

# Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Biología



**Centro de Investigación y Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC)- Instituto Tecnológico de Costa Rica.**

**“Caracterización de los Parámetros de Operación de los Biodigestores a Escala del Instituto Tecnológico de Costa Rica”**

**Informe presentado a la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar al título de Ingeniería en Biotecnología con grado académico de Bachillerato Universitario.**

**Rossy Guillén Watson**

**Cartago Enero, 2010.**

# CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS BIODIGESTORES A ESCALA DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

Rossy Guillén Watson\*

## RESUMEN

La digestión anaeróbica es la forma más económica de controlar la contaminación proveniente de desperdicios urbanos, industriales y agrícolas, sobretodo para la producción energética y para la elaboración de bioabono. En esta investigación se instalaron seis biodigestores a escala en la planta de tratamiento del ITCR, los cuales se alimentaron manualmente durante 4 meses. A los biodigestores 1 y 4 se les agregó aguas residuales del ITCR, a los demás se les adicionó aguas residuales del residencial Istarú, cercano a la institución. Adicionalmente a los biodigestores 1, 5 y 6 se les agregó lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) triturado. Los parámetros de operación de las entradas y salidas se caracterizaron utilizando los protocolos descritos por Clesceri *et al.*, (2005). La temperatura osciló entre 19 y 24,5°C mientras que el pH el rango fue de 5,94-8,20. Ninguno de los biodigestores a escala cumplió con los valores admisibles del reglamento de vertido y reuso de aguas residuales. Los biodigestores que presentaron mayores lecturas de metano con el medidor de gases fueron los biodigestores 1 y 5, sin embargo, estos teóricamente según la fórmula de Umaña (1985) no presentaron producción real de biogás por día. Se recomienda asegurar la movilización interna de la materia orgánica para aumentar la productividad de biogás y reestructurar el diseño de los biodigestores a escala para mejorar su funcionamiento y facilitar los muestreos.

**Palabras Claves:** Digestión anaeróbica, biodigestores a escala, temperatura, pH, DBO, DQO, sólidos orgánicos, lirio acuático, biogás, metano.

---

\* INFORME DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN, Escuela de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2009.

**CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS  
BIODIGESTORES A ESCALA DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE  
COSTA RICA**

**ABSTRACT**

Anaerobic digestion is the cheapest way to control the pollution generated by urban, industrial and agricultural wastes. In this research we installed six small-scale biodigestors in the wastewater treatment plant of the ITCR. Biodigestors 1 and 4 were fed with institutional wastewater and the other four were fed with domestic wastewater of residential Istarú, located nearby the university. Additionally biodigestors 1, 5 and 6 were also fed with triturated aquatic lilies (*Eichhornia crassipes*). Operational parameters of the influents and effluents of all biodigestors were determined according to the protocols described by Clesceri *et al.*, (2005). Temperature ranged between 19 and 24.5 °C, pH between 5.94 and 8.20. None of the small-scale biodigestors had acceptable operational parameters according to standing rules of wastewater disposal and reuse. Biodigestors 1 and 5 presented the highest values of methane production measured with a portable gas detector, although according to the theoretical formula described by Umaña (1985) they did not have a real biogas production per day. We recommend the mobilization of organic matter inside the biodigestor to increase biogas productivity. It would also be advisable to redesign the biodigestors in order to improve their functionality as well as to make the sampling process easier.

**Keywords:** Anaerobic digestion, small-scale biodigestors, temperature, pH, BOD, COD, organic solids, aquatic lilies, biogas, methane.

**CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS  
BIODIGESTORES A ESCALA DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE  
COSTA RICA**

Informe presentado a la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar al título de Bachiller en Ingeniería en Biotecnología.

Miembros del Tribunal



Ing. Olga Lilliana Rivas Solano  
Profesora Asesora-ITCR



Bach. Noemy Quirós Bustos  
Profesora Asesora-CEQIATEC



Ing. William Rivera Méndez  
Lector

## **DEDICATORIA**

A mi mamá, a mi papá, a mi hermana, a mi hermano y a toda mi familia, principalmente a mi abuela Ilma, y mis grandes amigos por su paciencia y gran apoyo durante todo este tiempo. Así mismo, le quiero dedicar este trabajo a mi abuela Alicia que Dios la tiene en su santa gloria, por su gran cariño y devoción. Los quiero a todos.

