenos).

- eficiencia mejorada 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 fácilmente solubles por el proceso de degradación anaeróbica y, por lo tanto, son más fáciles de absorber.

Ahí donde se utiliza principalmente cultivos energéticos para producir biogás, los procesos biológicos con sustratos/material de alimentación similares son comparables con aquellos que ocurren en el tracto digestivo del ganado. Por lo tanto, esto está destinado a permitir la producción de un digestato con propiedades similares a las de un fertilizante agrícola líquido.

Ello lo confirma un estudio que llevó a cabo el LTZ Augustenberg (Centro Augustenberg de Tecnología Agrícola), el cual examinó digestatos de fundos que funcionan en Baden-Württemberg respecto de la calidad y cantidad de nutrientes, de sustancias que proporcionan valor, y del efecto fertilizante. La Tabla 1.3 presenta los parámetros de los digestatos. El estudio trató de digestatos provenientes de la digestión de bosta de ganado y cultivos energéticos; de bosta de cerdo y de cultivos energéticos; principalmente de cultivos energéticos; y de residuos (a veces mezclados con cultivos energéticos). Se analizaron muestras de control de bosta no tratada para validar los resultados.

Los resultados clave del estudio son:

- el contenido de materia seca del digestato (7% de FM en promedio) es de alrededor del 2% menor que el de bosta cruda;
- la concentración total de nitrógeno en los digestatos con 4,6 a 4,8 kg/t de FM es ligeramente mayor que en la bosta de ganado;
- la proporción de C: N en los digestatos es de aproximadamente 5 o 6 y, de este modo, significativamente menor que en la bosta cruda (C: N 10);
- la degradación de materia orgánica hace que el nitrógeno enlazado orgánicamente se convierta en nitrógeno enlazado inorgánicamente y resulta, en consecuencia, en

que la fracción de amoníaco constituye una mayor proporción (aproximadamente 60% a 70%) del nitrógeno total en digestatos;

- los digestatos mezclados con digestato de bosta de cerdo y digestato de bioresiduos tienden a tener concentraciones más altas de fósforo y nitrógeno de amoníaco, pero menores concentraciones de materia seca y potasio así como menores concentraciones de materia orgánica que los digestatos de bosta de ganado o cultivos energéticos o de mezclas de los dos;

- no se detecta diferencias significativas respecto del magnesio, calcio o azufre.

Tabla 1.3. Comparación de parámetros y propiedades que proporcionan valor de digestatos y fertilizantes agrícolas. Fuente: GUIA SOBRE EL BIOGAS (2013).

| Parámetro | Unidad/ nombre | Bosta cruda | | Digestato | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|-------------------------|--------------------------------------|
| | | Principalmente bosta de ganado | Bosta de Ganado y cultivos energéticos | Bosta de cerdo y cultivos energéticos | Cultivos energéticos | Residuos (y cultivos energéticos) |
| Materia Seca | % de FM | 9,1 | 7,3 | 5,6 | 7,0 | 6,1 |
| Acidez | PH | 7,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| Proporción de carbono a nitrógeno | C:N | 10,8 | 6,8 | 5,1 | 6,4 | 5,2 |
| Sustancias que actúan de manera alcalina | KgCaO/de FM | 2,9 | - | - | 3,7 | 3,5 |
| | | | | Kg/ t FM | | |
| Nitrógeno | N _{Total} | 4,1 | 4,6 | 4,6 | 4,7 | 4,8 |
| Nitrato de amonio | NH ₄ -N | 1,8 | 2,6 | 3,1 | 2,7 | 2,9 |
| Fósforo | P ₂ O ₅ | 1,9 | 2,5 | 3,5 | 1,8 | 1,8 |
| Potasio | K ₂ O | 4,1 | 5,3 | 4,2 | 5,0 | 3,9 |
| Magnesio | MgO | 1,02 | 0,91 | 0,82 | 0,84 | 0,7 |
| Calcio | CaO | 2,3 | 2,2 | 1,6 | 2,1 | 2,1 |
| Azufre | S | 0,41 | 0,35 | 0,29 | 0,33 | 0,32 |
| Materia Orgánica | OM | 74,3 | 53,3 | 41,4 | 5,1 | 4,2 |

4.2. Parámetros Físicos

La característica física más importante de los líquidos residuales de una granja porcina es el contenido y distribución de sólidos o residuos.

Sólidos: Los Sólidos Totales (STT), se componen de sólidos suspendidos totales (SST) y disueltos totales (SDT). Los sólidos suspendidos totales se clasifican en sólidos suspendidos volátiles (SSV) y fijos (SSF), los sólidos disueltos totales en sólidos disueltos volátiles (SDV) y fijos (SDF).

Sólidos Totales (STT, mg/l): Los sólidos que quedan después de la evaporación del agua a 103°C constituyen los sólidos totales. Este es un parámetro crítico en el diseño de sistemas de manejo, bombeo y en la caracterización del agua residual. Son la suma de los Sólidos Volátiles Totales y los Sólidos Fijos Totales.

Sólidos Volátiles Totales (SVT, mg/l): Representan la materia orgánica y se expresan generalmente como un porcentaje de los STT en las excretas frescas de los cerdos. Alrededor de 50% de los SVT de las excretas porcinas es degradable por bacterias. Los SVT son un parámetro que se usa en el diseño de fórmulas para los procesos de tratamiento.

Sólidos Fijos Totales (SFT, mg/l): Son las cenizas minerales que permanecen después de quemar los sólidos totales a 550°C en una mufla. Constituyen el contenido mineral que no se puede reducir biológicamente.

Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/l): Constituyen la diferencia entre los sólidos totales (STT) de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. Los sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos fijos se refieren, respectivamente, al contenido orgánico e inorgánico (mineral) de los sólidos suspendidos.

Sólidos Disueltos Totales (SDT, mg/l): Se componen de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones que se encuentran presentes en disolución verdadera en el agua. Los sólidos disueltos volátiles y sólidos disueltos fijos se refieren, respectivamente, al contenido orgánico e inorgánico (mineral) de los sólidos disueltos.

Sólidos Sedimentables (SS, ml/l): Una fracción de los sólidos suspendidos la constituyen los sólidos sedimentables, que permiten estimar la cantidad de lodos que puede ser removida por sedimentación y se determinan utilizando cono Imhoff.

Sólidos Flotantes (SFL, ml/l): Consisten en sólidos que son más ligeros que el agua, como fibras, plásticos, objetos de madera, grasa, aceite, etc. Algunos de los

lodos del fondo se transforman en sólidos flotantes durante la descomposición anaerobia, cuando las burbujas del gas se convierten en el medio de transporte de estos sólidos (Quintero et al., 2002).

4.3. Parámetros Físico-químicos

Los compuestos orgánicos normalmente están formados por la combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y otros elementos como nitrógeno, fósforo y azufre.

Estos compuestos incluyen proteínas, carbohidratos, aceites y grasas. Se han desarrollado diferentes métodos para determinar el contenido de materia orgánica en un agua residual. Actualmente los métodos comúnmente utilizados son la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO, mg/l): Se define como la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para estabilizar la materia orgánica bajo condiciones aerobias. Para asegurar que los resultados obtenidos mediante este ensayo sean representativos, la muestra deberá ser convenientemente diluida con agua, previamente preparada, a fin de que existan nutrientes y oxígeno disponibles durante el período de ensayo. El período de incubación generalmente es de 5 días a 20°C, aun cuando pueden utilizarse otros períodos de tiempo y temperatura. La masa de DBO generada por cerdo por día es de dos a tres veces mayor que el de un ser humano del mismo peso vivo (Quintero et al., 2002).

La oxidación bioquímica de la materia orgánica es un proceso lento, y teóricamente tarda un tiempo infinito para completarse, sin embargo, después de un período aproximado de 20 días, la oxidación se ha completado entre 95 y 98%, y en 5 días la DBO se ha ejercido en un 60 – 70%.

La cinética de la DBO se formula de acuerdo con una reacción de primer orden y puede expresarse mediante la ecuación 1.1:

$$y = L(1 - e^{-k_e * t}) = L(1 - 10^{-k_{10} * t})$$

Ec. 1.1

Dónde:

y: DBO a cualquier día y temperatura (mg/l).

L: Demanda última carbonácea de oxígeno (mg/l).

ke: Constante de oxidación en base e (día^{-1}).

k10: Constante de oxidación en base 10 (día^{-1}).

t: Tiempo (días).

Demanda Química de Oxígeno (DQO, mg/l): Mide la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar tanto la materia degradable biológicamente como el resto de la materia orgánica que puede ser oxidada químicamente: la fibra, la lignina, etc. En aguas residuales de granjas porcinas la DQO se aproxima a las concentraciones de STT en las excretas frescas de cerdo (Taiganides et al., 1996).

Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK, mg N/l): Representa el contenido total de nitrógeno según el método de digestión Kjeldahl. La proteína cruda se calcula multiplicando el NTK por el factor 6.25 como se hace en las formulaciones alimenticias. Las concentraciones de NTK en las aguas residuales porcinas son altas por el alto contenido proteico del alimento. El Nitrógeno Kjeldahl es el total del nitrógeno orgánico y del amoniacal.

Nitrógeno Amoniacal Total (TAN, mg N/l): Representa la proporción de nitrógeno que está presente en forma de amoníaco (NH_3) o como ion amonio (NH_4^+), dependiendo del pH de la solución. En las excretas frescas o incluso en las almacenadas, la mayoría del nitrógeno está en forma de amoníaco, el cual le confiere un olor desagradable. La muerte y descomposición de las proteínas animales y vegetales por las bacterias produce amoníaco. La edad del agua residual viene indicada por la cantidad relativa de amoníaco presente (Taiganides et al., 1996).

Nitrógeno Orgánico (TON, mg N/l): Las principales formas de nitrógeno son el orgánico y el amoniacal. Esta parte del nitrógeno no está disponible directamente para las plantas, pero lo hace a través de la acción de las bacterias en condiciones aerobias del suelo. El nitrógeno orgánico se determina por el método Kjeldahl.

Nitrito (mg N/l): El nitrógeno del nitrito tiene relativamente poca importancia en los estudios sobre aguas residuales o contaminación de aguas, ya que es inestable y se oxida fácilmente a la forma de nitrato. Es un indicador de la contaminación

pesada en el proceso de estabilización y raramente excede de 1 mg/l. Se determina por colorimetría.

Nitrato (mg N/l): El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales. El predominio del nitrógeno del nitrato indica que el agua residual se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

Sin embargo, los nitratos pueden ser usados por las algas y otras plantas acuáticas para formar proteínas vegetales que, a su vez, pueden ser utilizadas por animales para formar proteínas animales. Los nitratos pueden variar en su concentración de 0 a 20 mg/l como N, en efluentes de aguas residuales con un intervalo típico de 15 a 20 mg/l como N. La concentración del nitrato es generalmente determinada por métodos colorimétricos.

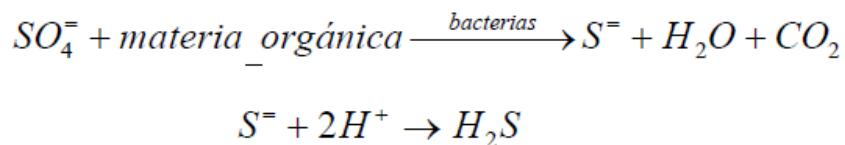
Fósforo Total (TPP, mg/l): El fósforo, así como el nitrógeno, es esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Las formas frecuentes en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato, y fosfato orgánico. Los ortofosfatos, por ejemplo, PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- y H_3PO_4 , se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin precisar posterior ruptura. Los polifosfatos incluyen las moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno, y, en algunos casos, átomos de hidrógeno combinados en una molécula compleja. Los polifosfatos sufren la hidrólisis en soluciones acuosas y vuelven a sus formas de ortofosfato; sin embargo, ésta hidrólisis es generalmente bastante lenta (Metcalf and Eddy, 1985).

Potasio Total (TKK, mg/l): Normalmente el contenido de potasio se mide con pruebas para potasa. El potasio es un componente crítico en los fertilizantes, pero no en el tratamiento de aguas residuales. Los fertilizantes se gradúan con base a su contenido de N, P y K.

Cloruros (mg/l): Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales a aguas superficiales. Las heces humanas, por ejemplo, suponen unos 6 g de cloruros por persona/día. En lugares donde la dureza del agua sea elevada, los compuestos que reducen la dureza del agua también son una importante fuente

de aportación de cloruros. Puesto que los métodos convencionales de tratamiento de las aguas no contemplan la eliminación de cloruros en cantidades significativas, concentraciones de cloruros superiores a las normales pueden constituir indicadores de que la masa de agua receptora está siendo utilizada para el vertido de aguas residuales (Metcalf and Eddy, 1985).

Sulfato (mg/l): El ion sulfato se presenta naturalmente en la mayoría de los suministros de agua y también en el agua residual. El azufre es requerido en la síntesis de proteínas y es liberado en su degradación. Los sulfatos son reducidos químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno (H_2S) por las bacterias en condiciones anaerobias, como se muestra en la ecuación 1.2:



Ec. 1.2

Alcalinidad (mg $CaCO_3/l$): La alcalinidad de un agua residual representa la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. De entre todos ellos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios del pH producido por la adición de ácidos.

pH: Es una medida estándar de la neutralidad de los líquidos. El estado básico o ácido cambia significativamente las reacciones químicas, por lo tanto, es un factor crítico en sistemas bioquímicos. El pH de los residuales porcinos se encuentra entre 6 y 8, pero para propósitos de diseño, el pH promedio es de 7,5.

Temperatura (T, °C): La temperatura del agua es crítica porque afecta la vida de los organismos. Las reacciones microbiológicas se duplican al incrementar en $10^\circ C$ la temperatura del agua. La tasa de disolución del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura. El oxígeno disuelto en el agua es más elevado en las aguas frías que en las calientes. Los peces y la vida acuática requieren elevadas cantidades de Oxígeno Disuelto (OD) para sobrevivir y por ello están directamente afectados por los cambios en la temperatura. La temperatura no es un parámetro crítico para las

excretas porcinas porque generalmente no alcanzan valores diferentes a la temperatura del agua circundante (Quintero et al., 2002).

4.4. Parámetros Biológicos

El tracto intestinal del ser humano contiene innumerables bacterias en forma de bastoncillo, conocidas como organismos coliformes. Cada persona evacua de 100.000 a 400.000 millones de organismos coliformes por día, además de otras clases de bacterias. Los organismos coliformes no son dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales.

Coliformes Totales (CFT, NMP/100 mL): Los organismos coliformes son los más numerosos y fáciles de detectar, y se emplean como indicador de la existencia de organismos productores de enfermedad. Son bacterias negativas que fermentan la lactosa con producción de gas en 48h a $35 \pm 0,5$ °C. Incluyen cuatro géneros: *Escherichia*, *Klebsiella*, *Citrobacter* y *Enterobacter*. El género *Escherichia* es el más representativo de contaminación fecal. Se pueden conseguir en aire, agua y hasta en los suelos, sin embargo no son patógenos. El hecho de que los *Aerobacter* y ciertos *Escherichia* pueden crecer en el suelo, no permite afirmar siempre que su presencia la cause la contaminación fecal. Las unidades de medida son el número más probable (NMP) de colonias por 100 mL de muestra y unidades formadoras de colonias (ufc) por 100 mL.

Coliformes Fecales (CFT, NMP/100 mL): Los coliformes fecales se originan en animales de sangre caliente como los cerdos, y representan contaminación fecal. Estos se reproducen en el tracto intestinal y son excretados con las heces. La presencia de *Escherichia Coli* puede ser indicador de que el agua ha sido contaminada por los cerdos u otros animales de sangre caliente (Quintero et al., 2002).

5. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales son conducidas a cuerpos receptores o a la tierra. La compleja pregunta acerca de qué contaminantes de las aguas residuales debe ser eliminada para proteger el entorno, y en qué cantidad, precisa de una contestación específica

en cada caso concreto. Ello requiere el análisis de las condiciones y necesidades locales, junto con la aplicación del conocimiento científico, de la experiencia previa de ingeniería y de las normas reguladoras de la calidad del agua existentes.

Existen muchos tipos de tratamiento de aguas residuales que generalmente se utilizan de manera combinada. Los tratamientos pueden ser físicos, como la filtración, la sedimentación y la evaporación; químicos, entre los que se encuentran la neutralización y la precipitación, y los biológicos que se dividen a su vez en aerobios (dependen de organismos que requieren oxígeno para su metabolismo) y anaerobios (los organismos que no requieren oxígeno); al primer grupo pertenecen las lagunas de aireadas y los lodos activados; y al segundo, los reactores UASB y los biodigestores.

Los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales de mayor empleo se presentan en la tabla 1.4. De estos sistemas, los más usados en zonas templadas son los químicos, los físicos y los aerobios. La mayoría de estos sistemas se caracterizan por su elevado costo en instalación y/o mantenimiento, requieren diferentes insumos químicos, consumen altas cantidades de energía y, al igual que los sistemas de producción especializados, disminuyen la contaminación de las aguas pero desaprovechan los subproductos generados en el proceso o deben incurrir en altos costos para disponerlos adecuadamente

Tabla 1.4. Clasificación de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Fuente: (Quintero et al., 2002).

| Tratamientos químicos | Tratamientos Físicos | Tratamientos Biológicos | |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Neutralización | Separación de sólidos y líquidos | Aerobios | Anaerobios |
| Precipitación | Tamizado | Lodos activados | Reactores de Flujo Ascendente |
| Intercambio de Iones | Sedimentación | Lagunas aerobias | Lagunas anaerobias |
| Oxidación/ Reducción | Flotación | Lagunas aireadas | Digestores convencionales |

| | | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------|-----------------|
| Solidificación/Fijación | Filtración | | |
| Cloración | Centrifugación | | |
| | Separación por membranas: | | |
| | diálisis, ósmosis, | Lecho | Lecho anaerobio |
| | evaporación , | biopercolador | |
| | extracción | | |
| | destilación y | | |
| | expulsión con vapor | | |

Los sistemas de tratamiento anaerobios generan gas metano que puede ser empleado como combustible; además no consumen energía necesaria para la aireación, recirculación y disposición de lodos. Aunque el sistema anaerobio requiere aún algunos ajustes, su promoción en los países tropicales es estratégica pues son de menor costo y permiten recuperar hasta un 90% de la energía de los desechos mediante el biogás. No obstante, debido a que el tratamiento anaerobio no es total, es necesario completarlo mediante otros medios, lo cual puede realizarse con una integración a otros sistemas naturales.

5.1. Biodigestores

Los biodigestores forman parte de los sistemas anaerobios. En ellos los residuos son sometidos a una fermentación anaerobia y producto de la misma se obtiene biogás que posee aproximadamente 66% de metano y puede ser empleado como combustible para cocción de alimentos, calefacción de instalaciones y funcionamiento de motores y calderas.

El tiempo de retención en los biodigestores varía de acuerdo a la temperatura, se tiene que para una zona caliente (más de 24°C) el tiempo de retención es de 22 a 25 días, en una zona intermedia (entre 14 y 24°C) de 25 a 30 días de retención y en una zona fría (entre 8 y 14°C) de 30 a 40 días de retención. Existen tres tipologías constructivas de biodigestores en uso en Cuba. Estos son de cúpula fija, de cúpula flotante y tubulares. Ver fig. 1.2, 1.3 y 1.4 en Anexos.

Previo a este trabajo se ha realizado una caracterización de instalaciones de biogás por (Sosa, C. 2015). Ver Tabla 3.1. en Anexos.

Por otro lado, el efluente resultante del proceso de digestión no pierde sus propiedades como fertilizante, pues los nutrientes no disminuyen su disponibilidad. Por esta razón, puede ser empleado como abono en cultivos o pasturas o si no existe el área para irrigar, se debe tratar mediante el cultivo de plantas acuáticas.

Los biodigestores incluidos en los sistemas de descontaminación productiva tipo CIPAV, tienen como principales ventajas su bajo costo, su facilidad de instalación, su fácil manejo y su mínimo mantenimiento.

El tamaño de los biodigestores puede ajustarse de acuerdo a la cantidad de aguas a tratar. En el paso a través de los biodigestores la contaminación se reduce hasta en un 80% (Pedraza and Chára, 1997).