Rosy

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a las profesoras Olga Rivas Solano, Noemi Quirós Bustos y al profesor William Rivera Méndez por su gran contribución a través de consultas, recomendaciones y también les agradezco por su paciencia durante todo este tiempo. Asimismo, les retribuyo a todos los del CEQIATEC, especialmente a Lourdes Loaiza, Edgardo Granado Thamez, Alejandro Córdoba Campos, a Don Erick Romero; también a Freddy Ángulo del CIPA, a Don Carlos Solano y a la profesora Alma Deloya de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del ITCR, por ser tan buenos conmigo y por ayudarme en todo. Además le quiero gratificar muy sinceramente a mis dos grandes compañeras de trabajo en los biodigestores a escala, Margie Faith y María A. Valerio, por su paciencia y esfuerzo profundo, sin ellas gran parte de este trabajo no se hubiera hecho, mil gracias a todos.

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>6</b>
<b>INDICE GENERAL</b> .....	<b>7</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>9</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1. TEMPERATURA .....	21
2.2. EL PH.....	22
2.3. EL TIEMPO DE RETENCIÓN.....	23
2.4. LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....	24
2.5. LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO) .....	24
2.6. EL MATERIAL DE CARGA.....	25
2.7. INHIBIDORES DE LA FERMENTACIÓN.....	27
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>28</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	28
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	28
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1. MUESTREO.....	32
4.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	32
4.2.1. <i>Temperatura</i> .....	33
4.2.2. <i>pH</i> .....	33
4.2.3. <i>Concentración de la Carga</i> .....	33
4.2.4. <i>DQO</i> .....	35
4.2.5. <i>DBO</i> .....	36
4.2.6. <i>Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)</i> .....	37
4.2.7. <i>Análisis de Nutrientes</i> .....	37
4.3. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL BIOGÁS .....	38
4.3.1 <i>Evaluación Teórica</i> .....	38
4.3.2 <i>Medición del Metano</i> .....	38

<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
5.1. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	40
5.1.1. <i>Temperatura</i> .....	40
5.1.2. <i>pH</i> .....	42
5.1.3. <i>Concentración de la Carga, DQO y DBO</i> .....	44
5.1.4. <i>Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)</i> .....	47
5.1.5. <i>Análisis de Nutrientes</i> .....	47
5.2. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y LA CALIDAD DEL BIOGÁS.....	48
5.2.1. <i>Evaluación Teórica</i> .....	48
5.2.2. <i>Medición del metano presente en el biogás</i> .....	50
<b>6. DISCUSIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>64</b>
<b>10. APÉNDICES .....</b>	<b>68</b>
10.1. APÉNDICE 1. ....	68
10.2. APÉNDICE 2. ....	68
<b>11. ANEXOS .....</b>	<b>69</b>
11.1. ANEXO 1 .....	69
11.2. ANEXO 2 .....	69
11.3. ANEXO 3. ....	70
11.4. ANEXO 4. ....	72
11.5. ANEXO 5. ....	74
11.6. ANEXO 6. ....	76
11.7. ANEXO 7. ....	78
11.8. ANEXO 8. ....	80

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Biodigestores a escala que se analizaron en la investigación.....	32
Tabla 2. Caracterización físico-química de las entradas de aguas del ITCR e Istarú y de la II Entrada del residencial Istarú a los biodigestores a escala. ....	44
Tabla 3. Determinación de las propiedades físico-químicas del efluente de cinco de biodigestores utilizando las aguas residuales del ITCR y de la II entrada de Istarú como carga. ....	45
Tabla 4. Valoración de un segundo muestreo de los efluentes de cinco de los biodigestores a escala. ....	46