De forma general, el biogás se ha definido como la mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo a los detalles de su producción. La composición del biogás procedente de la digestión anaerobia de los excrementos de animales es la siguiente: 50-70% CH₄, 30-50% CO₂, 1% H₂S y 2% H₂.

Entre sus propiedades físicas más notorias se encuentra su capacidad de quemarse casi sin olores, con llama azul y un calor de combustión equivalente a 21,5 MJ/m³ (573 BTU/ft³ o 5135 kcal/m³). Un metro cúbico de biogás totalmente combustionado es suficiente para generar 1,25 KWh de electricidad, generar 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 Watt, poner a funcionar un refrigerador de 1m³ de capacidad durante una hora, hacer funcionar una incubadora de 1m³ de capacidad 30 minutos o hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.

La presión a la que se encuentra el biogás almacenado define la distancia a la que se puede transportar a través de tuberías. Se ha calculado que a la presión de 0,8 KPa puede transportarse 1m³ de biogás por hora en una tubería de 1/2" a una

distancia de 20 m, así como en tuberías de 3/4" a 150 m de distancia. Para un diámetro de 1" podrá transportarse a 500 m (Hesse, 1983).

En la práctica la purificación del biogás consiste en la remoción del dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno o ambos. El dióxido de carbono es eliminado para aumentar el valor como combustible del biogás. El sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás.

Para las comunidades rurales es más práctico no ocuparse de la remoción del dióxido de carbono. En general los campesinos prefieren un gas menos eficiente que tener tiempo ocupado en el control del mismo, por lo que en las pequeñas granjas esta labor se considera innecesaria. Para grandes plantas de biogás y otras específicas donde los aspectos técnicos son menos onerosos, existen justificaciones económicas para la purificación.

El método químico más simple y eficiente de remoción del dióxido de carbono es su absorción en agua de cal. Este método necesita mucha atención por cuanto el agua de cal se agota y necesita cambiarse frecuentemente, lo que trae como consecuencia su preparación frecuente si no se obtiene comercialmente.

Otra alternativa, es utilizar otro residual fuertemente alcalino como medio de absorción de estos gases como son los efluentes de cultivos de micro algas. El líquido efluente del digester es vertido directamente en un tanque de gran tamaño para producir el alga spirulina.

El dióxido de carbono es bastante soluble incluso en agua neutral (878 ml/l a 20°C) bajo presión atmosférica, así que el lavado con agua ordinaria es quizás el método más sencillo de eliminación de impurezas.

El CO₂ es soluble en agua mientras que el metano no lo es. A alta presión, la solubilidad del CO₂ aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de metano en el biogás se incremente (Lau-Wong, 1986).

6. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales (*Lemna minor*)

Las plantas acuáticas tienen la finalidad de reemplazar la proteína en la dieta de los animales mono gástricos, y al mismo tiempo contribuir a la descontaminación de efluentes procedentes de explotaciones agropecuarias. En la Tabla 1.5, se muestran los componentes de las especies más utilizadas para este propósito, en este caso la *Lemna minor*.

Tabla 1.5. Composición de los nutrientes de la *Lemna minor* Fuente: (Becerra, 1990).

| Componente | <i>Lemna minor</i> (% MS) |
|----------------|---------------------------|
| Proteína cruda | 38,7 |
| Nitrógeno (N) | 5,9 |
| Fósforo (P) | 0,6 |

Lemna minor: Conocida como lentejas de agua, son plantas pequeñas de agua dulce con hojas que tienen 1 a 3 mm de ancho y raíces que tienen menos de 10 mm de largo. Las lentejas de agua pueden cubrir la superficie de la laguna en cuatro días.

Las plantas no transfieren oxígeno al agua. Éstas son muy sensibles a la deriva por el viento y, por consiguiente, necesitan tabiques o barreras para mantenerse en su lugar.

La remoción de la DBO y de los SST es por lo general bastante buena, con menor eficiencia demostrada para nutrientes, metales y organismos patógenos. La remoción de la DBO en los sistemas con lentejas de agua se da como resultado de la actividad biológica, la cual es similar a las reacciones que se llevan a cabo en las lagunas facultativas. Las lentejas de agua cubren la superficie de las lagunas y limitan el crecimiento de las algas, reduciendo de este modo el oxígeno del agua para la actividad bacteriana aerobia. Además, limitan la aereación con ayuda del viento proveniente de la atmósfera, dificultando así la posterior remoción de DBO. Como consecuencia, la carga de DBO debe limitarse a 27,5 kg/Ha.día ó menos (Jaramillo and Flores, 2012).

La superficie mullida que forman las lentejas de agua bloquea la luz solar, aumentando la sedimentación al crear condiciones de reposo. La tasa a la cual los sólidos suspendidos descienden, depende de la naturaleza de éstos.

El nitrógeno se remueve en los sistemas de tratamiento acuáticos por medio de la desnitrificación microbiana, y en menor grado, por la asimilación de las plantas y la cosecha. En los sistemas de lentejas de agua, la desnitrificación ocurre rápidamente; sin embargo, la nitrificación requiere de un suministro de oxígeno. Para remover el nitrógeno se debe lograr un crecimiento óptimo, para lo cual se debe cosechar con frecuencia. La densidad de las plantas en la superficie del agua depende de la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la frecuencia de la cosecha. La densidad característica en una laguna de aguas residuales puede variar de 1,2 a 3,6 kg/m², con una tasa óptima de crecimiento cerca de 0,49 kg/m².día (León and Chaves, 2010).

La toma por parte de las plantas y la cosecha es el mecanismo de remoción del fósforo de los sistemas con lentejas de agua, pero tiene poca efectividad igual que la remoción del nitrógeno, pues por lo general se puede eliminar menos de 1mg/l de fósforo mediante este mecanismo.

La remoción de las bacterias y los virus que entran en el sistema vegetal es similar a los mecanismos que se encuentran en funcionamiento en las lagunas: muerte natural, sedimentación, depredación, adsorción y exposición a la luz ultravioleta (Arroyave, 2004).

7. Filtros sanitarios

Un biofiltro es un reactor compuesto por un material-soporte que permite la filtración de las aguas residuales y el desarrollo de una biomasa adaptada a éstas. Generalmente, para los materiales-soporte de densidad superior a 1, el flujo de circulación de los efluentes en el interior del biofiltro es ascensional. La inyección del aire se realiza a contracorriente del flujo de circulación de las aguas residuales a fin de mantenerlas condiciones aeróbicas en el conjunto del reactor.

En el curso de la explotación, es necesario el lavado del soporte filtrante cada 1 a 3 días. En efecto, bajo el efecto conjugado de la proliferación bacteriana y de la retención de las materias extrañas sucias (MES), las pérdidas de carga aumentan y pueden crear pasos preferenciales en el biofiltro. Para recuperar las características hidráulicas iniciales, el lavado se realiza en 3 etapas. Tras un

levantamiento del lecho filtrante en el aire, el lavado se efectúa con una mezcla aire/agua seguida de una clarificación sólo con agua. Este proceso de limpieza dura de 20 a 50 minutos y las necesidades de agua representan de media del 3 al 5% de la cantidad de agua tratada. Tradicionalmente, el reactor comprende un fondo fijo con dobles conductos que permite la alimentación de aire y de efluente. En funcionamiento, bajo este fondo de conductos se crea un colchón de aire, de modo que el aire circula permanentemente en el interior del biofiltro.

Los rendimientos de la depuración obtenidos mediante la biofiltración son frecuentemente superiores al 90% en la DBO₅ y en las MES, así como del 80 al 90% en el amonio. La aireación, el lavado, la elección del soporte filtrante, la altura de relleno y las características del efluente que se han de tratar, constituyen unos factores esenciales de la concepción de una unidad de tratamiento con un rendimiento de depuración óptimo.

Los procedimientos tradicionales de biofiltración precisan de niveles de inversión incompatibles con su utilización en las estaciones depuradoras mientras que este procedimiento proporciona una satisfacción plena a los explotadores de gamas superiores. Esto ha animado recientemente al desarrollo de una nueva generación de biofiltros equipados de un sistema innovador de alimentación de efluentes y de aire, que permite optimizar las condiciones de lavado del soporte. Dicha biofiltración por "lavado segmentado" permite reducir los costes de inversión y de explotación (Sekoulov et al., 2009).

Capítulo II



Capítulo II

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó utilizando biodigestores de cúpula fija ubicados en el sector privado de la provincia Sancti Spíritus y Villa Clara, en el período comprendido entre los meses de Noviembre 2015 y Mayo del 2016.

Se realizó un diagnóstico cualitativo de los biodigestores analizados donde se tuvo en cuenta el tipo de tecnología, el sustrato de la digestión anaerobia así como otras características observadas. (Tabla 2.1). Esto se realizó mediante la observación directa en el lugar y la entrevista con el operador del biodigestor y los familiares.

Tabla 2.1. Biodigestores elegidos para el estudio.

| Operador de Biodigestor | Ubicación geográfica | Tipo de tecnología | Sustrato | Volumen del reactor |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|
| Jorge Toboso | Manacas | Cúpula Fija | Porcino | 12m ³ |
| CPA"13 de Marzo" | Cabaiguán | Cúpula Fija | Porcino | 12m ³ |
| Áriel Domínguez | Manacas | Cúpula Fija | Porcino | 12m ³ |

2.1 Descripción de los filtros secundarios y las piscinas experimentales (biofiltro) a pequeña escala para la valoración de los efluentes

Para la construcción de los filtros secundarios se utilizaron botellas plásticas de 1500 mL de capacidad. Las mismas fueron cortadas por su parte inferior y rellenas con un volumen de 500 cm³ de zeolita, 500 cm³ de arena lavada de construcción y 500 cm³ de gravilla de construcción. Las tapas de las botellas fueron barrenadas para permitir el drenaje de los efluentes vertidos en las diferentes variantes experimentales a evaluar. Las piscinas del biofiltro fueron construidas recortando envases plásticos de 5 galones de capacidad, dejando un volumen activo de 850 mL. Se realizaron tres filtros secundarios y cuatro piscinas (biofiltros). Las figuras 2.1 y 2.2, muestran detalles de los mismos.



Fig. 2.1 Detalles de los filtros secundarios a pequeña escala. Fuente: archivo del autor.



Fig. 2.2 Detalles de los filtros terciarios (biofiltros) a pequeña escala. Fuente: archivo del autor.

2.2 Diagnóstico del estado actual de biodigestores anaerobios de diferentes tecnologías instalados a pequeña escala

De cada biodigestor se tomaran muestras de los afluentes y los efluentes en frascos previamente lavados con hipoclorito de sodio al 3%. Por cada biodigestor se tomaron tres muestras biológicas. Posteriormente las muestras fueron homogenizadas por agitación y almacenadas a 4°C.

Estas muestras fueron caracterizadas según los parámetros: Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, pH, Demanda química de oxígeno (DQO) y Demanda biológica de oxígeno (DBO) según los Métodos Estándar 1995. En el caso del análisis de los efluentes estos serán analizados en el filtro primario (a la salida del biodigestor) y posterior a su paso por los filtros secundario (filtro de grava, arena y zeolita) y terciario (biofiltro que utiliza la planta, *lemna minor*).

2.3 Características físico-químicas y microbiológicas de los afluentes y efluentes de los biodigestores objeto de estudio

2.3.1 Determinación del pH en los afluentes y los efluentes

Se tomaron muestras de pH a la salida de cada biodigestor y después de pasar por los filtros secundarios y terciarios, respectivamente, utilizando tomas muestras para estos efectos; así como un pH metro, modelo 780 Metrohm, Swiss mode. Las muestras se transportaron al laboratorio para la determinación del parámetro mencionado. Se tomaron tres repeticiones del pH por biodigestor analizado en cada uno de los niveles analizados.

2.3.2 Determinación de la carga microbiana patógena en los afluentes y los efluentes

Se colectaron los afluentes y efluentes en pomos plásticos de 1500 mL, y se llevaron rápidamente al laboratorio de microbiología del Centro Provincial de Higiene y Epidemiología de Santa Clara, Villa Clara, donde se determinarían coliformes totales, coliformes termo tolerantes y pseudomonas aeruginosas. En este caso se repiten los análisis posteriores a su paso por los filtros primarios, secundarios y terciarios (biofiltro), una vez estabilizada la carga y con un tiempo de residencia

hidráulica igual a 21 días. Serán objeto de evaluación tres flujos o cargas diferentes de efluentes (100, 200 y 300 mL). Con los valores obtenidos se analiza si los efluentes cumplen con las normas establecidas (Norma NC-27,1999 y la NC-1095, 2015).

2.3.3. Cálculo del crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada lenteja de agua (*Lemna minor*) en el biofiltro.

Para el cálculo del crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada se utilizaron tres lagunas plásticas humectadas con 50 mL de agua destilada, en las cuales se procederá a realizar tres variantes experimentales diferentes, las cuales se describen a continuación:

- 1^{ra} variante: agregar colonias de *lemna minor* (9,37 g) y 100 mL de efluente porcino colectado a la salida del biodigestor, posterior a su paso por el filtro secundario;
- 2^{da} variante: agregar colonias de *lemna minor* (9,37 g) y 200 mL de efluente porcino colectado a la salida del biodigestor, posterior a su paso por el filtro secundario;
- 3^{ra} variante: agregar colonias de *lemna minor* (9,37 g) y 300 mL de efluente porcino colectado a la salida del biodigestor, posterior a su paso por el filtro secundario.
- Control: agregar colonias de *lemna minor* (9,37 g) y 300 mL de agua común (captada de un pozo artesano).

En todas las variantes objeto de investigación, la carga contaminante inicial será diluida en la misma proporción (1:1) con agua común. Posteriormente para contrarrestar la evo transpiración natural de agua que se producirán en las piscinas plásticas, producto de la actividad fotosintética de las plantas de *lemna minor* se agregará cada semana 320 mL de agua de pozo en cada una de ellas; transcurridos un tiempo de residencia hidráulica de 21 días en los biofiltros, se colectaran las micro algas (*lemna minor*) y se pesaran en una balanza analítica Denver Instrument, modelo SI-234. Además se observará el área de proliferación de estas en las respectivas lagunas plásticas. Estas pruebas se realizaran en condiciones semi-

controladas a nivel de laboratorio (local de laboratorio), donde se tiene previsto monitorear temperatura y presión ambiental diariamente. En cada una de las variantes experimentales a evaluar se realizarán las pruebas por triplicado.

2.3.4 Cálculo del flujo o caudal de afluentes y efluentes:

El cálculo del caudal de entrada de efluentes para cada instalación de biogás varía en dependencia del tipo de excretas de animal utilizadas como materia prima para el trabajo del biodigestor; del número de animales disponibles; así como de las necesidades de biogás a obtener en la instalación. Una de las metodologías para su determinación se basa en el cálculo del flujo a caudal volumétrico. Para lo cual es necesario conocer el volumen de los efluentes que se entrega en la unidad de tiempo (m^3/s).



Fig. 2.1. Limpieza por golpe de agua en boxes de una nave de un centro multiplicador para 400 cerdas reproductoras. Fuente: (Martínez, 2011).

2.3.5. Producción cuantitativa del flujo de efluentes (digestato) en el plantel porcino de la UCLV.

La determinación práctica del flujo de los efluentes en este estudio, se realizará en el plantel porcino de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Se calculará los posibles efluentes en dependencia del flujo volumétrico a medir a la salida de

las canaletas de las dos naves en explotación, las cuales tributan estos hacia una laguna de oxidación que posee el plantel porcino. Para lo anterior, apoyados con una probeta plástica y un cronómetro, se determinará el flujo volumétrico de los efluentes del plantel porcino. Mediante la expresión 2.1.

$$Q = v/t, \text{ l/s. ec.2.1.}$$

Dónde:

Q- gasto de efluentes, L/s;

v- volumen de efluentes medidos en la probeta, l;

t- tiempo de llenado de la probeta, s.

2.3.6. Determinación de las características de los efluentes obtenidos en cada biodigestor. Propiedades como bioestimulantes

Se toman los efluentes pacificados durante tres meses. Estos serán evaluados con diferentes grados de dilución (50%, 75% y 90%). A continuación se vierten 50 mL del efluente con el grado de dilución objeto de investigación en tres beaker de 100 mL de capacidad y en cada uno de estos beaker se añaden 15 semillas de frijol negro (*Phaseola vulgaris* L, variedad BAT-304) semilla registrada con un porcentaje de germinación conocido (80% de germinación), dejándose reposar durante cuatro horas en estas condiciones. Posteriormente serán sembradas estas semillas imbuidas en los efluentes en las respectivas magentas a razón de 5 semillas por magenta, serán utilizadas un total de 3 magentas por dilución (tratamiento). Paralelo a ello, se ejecuta la misma metodología pero utilizando agua común para el control absoluto, también se probará con un control estándar (constituido por 3 magentas fertilizadas) con nitrógeno, fósforo y potasio (N, P, K), en dosis equivalentes a las utilizadas a nivel de producción (600 kg/ha). Se utilizará una fórmula completa de N-P-K (8-24-16). Las magentas utilizadas para la siembra tienen 400 g de capacidad de suelo enraizado, previamente humedecido con una capacidad de campo de 80% de humedad. Finalmente se colocarán las magentas en condiciones semi-controladas donde recibirán iluminación natural, serán monitoreadas las variables de presión y temperatura ambiente. Al cabo de dos semanas se determinará el

porcentaje de germinación en los tratamientos evaluados y en los controles de acuerdo al grado de dilución investigado.

2.3.7. Análisis microbiológico del suelo

Se determinó el efecto que provoca sobre la microbiología del suelo, de los efluentes objeto de investigación. Para ello, se tomaron muestras de suelo (pardos con carbonato) en cada una de las magentas evaluadas (1g) en sus diferentes tratamientos, posteriormente se realizaron pruebas microbiológicas de suelo (hongos, bacterias y actinomicetos), fueron investigados tres réplicas por tratamiento. Para lo anterior, se siguieron los protocolos y procedimientos establecidos en laboratorio especializado para tales efectos de acuerdo con (Mayea et al. 2004).

2.3.8. Propuesta de filtros sanitarios secundarios y terciarios a escala real

Tomando como base un biodigestor de cúpula fija de volumen igual a 12 m³, se proyectarán los filtros secundarios y terciarios a partir de los flujos de efluentes (digestatos) que salen del mismo. Se hará el diseño tomando como parámetro tentativo una cantidad de animales (cerdos) igual a 100 cabezas. Se utilizará el software profesional de diseño SolidWorks, 2014.

2.4 Análisis estadístico

Para los análisis estadísticos de los resultados de las investigaciones se procederá a utilizar el paquete estadístico profesional STARGRAPHICS, 8.0.

Capítulo III

Capítulo III

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.2 Resultados del diagnóstico del estado actual de biodigestores anaerobios de diferentes tecnologías instalados a pequeña escala

Los resultados del diagnóstico de las instalaciones evaluadas muestra que estas solo se utilizan para la cocción, de ellas 2 presentan un estado constructivo regular y solo en una de ellas se realiza un filtrado secundario, sin embargo en ninguna de estas existe un filtrado terciario de los efluentes (digestatos). Estos resultados coinciden con lo reportado por (Sosa, C. 2015). Ver tabla 3.1 en Anexos y Tabla, 3.2 a continuación.

Tabla 3.2. Análisis cualitativo de cada biodigestor.

| Operador de Biodigestor | Tipo de tecnología | Sustrato | Condiciones constructivas de la planta | Uso final de biogás | Otras observaciones |
|-------------------------|--------------------|----------|--|---------------------------|---|
| CPA "13 de Marzo" | Cúpula Fija | Porcino | Buena | Solo cocción de alimentos | Los efluentes (digestato) son filtrados (secundario) y se vierten a una laguna de oxidación |
| Jorge Toboso | Cúpula Fija | Porcino | Regular | Solo cocción de alimentos | Los efluentes (digestato) se vierten a una laguna de oxidación |
| Ángel Domínguez | Cúpula Fija | Porcino | Regular | Solo cocción de alimentos | Los efluentes (digestato) se vierten a una laguna de oxidación |

3.3 Resultados de la caracterización química y microbiológica de los afluentes y efluentes de los biodigestores objeto de estudio

3.3.1. Resultados de la determinación del pH en los afluentes y los efluentes

Los resultados del pH en los afluentes (7,52-8,34) y los efluentes (8,07-8,56), coinciden con los resultados obtenidos por otros investigadores (Negrín y Jiménez .2015) y están en el rango establecido para este tipo de sustrato (excreta porcina). Ver tabla 3.3.