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Biodigestores a escala. ....	29
Figura 2. A. Muestreo de agua de la entrada a la laguna de tratamiento del ITCR. B. Muestreo de aguas de la entrada a la laguna de tratamiento del residencial Istarú. C. Alimentación manual de los biodigestores.....	30
Figura 3. A. Triturador de residuos orgánicos utilizado. B. Mezcla de los lirios triturados con el agua residual. ....	31
Figura 4. Detector de gases RECON/4. ....	39
Figura 5. Comportamiento promedio por semana de la temperatura de la entrada a los biodigestores a escala. ....	40
Figura 6. Temperatura semanal promedio a las salidas de los biodigestores a escala.....	42
Figura 7. pH semanal promedio de la entrada a los biodigestores a escala. ....	43
Figura 8. pH semanal promedio al efluente de los biodigestores a escala. ....	44
Figura 9. Producción de biogás por día del primer muestreo realizado a las salidas de cinco biodigestores a escala .....	49
Figura 10. Producción de biogás por día, evaluando el segundo muestreo realizado a los efluentes de cinco biodigestores a escala.....	49
Figura 11. Porcentaje de metano detectado en los biodigestores alimentados con distintas fuentes de aguas residuales sin lirios y con lirios, utilizando el detector de gases RECON/4.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

Ácidos Grasos de Cadena Corta	AGCC
Agua	H <sub>2</sub> O
Amoníaco	NH <sub>3</sub>
Azufre	S
Carbono	C
Centro de Investigación y Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos	CEQIATEC
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO
Demanda Química de Oxígeno	DQO
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>
Fósforo	P
Hidrógeno	H
Instituto Tecnológico de Costa Rica	ITCR
Laboratorio de Química de la Atmósfera	LAQAT
Materia Orgánica	MO
Metano	CH <sub>4</sub>
Nitrógeno	N
Oxígeno	O <sub>2</sub>
Oxígeno Disuelto	OD
Potasio	K
Segunda Entrada del Residencial Istarú	Istarú II
Sólidos Totales	ST
Sólidos Sedimentables	SSed
Sólidos Suspendidos	SS
Sólidos Suspendidos Volátiles	SSV
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S
Sustancias Activas al Azul de Metileno	SAAM

Con base en los resultados de este Trabajo Final de Graduación se elaboró el siguiente artículo científico: Guillén-Watson, R; Rivas-Solano, O. Caracterización de los parámetros de operación de los biodigestores a escala del Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2010 (en preparación).

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Actualmente se cuenta con el conocimiento de tecnologías establecidas para el tratamiento y depuración de prácticamente cualquier tipo de agua residual. La digestión anaeróbica se ha reconocido como una de las formas más económicas de controlar la contaminación proveniente de desperdicios urbanos, industriales y agrícolas, no sólo porque el material contaminante es separado del desperdicio, sino también porque se producen sustancias de alto contenido energético (Androvetto, 2003).

La materia orgánica aparece en los vertidos a causa de las actividades domésticas, al ser en su mayoría biodegradable, da lugar a una elevada proliferación de bacterias. Estos organismos consumen el oxígeno disuelto (OD) y originan situaciones de deficiencia de Oxígeno ( $O_2$ ) que implican una serie de efectos como, muerte de especies animales, malos olores, contaminación, entre otros (Jarauta, 2005).

La finalidad básica de la digestión anaeróbica, es lograr reducir los parámetros físico-químico y biológicos de las aguas servidas, domésticas o agropecuarias, después de un período de tiempo en los digestores que permitan obtener al final un efluente, cuyas características y calidad aseguren una baja o nula contaminación, medida en valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) bacteriológico y de modo que puedan ser dispuestas al medio ambiente sin peligro para los cuerpos de agua que actúan como receptores finales (Osorio *et al.*, 2007).

Por lo tanto, los biodigestores son una opción positiva tanto a nivel ambiental como a nivel social, ya que es una forma de tratar las aguas residuales e inclusive de aprovechar las energías renovables. Es por esto, que se pretende caracterizar los parámetros de operación de los biodigestores a escala bajo las condiciones ambientales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

Además, cabe mencionar que esta investigación se enmarca dentro de un proyecto de investigación multidisciplinario, que se lleva a cabo actualmente en el ITCR, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), donde se da la participación de Escuelas como la de Ingeniería Electrónica, la de Biología, la de Seguridad e Higiene Ocupacional y la de Química, el cual lleva por nombre de “Sistema de vigilancia, control y protección para la purificación, compresión y envasado de metano empleando comunicación inalámbrica bajo protocolos de seguridad OSHA, NFPA”, cuyo fin es diseñar e implementar un sistema de vigilancia para controlar los procesos de producción, purificación, compresión y envasado de metano utilizando comunicación inalámbrica y protocolos de seguridad acordes con las normas OSHA y NFPA.