Tabla. 3.3. Análisis pH afluente y efluentes.

| Biodigestor | pH obtenido | | Biomasa |
|------------------|-------------|-----------|---------|
| | Afluentes | Efluentes | |
| Jorge Toboso | 8,34 | 8,39 | Porcino |
| CPA"13 de Marzo" | 7,52 | 8,07 | Porcino |
| Ariel Domínguez | 7,77 | 8,56 | Porcino |

3.3.2. Resultados de la determinación de la carga microbiana patógena en los afluentes y los efluentes

Los resultados de la carga microbiana (coliformes totales, coliformes termo tolerantes y pseudomonas aeruginosas) a la entrada y salida de los biodigestores analizados (filtrado primario), muestra una baja contaminación, por debajo de lo estipulado en la norma cubana, lo cual está en contradicción con trabajos anteriores efectuados por (Sosa, C. 2015) y (Martínez et al 2014). Ver tabla 3.4.

Tabla. 3.4. Análisis microbiológico de los afluentes y efluentes a la salida del biodigestor analizado.

| Biodigestor analizado | Biomasa | Coliformes totales (NMP/100 mL) | | Coliformes termo tolerantes (NMP/100 mL) | | Pseudomonas areuginosas (NMP/100 mL) | | NC-27.1999 | | |
|-----------------------|---------|---------------------------------|-----------|--|-----------|--------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Efluentes | Efluentes | Efluentes |
| Jorge Toboso | Porcino | 79 | 17 | 4.5 | <1.8 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino | 11 | 7.8 | <1.8 | <1.8 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Ariel Domínguez | Porcino | 49 | 7.8 | 2.0 | <1.8 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |

En el caso de los resultados obtenidos a la salida de los filtros secundarios y terciarios mostró que este sistema es capaz de bajar en mayor medida la carga contaminante hasta valores muy por debajo de los límites permisibles que fija la norma cubana, sin embargo en el biodigestor ubicado en la finca de "Ariel

Domínguez”, se presenta una contradicción cuando los efluentes (digestato) tanto en los coliformes totales como en los coliformes termo tolerantes salen más contaminados que cuando entran, lo cual no es común en este tipo de instalación. Sin embargo, en los otros dos biodigestores (“Jorge Toboso” y “13 de Marzo”), este fenómeno no se presenta y se puede afirmar que el biofiltro, muestra la efectividad del sistema y permite predecir su efecto positivo, de ser utilizado en nuestras instalaciones de biogás. Ver Tabla 3.5.

Tabla. 3.5. Análisis microbiológico de los efluentes con diferentes cargas contaminantes y posterior a su paso por el biofiltro.

| Biodigestor analizado | Biomasa | Coliformes totales (NMP/100 mL) | | Coliformes termo tolerantes (NMP/100 mL) | | Pseudomonas areuginosas (NMP/100 mL) | | NC-27.1999 | | |
|-----------------------|------------------|---------------------------------|------------|--|------------|--------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Efluentes | Efluentes | Efluentes |
| Jorge Toboso | Porcino (300 mL) | 79 | 6,8 | 4.5 | <1.8 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (300 mL) | 11 | 38 | <1.8 | 2 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Ariel Domínguez | Porcino (300 mL) | 49 | 280 | 2.0 | 23 | <1.8 | <1.8 | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Jorge Toboso | Porcino (200 mL) | 79 | 15 | 4.5 | 15 | <1.8 | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (200 mL) | 11 | 26 | <1.8 | 26 | <1.8 | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Ariel Domínguez | Porcino (200 mL) | 49 | 350 | 2.0 | 350 | <1.8 | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Jorge Toboso | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |
| Ariel Domínguez | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | < 1000 | < 200 | < 1 600 |

Leyenda:

ne: no evaluado

3.3.3. Resultados del crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada lenteja de agua (*Lemna minor*) en el biofiltro.

Los resultados referidos al crecimiento y productividad de la biomasa seleccionada como biofiltro sanitario (*Lemna minor*), mostraron que las mismas son incapaces de crecer y reproducirse bajo estas condiciones severas de contaminación (cargas de 100, 200 y 300 mL) de efluentes diluidos en proporción 1:1 con agua, en las piscinas experimentales en las cuales se manejaron como volumen activo un máximo de 600 mL (efluente + agua). Este resultado puede estar motivado por los siguientes factores: el agua en las piscinas no circula; las cargas contaminantes investigadas son muy severas con relación a la cantidad de *Lemna minor* (9,37 g) evaluada; la actividad fotosintética de la *Lemna minor* es muy elevada, lo cual hace que en ocasiones las piscinas se queden con muy poca agua, propiciando que las células y tejidos de la planta necrosen y se produzca la senescencia de las mismas; quizás estas plantas necesiten que la carga contaminante tenga un mayor grado de dilución en agua; carencia de un sistema electro-mecánico de alimentación de aire (oxigenación). Todas estas interrogantes tendrán que ser evaluadas en próximos trabajos.

3.3.4. Resultados de la producción cuantitativa del flujo de efluentes (digestato) en el plantel porcino de la UCLV

Una vez determinados los cálculos por la expresión 2.1. Los resultados obtenidos fueron 0,018 l/s de efluentes para una cantidad de cerdos de 24 (tres reproductoras y 21 ceba). Se debe destacar que esta medición se realizó fuera del horario de limpieza de la instalación. Por tal motivo es un indicador que no muestra la cantidad efectiva de efluentes que se dirigen a la laguna de oxidación. Se debe tener en cuenta, además la cantidad y duración de las limpiezas efectuadas diariamente. Estos resultados están ligeramente en contradicción con los planteados por (Martínez, C. 2015), donde se plantea que el flujo de agua utilizado en la limpieza de instalaciones porcinas está en el orden de los 0,0019 l/s como promedio.

3.3.5. Resultados de las propiedades de los efluentes como bioestimulantes

Los resultados referidos a la utilización de los efluentes (digestatos) como bioestimulantes (biofertilizantes) muestran que los efluentes porcinos pacificados durante tres meses y diluidos en 90% con agua, alcanzan los mayores porcentos de germinación (80%), estando por encima de los resultados alcanzados con las diluciones de 50% y 75% en todos los tratamientos evaluados; así como con respecto a los controles absoluto y estándar respectivamente. Resultados semejantes utilizando biosólidos pecuarios (efluentes vacunos) procedentes de biodigestores han sido alcanzados por (Negrín y Jiménez. 2015). Ver tabla 3.6.

Tabla. 3.6. Análisis del porcentaje de germinación con diferentes grados de dilución del efluente.

| Tratamientos (biodigestores analizados) | Biomasa | Efluentes diluidos al 50%. Porcentaje de Germinación (%) | Control absoluto (%) | Control estándar (%) | Efluentes diluidos al 75%. Porcentaje de Germinación (%) | Control absoluto (%) | Control estándar (%) | Efluentes diluidos al 90%. Porcentaje de Germinación (%) | Control absoluto (%) | Control estándar (%) |
|---|---------|---|----------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
| Jorge Toboso | Porcino | 40 | 66,66 | 53,33 | 53,33 | 100 | 53,33 | 53,33 | 80 | 73,33 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino | 33,33 | 66,66 | 53,33 | 66,66 | 100 | 53,33 | 100 | 80 | 73,33 |
| Ariel Domínguez | Porcino | 33,33 | 66,66 | 53,33 | 40 | 100 | 53,33 | 100 | 80 | 73,33 |

3.3.6. Resultados con respecto a la carga contaminante (DQO) de los sustratos evaluados

Los resultados relacionados con la carga contaminante a la salida del biodigestor (filtrado primario), muestran que la carga contaminante (DQO), solo se comporta por debajo de la norma en el caso del biodigestor instalado en la finca de "Jorge Toboso" (607,72mgO₂/L), estando en los otros dos casos por encima de la norma cubana (NC-27. 1999). Ver tabla 3.7. Los resultados referidos a la alta carga contaminante de los efluentes (digestato) a la salida de los biodigestores coinciden con otros resultados obtenidos por otros autores como (Espinosa, N. 2015) y (Sosa, C. 2015).

Tabla 3.7. Carga contaminantes (DQO) de los sustratos evaluados a la entrada y salida el biodigestor.

| Biodigestor analizado | DQO (mgO ₂ /L) | | DQO (mgO ₂ /L). N.C.27:1999 |
|--------------------------|---------------------------|-----------|--|
| | Afluentes | Efluentes | Efluentes |
| Jorge Toboso | 5432,72 | 607,72 | <700 |
| CPA"13 de Marzo" | 3038,64 | 15653,60 | <700 |
| Ariel Domínguez | 6537,68 | 1639,02 | <700 |

Los resultados relacionados con la carga contaminante (DQO) de los sustratos evaluados ante diferentes cargas y posterior al filtrado terciario (biofiltro). Se presentan en la tabla 3.8 (Ver anexos), de la misma se puede apreciar que en los casos de flujos de carga del orden de los 300 mL y 200 mL, solo en el caso del biodigestor ubicado en la CPA" 13 de Marzo", este indicador está por encima de lo estipulado por la norma cubana (NC-27, 1999). Lo cual muestra que el biofiltro utilizando plantas acuáticas, tales como es el caso de la (*Lemna minor*) es una buena solución para la descontaminación de los efluentes (digestatos) procedentes de biodigestores anaerobios, ya que este sistema es capaz de lograr porcentos de remoción de la carga contaminante (DQO) en un rango desde 8% hasta 69%.

3.3.7. Resultados del análisis microbiológico del suelo

En la tabla 3.9 se aprecian los resultados obtenidos en el análisis microbiológico del suelo, fueron objeto de investigación, hongos, bacterias y actinomicetos. Del análisis de la tabla 3.9 se puede apreciar que en el tratamiento 2 ("Jorge Toboso"), se presentan los máximos valores de hongos presentes, a las 48 horas (21×10^5), sin embargo a las 72 horas, los mayores valores ($22,33 \times 10^5$), se presentan en el tratamiento 4 ("13 de Marzo"). En el caso de las bacterias, los resultados muestran que en el control estándar se observan los mayores valores ($1,33 \times 10^9$) a las 48 horas, reduciéndose ese comportamiento a las 72 horas.

Con respecto a los actinomicetos, los mayores valores (41×10^5) se presentan en el tratamiento 6 (“Ariel Domínguez”), a los 10 días de realizado. Lo cual muestra una gran variabilidad en el comportamiento de los diferentes tratamientos (2,4 y 6) referidos al impacto que provocan los efluentes en el suelo, relativo a la población de hongos, bacterias y actinomicetos. Estos resultados son preliminares y pueden servir para investigaciones futuras, donde se demuestre si estos factores pueden provocar un incremento o decremento de la fertilidad del suelo. Por otra parte, es conocido que 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 con la base alimentaria de estas especies (Negrín y Jiménez. 2015).

Tabla 3.9. Análisis microbiológico de suelo.

| Biodigestores | Hongos (48 h) $\times 10^5$ (valor medio) | Hongos (72 h) $\times 10^5$ (valor medio) | Bacterias (48 h) $\times 10^9$ (valor medio) | Bacterias (72 h) $\times 10^9$ (valor medio) | Actinomicetos (10 días) $\times 10^5$ (valor medio) |
|------------------|--|---|--|--|---|
| Jorge Toboso | 21 | 7,33 | 1 | 0,66 | 29,66 |
| CPA"13 de Marzo" | 7,33 | 22,33 | 1 | 0,66 | 40,33 |
| Ariel Domínguez | 9,33 | 6,33 | 1 | 0,66 | 41 |
| Control absoluto | 12,33 | 1,37 | 0,33 | 0,66 | 37,66 |
| Control estándar | 17 | 12,33 | 1,33 | 0,33 | 31,33 |

3.3.8. Resultado de la propuesta de filtros sanitarios secundarios y terciarios a escala real.

La propuesta de filtro secundarios y terciarios para su evaluación a escala real, se realizó partiendo de los datos del flujo de salida del plantel porcino de la UCLV,

además de contar con el diseño estándar del biodigestor de 12 m³; así como de una propuesta anterior realizado por (Díaz, B. 2014). Todo esto fue diseñado utilizando el software SolidWorks, 2014. Los croquis o esquemas de esta propuesta se aprecian en las figuras, 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

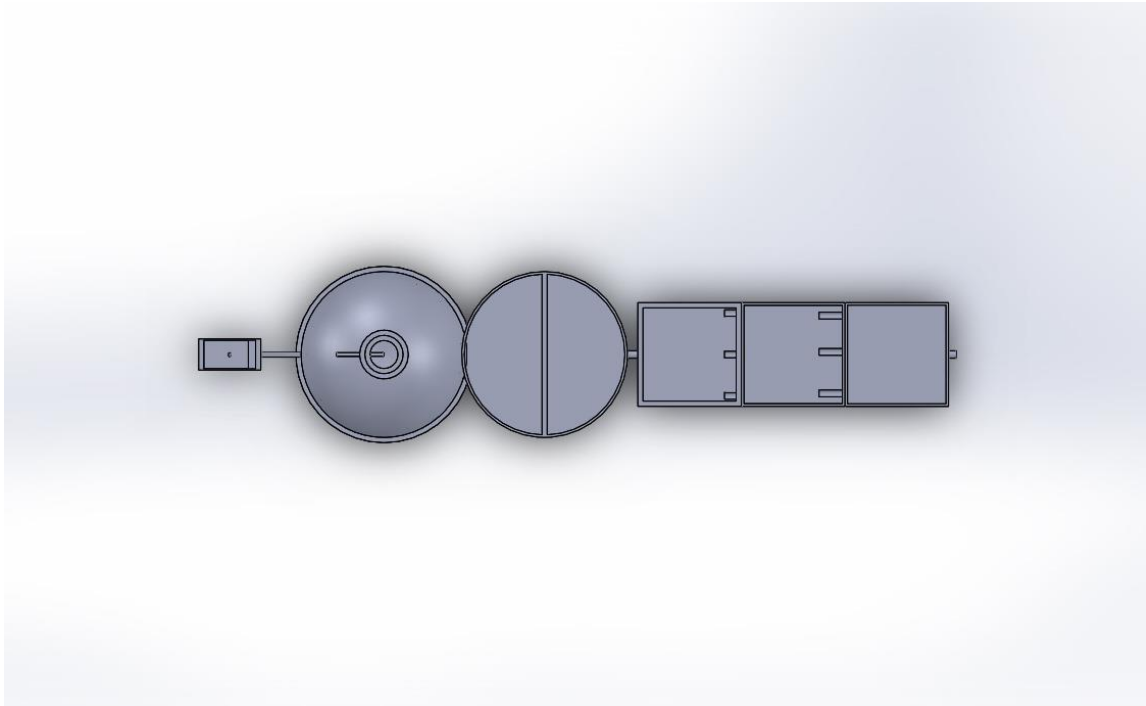


Fig. 3.1. Vista superior del biodigestor con los filtros secundarios y terciario.

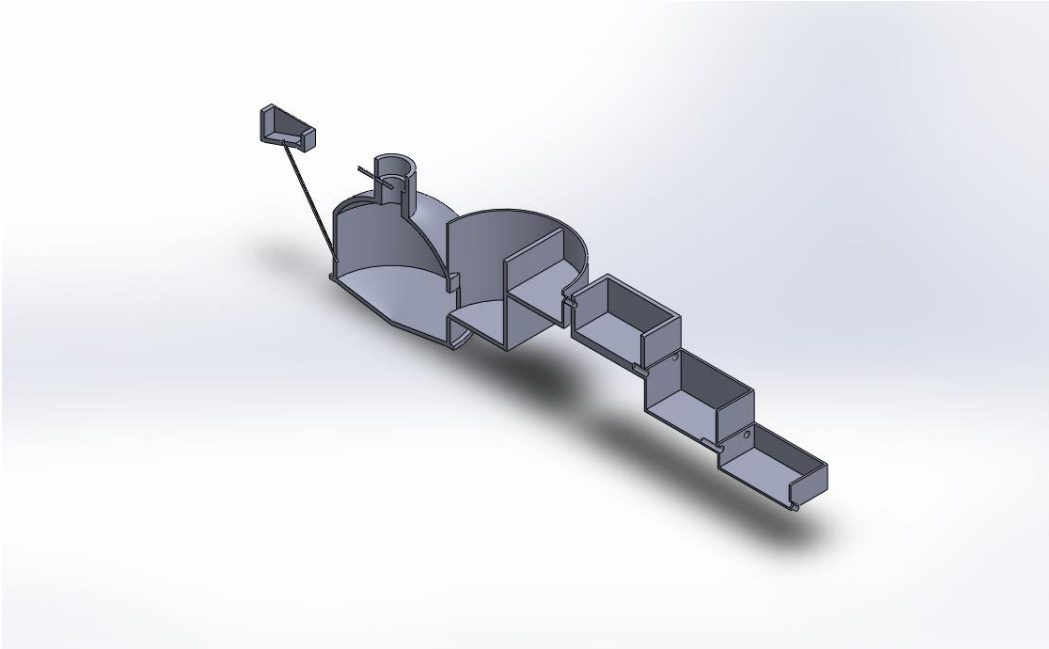


Fig. 3.2 Vista en corte del biodigestor con los filtros secundarios y terciario.

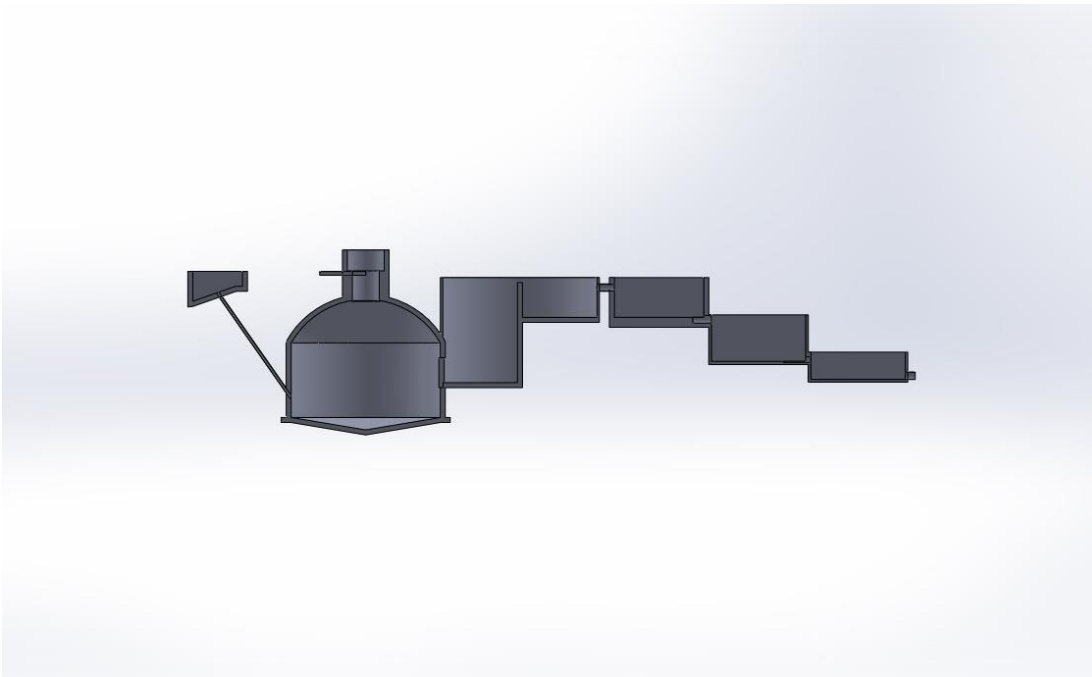


Fig. 3.3 Vista lateral en corte del biodigestor con los filtros secundarios y terciario.