Este es un tema de mucho interés a nivel institucional, debido a que el ITCR produce diariamente gran cantidad de desechos sólidos y líquidos, provenientes de desechos de laboratorios, de revelado, de imprenta, de talleres y de sus aguas negras, por lo que posee una planta que trata toda esa aguas residuales, esto utilizando procesos microbiológicos y fotosintéticos que actúan sobre los desechos y producen una nueva biomasa no contaminante. Además trata las aguas provenientes de la urbanización Istarú, la cual se encuentra ubicada a sus alrededores.

Al mismo tiempo, la tecnología del biodigestor es un gran beneficio para el ITCR, ya que como ente representativo educacional, da el ejemplo de contribuir con el medioambiente, debido a que después del tratamiento de los desechos se obtienen productos y subproductos que al ser incorporados al ambiente no causan daño alguno. Además, incluyen los procesos biotecnológicos como alternativas para el beneficio ecológico y evidencian la necesidad que representa la incorporación de energías limpias tanto a empresas como a otras instituciones. Asimismo, según Castillo (1990), estos procesos han causado del mismo modo un impacto a nivel latinoamericano, esto por su bajo costo de construcción, operación y de mantenimiento, también por el beneficio que se le atribuye al luchar contra el calentamiento global del planeta, al disminuir las descargas de aguas contaminadas en arroyos, ríos y lagos.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

---

La digestión anaerobia es un proceso de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Por lo tanto, este proceso biológico lo llevan a cabo microorganismos anaerobios, que actúan en el interior de un reactor, transformando los desechos orgánicos de origen vegetal y animal en una mezcla de gases con alto contenido de metano ( $\text{CH}_4$ ) y otros compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles, entre ellos dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) (Bidlingmaier, 2006; Soria *et al.*, 2001).

Un biodigestor o reactor biológico según Castillo (2001) no es más que una cámara hermética en la que se dispone la materia orgánica sin oxígeno para que pueda llevarse a cabo la fermentación, la cual consiste en la descomposición bioquímica de esta biomasa, en acción de los microorganismos facultativos que degradan los almidones, las celulosas, las proteínas y otras sustancias o compuestos orgánicos de la cadena corta, en ácido y propiónico, manteniéndose la acidez, mediante sustancias reguladoras de los mismos organismos y formándose una masa homogénea similar a una suspensión dentro del reactor.

Como resultado del proceso anterior, se da la formación del biogás, el cual es un combustible que está conformado de 60 a un 70% de metano, de 30 a 40% de dióxido de carbono y pequeñas trazas de nitrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos (anexo 1). El biogás, puede llegar a producir un poder calorífico de aproximadamente 5400.00 kilocalorías por metro cúbico, es decir que 1m<sup>3</sup> de biogás tiene un equivalente de 6-8 kwh/m<sup>3</sup> en energía total dependiendo de la concentración de gas metano. Este tiene un poder calorífico de alrededor de 20 – 25 MJ/m<sup>3</sup>, comparado con 33 – 38MJ/m<sup>3</sup> que tiene el gas natural. Al mismo tiempo, se puede generar entre 1,75 y 22.2 kwh de energía eléctrica dependiendo de los generadores y motores. En cuanto a un nivel más comparativo se puede indicar que 1m<sup>3</sup> de biogás equivale a la energía de 0.60 l de diesel (Castillo, 2001; Soria *et al.*, 2001).

La materia orgánica se degrada para producir metano, esto mediante un conjunto de interacciones metabólicas complejas entre distintos grupos de microorganismos. Por ésta razón, existen tres fases básicas en este proceso de biodigestión y además cuatro grupos de bacterias esencialmente diferentes que intervienen en cada una de estas fases (Weiss *et al.*, 2009).

El primer grupo consiste en una mezcla de bacterias llamadas hidrolíticas o formadoras de ácidos, las cuales hidrolizan las moléculas complejas de materia orgánica para formar ácidos grasos de cadena corta y alcohol. El segundo grupo es el de las bacterias acetogénicas, que producen acetato e hidrógeno. Seguidamente el tercer grupo se les denominan las homoacetogénicas, estas pueden convertir un espectro amplio de compuestos multi o monocarbonados en ácido acético. Por último pero no menos importante, el cuarto grupo de microorganismos se denomina metanogénico. Estos microorganismos tienen la función de convertir los productos, ya degradados, a metano y dióxido de carbono, por lo que se les considera los principales de este proceso (Sosa, *et al.*, 1999). Además según Jarauta (2005) hay otro grupo de metanogénicos, los hidrogenófilos, que son los que consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás, también son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

La operación estable de los biodigestores requiere que todos los grupos bacterianos anteriormente descritos estén en un equilibrio dinámico armonioso. Cualquier cambio en las condiciones ambientales puede influir en este equilibrio, resultando en una producción desproporcionada de compuestos intermedios que pueden inhibir todo el proceso (Coto *et al.*, 2009).

Como resultado de la digestión anaerobia se generan residuos con una alta concentración de nutrientes para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que, el efluente de los biodigestores puede ser aplicado directamente en la agricultura, contribuyendo a la regeneración de suelos. Asimismo, el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas (Campero, 2007).

El uso de la tecnología de los biodigestores no es nuevo, pero en los últimos años ha cobrado un gran interés, debido a la actual crisis energética producto del agotamiento de los combustibles fósiles y además de la fuerte contaminación ambiental que producen los mismos (Domínguez y Ly, 2005).

Con biorreactores se puede producir biogás de biomasa, material lignocelulósico (planta lignosa) que suele ser un producto primario o de desecho de la agricultura o la silvicultura. Los biodigestores emplean bacterias o arqueobacterias para producir metano y biogás de tres fuentes principales: los vertederos, las fuentes de biomasa exclusivamente, y como un subproducto de los procesos de tratamiento anaerobio de los fangos cloacales, las lamas animales y los flujos de desechos industriales de alta contaminación. La generación de biogás es un método eficaz para recuperar la energía química de los desechos orgánicos con alto contenido de agua, y puede quemarse en hornos o en motores de combustión interna modificados. Eliminando el vapor de agua y el dióxido de carbono se produce metano, que tras ser purificado, se puede comprimir y utilizar en tuberías de gas natural. Por tanto, aprovechar de manera eficiente este combustible es de importancia para sustituir las tradicionales fuentes energéticas no renovables, escasas y costosas, convirtiendo la explotación agropecuaria en una actividad económica más rentable y menos contaminante (Quesada *et al.*, 2007; Castillo, 2001).

Como resultado de investigaciones en la tecnología de la producción de biogás, se han implementado diferentes diseños de biodigestores, como es el caso del modelo de la India con una campana flotante o el modelo chino de campana fija para el almacenamiento de biogás. Por otro lado, el biodigestor de tipo Taiwán debido a su bajo costo de instalación en comparación a otras plantas de biogás, ha sido exitosamente adaptado por parte de agricultores en América Latina y en países del Sureste Asiático. Este tipo de biodigestor consiste en un sistema tubular flexible de polietileno utilizado fundamentalmente para estimar los Beneficios Económicos Totales (BET), ya que su instalación y mantenimiento no requieren ningún adiestramiento especial (Domínguez y Ly, 2005; Botero, 2009).

De acuerdo con Botero (2009), estos sistemas están compuestos por una bolsa doble de polietileno, con la cual, se elabora un recipiente hermético, que tiene un tubo de entrada y otro de salida, creando un sello en forma de codo en ambos extremos de la bolsa, esta se introduce dentro de una fosa en tierra, con el piso del fondo a nivel. Seguidamente, la bolsa almacena el líquido (el agua más la materia orgánica en fermentación en ausencia de oxígeno-fermentación anaeróbica-) durante aproximadamente 25 a 50 días. El efluente se puede utilizar como abono orgánico y al mismo tiempo la bolsa también permite almacenar, extraer y utilizar como combustible el biogás producido y almacenado continuamente. Incluso puede construirse en forma horizontal y por ello puede favorecer zonas donde el nivel freático es alto.

Para poder controlar posibles represores del proceso metanogénico dentro del biodigestor, de acuerdo con Jarauta (2005), lo mejor es investigar ciertos parámetros de control operacional, que nos permitan en caso de anomalías funcionales, determinar la causa de la alteración. Esto significa controlar algunos de los factores ambientales tanto internos como externos, los que nos sean más accesibles y desarrollar una rutina de control de la planta, ya que las bacterias, como seres vivos y como entes que determinan los rasgos adecuados para llevar a cabo la biodigestión, se ven afectadas por condiciones del entorno.