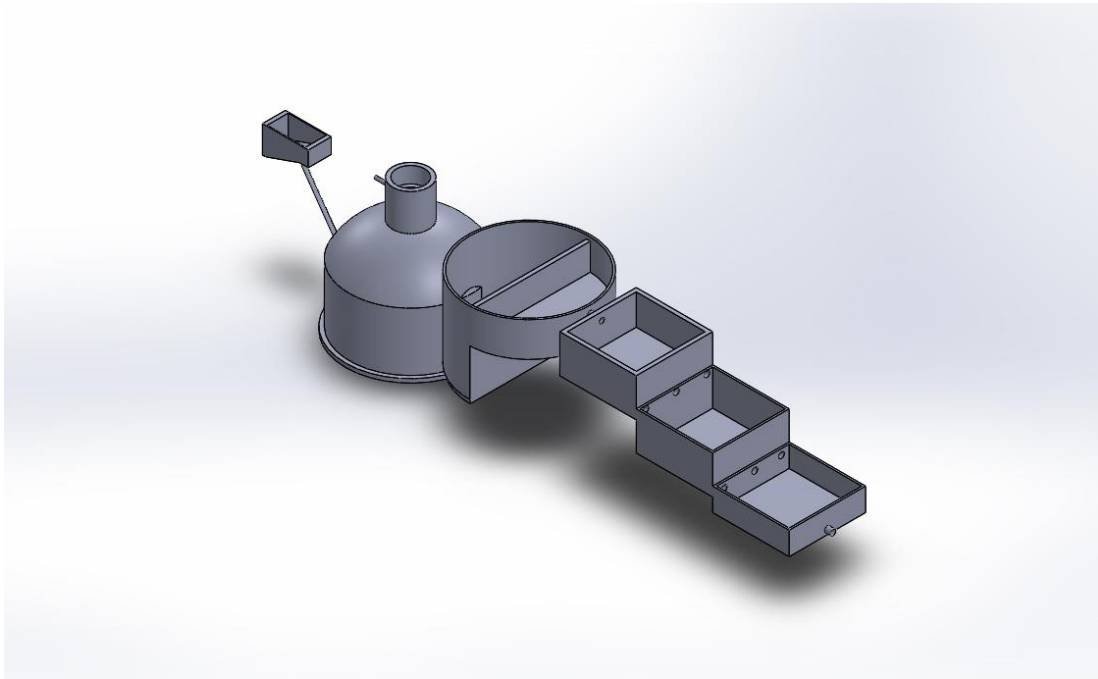


Fig. 3.4 Detalle del enlace o acoplamiento en el tanque de compensación y el filtro secundario y terciario.

4. Resultados del análisis estadístico

Los datos del porcentaje de germinación obtenidos para diferentes grados de dilución de los efluentes (digestatos) por biodigestor analizado, una vez transformados a sen^{-1} de la raíz cuadrada de la proporción muestran que el efecto que más incide en la misma, es el grado de dilución. También se debe destacar que de los tratamientos evaluados, los mejores resultados se obtienen en el caso de los tratamientos 4 (13 de Marzo) y 6 (Ariel Domínguez) para diluciones del 90%, encontrándose diferencias significativas con los demás tratamientos excepto con respecto al control absoluto (CABS) diluido al 50%. Esto se puede apreciar en las figuras 4 y 4.1.

STATISTICA - [Workbook1* - Duncan test; variable Arcsen.SQRT (proporción) (ARCOSENO SQRT. DATOS.)]

File Edit View Insert Format Statistics Data Mining Graphs Tools Data Workbook Window Help

Workbook1
ANOVA (ARC...)
ANOVA R...
Tests c...
Levens...
Univar...
LSD te...
Tukey...
Dunca...
Dilusió...

Duncan test; variable Arcsen.SQRT (proporción) (ARCOSENO SQRT. DATOS.)
Homogenous Groups, alpha = .05000 (Non-Exhaustive Search)
Error: Between MS = 121.26, df = 30.000

| Cell No. | Dilusión (%) | Tratamientos | Arcsen.SQRT (proporción) Mean | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|--------------|--------------|-------------------------------|------|------|------|---|
| 7 | 75 | T4 | 35.00936 | **** | | | |
| 8 | 75 | T6 | 35.00936 | **** | | | |
| 3 | 50 | T6 | 39.23152 | **** | **** | | |
| 6 | 75 | T2 | 39.23152 | **** | **** | | |
| 1 | 50 | T2 | 46.92283 | **** | **** | **** | |
| 5 | 50 | CSTD | 47.29933 | **** | **** | **** | |
| 11 | 90 | T2 | 47.29933 | **** | **** | **** | |
| 10 | 75 | CSTD | 47.29933 | **** | **** | **** | |
| 9 | 75 | CABS | 55.36714 | **** | **** | **** | |
| 2 | 50 | T4 | 58.08694 | **** | **** | | |
| 15 | 90 | CSTD | 59.21279 | **** | **** | | |
| 14 | 90 | CABS | 66.15475 | | **** | **** | |
| 13 | 90 | T6 | 84.26083 | | | **** | |
| 12 | 90 | T4 | 84.26083 | | | **** | |
| 4 | 50 | CABS | 84.26083 | | | **** | |

Fig. 4 Duncan Test.

STATISTICA - [Workbook1* - Dilusión (%)*Tratamientos; Unweighted Means (ARCOSENO SQRT. DATOS.)]

File Edit View Insert Format Statistics Data Mining Graphs Tools Data Workbook Window Help

Workbook1*
ANOVA (ARC...)
ANOVA R...
Tests c...
Levens...
Univar...
LSD te...
Tukey...
Dunca...
Dilusió...

Dilusión (%)*Tratamientos; Unweighted Means (ARCOSENO SQRT. DATOS.)
Current effect: F(8, 30)=4.9358, p=.00058
Effective hypothesis decomposition

| Cell No. | Dilusión (%) | Tratamientos | Arcsen SQRT (proporción) Mean | Arcsen SQRT (proporción) Std. Err. | Arcsen SQRT (proporción) -95.00% | Arcsen SQRT (proporción) +95.00% | N |
|----------|--------------|--------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | 50 | T2 | 46.92283 | 6.357748 | 33.93857 | 59.90708 | 3 |
| 2 | 50 | T4 | 58.08694 | 6.357748 | 45.10269 | 71.07120 | 3 |
| 3 | 50 | T6 | 39.23152 | 6.357748 | 26.24727 | 52.21577 | 3 |
| 4 | 50 | CABS | 84.26083 | 6.357748 | 71.27658 | 97.24508 | 3 |
| 5 | 50 | CSTD | 47.29933 | 6.357748 | 34.31508 | 60.28358 | 3 |
| 6 | 75 | T2 | 39.23152 | 6.357748 | 26.24727 | 52.21577 | 3 |
| 7 | 75 | T4 | 35.00936 | 6.357748 | 22.02511 | 47.99362 | 3 |
| 8 | 75 | T6 | 35.00936 | 6.357748 | 22.02511 | 47.99362 | 3 |
| 9 | 75 | CABS | 55.36714 | 6.357748 | 42.38289 | 68.35139 | 3 |
| 10 | 75 | CSTD | 47.29933 | 6.357748 | 34.31508 | 60.28358 | 3 |
| 11 | 90 | T2 | 47.29933 | 6.357748 | 34.31508 | 60.28358 | 3 |
| 12 | 90 | T4 | 84.26083 | 6.357748 | 71.27658 | 97.24508 | 3 |
| 13 | 90 | T6 | 84.26083 | 6.357748 | 71.27658 | 97.24508 | 3 |
| 14 | 90 | CABS | 66.15475 | 6.357748 | 53.17050 | 79.13901 | 3 |
| 15 | 90 | CSTD | 59.21279 | 6.357748 | 46.22854 | 72.19705 | 3 |

Fig. 4.1 Medias del ARCOSENO SQRT (proporción).Std.Error= 6,35

Conclusiones



Conclusiones

CONCLUSIONES

1. En los biodigestores analizados la carga microbiana (coliformes totales, coliformes termo tolerantes y pseudomonas aeruginosas) a la entrada y salida de los biodigestores analizados (filtrado primario), muestra una baja contaminación, por debajo de lo estipulado en la norma cubana, lo cual está en contradicción con trabajos anteriores efectuados por (Sosa, C. 2015) y (Martínez et al 2014).
2. Los resultados obtenidos a la salida de los filtros secundarios y terciarios muestran que este sistema es capaz de bajar en mayor medida la carga contaminante hasta valores muy por debajo de los límites permisibles que fija la norma cubana (NC-27. 1999).
3. Los resultados referidos al crecimiento y productividad de la biomasa seleccionado como biofiltro sanitario (*Lemna minor*), mostraron que las mismas son incapaces de crecer y reproducirse bajo estas condiciones severas de contaminación (cargas de 100, 200 y 300 mL) de efluentes diluidos en proporción 1:1 con agua.
4. Los resultados referidos a la utilización de los efluentes (digestatos) como bioestimulantes (biofertilizantes) muestran que los efluentes porcinos pacificados durante tres meses y diluidos en 90% con agua, alcanzan los mayores porcentos de germinación (80%), estando por encima de los resultados alcanzados con las diluciones de 50% y 75% en todos los tratamientos evaluados; así como con respecto a los controles absoluto y estándar respectivamente.
5. El biofiltro utilizando plantas acuáticas, tales como es el caso de la (*Lemna minor*) es una buena solución para la descontaminación de los efluentes (digestatos) procedentes de biodigestores anaerobios, ya que este sistema es capaz de lograr porcentos de remoción de la carga contaminante (DQO) en un rango de 8% hasta 69%.

6. Los resultados referidos al análisis microbiológico del suelo, mostró una gran variabilidad en el comportamiento de los diferentes tratamientos (2,4 y 6) referidos al impacto que provocan los efluentes en el suelo, relativo a la población de hongos, bacterias y actinomicetos. Estos resultados son preliminares y pueden servir para investigaciones futuras, donde se demuestre si estos factores pueden provocar un incremento o decremento de la fertilidad del suelo.
7. Se diseñó la propuesta de filtro sanitario secundario y terciario a escala real para el biodigestor de 12 m³

Recomendaciones

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Llevar estas investigaciones a escala real.
2. Continuar los estudios de la influencia de los efluentes (digestatos) en la microbiología del suelo.

Bibliografía



Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

2013. Calidad y utilización de digestato. Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Alemania. 249 p.
- ARENAS, A. D., LUÉ-MERÚ, M. & TORRES, G. 2011. EVALUACIÓN DE LA PLANTA Lemna minor COMO BIORREMIADORA DE AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO. *AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA*, 2.
- ARROYAVE, M. 2004. LA LENTEJA DE AGUA (Lemna minor L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORI*. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA)*
- BARBA, L. E. 2002. *FITOREMEDIACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON METALES PESADOS*. UNIVERSIDAD DEL VALLE.
- BECERRA, M. E. A. 1990. Azolla filiculoides as partial replacement for traditional supplements in diets for growing-fattening pigs based on Sugar Cane Juice. *Livestock Research for Rural Development*.
- DÍAZ, B. 2014. Los usuarios del biogás en el año internacional de la agricultura familiar. V Encuentro Nacional de Usuarios del Biogás. Santa Clara. Abril, 2014. POSTER.
- ESCALANTE, V. E. 2002. *TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE UNA GRANJA PORCÍCOLA EN EL ESTADO DE CAMPECHE*. Universidad Autónoma de Campeche.
- ESPEJO, C. & GARCÍA, R. 2010. *Tratamiento de purines de ganado porcino en España para minimizar la contaminación de suelos y su impacto ambiental*. Universidad de Murcia.
- ESPINOSA N. 2013. Evaluación integral de la producción de biogás en la finca agropecuaria "San Antonio". Trabajo de diploma. UCLV, 2013. 123 p.
- FIGUEROA, V. 1994. El Instituto de Investigaciones Porcinas, Su Aporte a la Porcicultura Cubana y Los Nuevos Desafíos para El Futuro. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*, 1, 1-67.
- GARZÓN-ZÚÑIGA, M. A., BUELNA, G. & MOELLER-CHÁVEZ, G. E. 2012. La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III.
- HESSE, P. 1983. Storage and transport of biogas. *Project field*.
- JARAMILLO, M. & FLORES, E. D. 2012. *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera.*, Universidad Politécnica Salesiana.
- LAU-WONG, M. Studies on the Dynamics of Biogas Processes. 1986 Canadá.
- LEÓN, C. & CHAVES, D. 2010. Tratamiento de residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua (*Lemna aequinoctiales*) y un humedal subsuperficial en Costa Rica. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algall*, 1, 23.
- LIVING, W. 1996. *Ecological Design Principles for Pond and WetlandsBased Systems*, Edinburgo.
- MARTÍNEZ, C. M. 2015. *Instalaciones y equipos especializados en la producción avícola y porcina. Instalaciones agropecuarias. Fundamentos y elementos de calculo*. Ed. Felix Varela. La Habana, Cuba.
- MARTÍNEZ, C; MARAÑÓN E; CUPULL R; DELGADO V. 2014. Studies at the biogas plant called "Niña Bonita". VI Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad. AGROCENTRO, 2014. 8 p.
- MAYEA S; NOVO R; BOADA I; SILVEIRA E; SORIA M; MORALES Y; VALIÑO A. Microbiología agrícola. Tomo I. Edit. Félix Varela. La Habana, 2004 .284 p. ISBN: 959-258-749-3.

- METCALF & EDDY 1985. *Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales*, Madrid, España.
- 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*. abril-junio. 2012, vol 33,no.2, p .13-19.
- NC-27: 1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. ININ/ Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. 1999. 11 p.
- 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.
- PEDRAZA, G. & CHÁRA, J. 1997. Aspectos Técnicos y Conceptuales en la Descontaminación Productiva de Aguas. *En: Memorias del V Seminario - Taller Internacional en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria* Cali, Colombia: CIPAV.
- 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.
- SEKOULOV, I., RUDIGER, A. & BARZ, M. 2009. Biofiltración innovadora para el tratamiento de agua residuales producidas por comunidades e industrias. Available: www.terravivatec.com.
- SOSA C.M. 2015. Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala y diferentes tecnologías. Trabajo de diploma. UCLV, 2015. 80 p.
- TAIGANIDES, E. 1963. *Characteristics and treatment of wates from Confinement Hog Production Unit*. Ames, IA. Iowa.
- TAIGANIDES, E., PÉREZ, R. & SÁNCHEZ, E. 1996. *Manual para el Manejo y Control de Aguas Residuales y Excretas Porcinas en México*, México, Consejo Mexicano de Porcicultura.
- VÁZQUEZ, E. y TORRES, S. 2006. Fisiología vegetal. Parte I. Editorial "Felix Varela". La Habana. 451 p.
- VICARI, M. P. 2012. *Efluentes en producción porcina en Argentina: generación, impacto ambiental y posibles tratamientos*. Científico Universidad Católica Argentina.

Anexos



Anexos

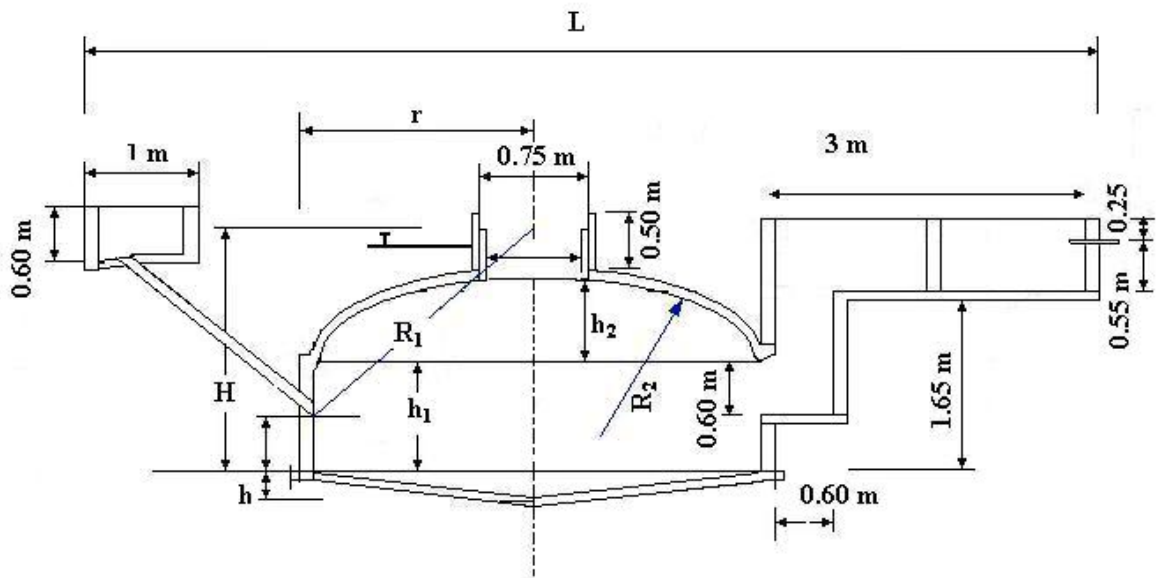


Fig.1.2. Detalles del biodigestor de 12 m^3 . Fuente: Guardado, J.; Berriz P., 2014.

Tabla 3.1. Análisis cualitativo de cada biodigestor. Fuente: SOSA, D. C.M. 2015.

| Operador de Biodigestor | Tipo de tecnología | Sustrato | Condiciones constructivas de la planta | Uso final de biogás | Otras observaciones |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--|-------------------------------------|---|
| Carlos Rodríguez | Tubular | Vacuno | Buena | Solo cocción de alimentos | Tiene filtros de agua y de sulfuro de hidrógeno (limalla de torno para el azufre). No está protegida del sol ni la lluvia. |
| Siroberto Hernández | Tubular | Vacuno Porcino | Buena | Solo cocción de alimentos | No tiene filtro de ningún tipo. |
| Eduardo Pérez | Tubular | Porcino | Buena | Solo cocción de alimentos | Tiene filtros (agua y de sulfuro de hidrógeno), está protegido del sol y la lluvia. |
| Rogelio Brito | Cúpula Fija | Porcino | Regular | Solo cocción de alimentos | Tiene un pequeño escape de gas y una laguna de oxidación. |
| Rogelio Rodríguez | Cúpula Fija | Porcino | Buena | Cocción de alimentos y electricidad | Tiene un metro contador para ver los m ³ que genera diario y un secadero para los efluentes (filtro secundario). |
| Eliosbel Del Sol | Cúpula Fija | Porcino | Regular | Solo cocción de alimentos | Tiene mucho escape de gas. |
| Pedro Espineira | Cúpula Flotante | Vacuno | Buena | Solo cocción de alimentos | Tiene filtros de agua y utiliza los efluentes para la lombricultura. |
| Ángel Rodríguez | Cúpula Flotante | Porcino | Buena | Solo cocción de alimentos | Tiene buen funcionamiento y tiene todos sus filtros (agua, sulfuro de hidrógeno y filtro secundario). |

Tabla 3.8. (DQO) de los sustratos evaluados ante diferentes cargas y posterior al filtrado terciario (biofiltro)

| Biodigestor analizado | Biomasa | ST (%) | | oTS (%) | | DQO (mgO ₂ /L) | | DQO (mgO ₂ /L). N.C.27:1999 |
|-----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|---|
| | | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Afluentes | Efluentes | Efluentes |
| Jorge Toboso | Porcino (300 mL) | 1,59 | 0,24 | 47,53 | 84,94 | 607,72 | 423,56 | <700 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (300 mL) | 3,23 | 6,77 | 66,48 | 56,76 | 15653,60 | 1565,36 | <700 |
| Ariel Domínguez | Porcino (300 mL) | 3,85 | 0,53 | 71,08 | 52,71 | 1639,02 | 681,39 | <700 |
| Jorge Toboso | Porcino (200 mL) | 1,59 | 0,24 | 47,53 | 84,94 | 2012,4 | 280,8 | <700 |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (200 mL) | 3,23 | 6,77 | 66,48 | 56,76 | 19188 | 1544,4 | <700 |
| Ariel Domínguez | Porcino (200 mL) | 3,85 | 0,53 | 71,08 | 52,71 | 4258,8 | 967,2 | <700 |

| | | | | | | | | |
|------------------|---------------------|----|----|----|----|----|----|---|
| Jorge Toboso | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | – |
| CPA"13 de Marzo" | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | – |
| Ariel Domínguez | Porcino (100 mL) | ne | ne | ne | ne | ne | ne | – |

Leyenda

ne: no evaluado