Entre esos factores se encuentran parámetros muy importantes como los descritos a continuación.

### **2.1. Temperatura**

La temperatura tanto interna como externa del biodigestor, es uno de los factores más importantes que afectan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos, ya que a temperaturas muy altas o muy bajas no crecerán. Pero los valores absolutos de estas temperaturas mínimas o máximas varían según los diferentes tipos de microorganismos y de los hábitats a los cuales pertenecen (Madigan *et al*, 2004).

Cabe destacar que las bacterias mesófilas completan su ciclo biológico en el ámbito de 15 a 40°C con una temperatura óptima de 35°C. Las bacterias termofílicas cumplen sus funciones en el ámbito de 35 a 60°C con una temperatura óptima de 55°C. Por lo tanto, la temperatura dentro del reactor se debe encontrar en el rango tolerado por los diferentes microorganismos (20-55°C). Específicamente las bacterias metanogénicas, son más sensibles a los cambios de temperatura que los otros microorganismos del digestor, debido a que la velocidad de crecimiento de los otros grupos bacterianos es mayor que la de las metanobacterias. Todos los microorganismos presentes en el biodigestor pueden resistir cambios variables de temperatura hasta un lapso de dos horas aproximadamente, y pueden retornar rápidamente a los ritmos normales de producción de gas cuando la temperatura se restablece (Soria *et al.*, 2001; Domínguez y Ly, 2005).

## **2.2. El pH**

Cada organismo tiene un rango de pH dentro del cual es posible el crecimiento y normalmente posee un pH óptimo bien definido. La mayoría crecen en un margen de pH de 2-3 unidades. Generalmente los ambientes naturales tienen un valor de pH entre 5 y 9, y los organismos con pH óptimos de este orden son los más comunes. Sólo unas cuantas especies pueden crecer por debajo de 2 o por encima de 10 (Madigan *et al.*, 2004).

De acuerdo con las Investigaciones de Dias, *et al.* (2007) este factor es elemental en el proceso de elaboración del biogás, ya que los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) producidos durante el proceso de digestión, reducen el pH en la fase líquida del digestor. Sin embargo, el equilibrio  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$  en el digestor ejerce una resistencia sustancial a los cambios de pH posibilitando un aumento en la producción de metano.

### 2.3. El Tiempo de Retención

Este se define según Soria *et al.*, (2001) como el tiempo promedio que tarda la materia orgánica en ser degradada por los microorganismos. Debido a que el proceso de producción de gas es lento, mientras más tiempo estén las sustancias descargadas en el biodigestor, mayor será la producción de gas en términos absolutos por unidad de sustrato. Hay dos índices para identificar la retención de las sustancias en el digestor. El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRS) se determina al dividir el monto de materia orgánica (MO) o de sólidos volátiles (SV) cargados en el digestor, entre la cantidad de MO que sale del sistema diariamente. Se asume que el TRS representa el tiempo de retención promedio de los microorganismos en el digestor. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la proporción entre el volumen del reactor o digestor, dividido por la carga diaria. Estos índices son importantes en los digestores de última generación (Domínguez y Ly, 2005).

Según Hilbert (2002), el tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un período más corto. De igual forma, dependen del tipo de sustrato, de la temperatura de operación, y de los parámetros físicos del biodigestor (volumen), aparte presentan una relación directa con la estabilización del sistema y con la carga contaminante a remover (Osorio *et al.*, 2007).

#### **2.4. La Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

El DQO se expresa como la cantidad de oxígeno total consumido por la oxidación química de la porción de materia orgánica en el agua que se puede oxidar por un oxidante químico fuerte como el dicromato de potasio (Okafor, 2007). Este parámetro se usa para medir el potencial contaminante de las aguas residuales, ya que se basa en la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica degradable, así como también los restos de materiales fibrosos, ligninas y otros. Por lo tanto, la presencia de DQO altos indica que existe una carga importante de componentes orgánicos que no son degradados biológicamente, por lo cual la persistencia de estos componentes en el ambiente será mayor. Contrariamente a lo anterior, las DQO bajas implican que la actividad de los microorganismos, así como las condiciones del ambiente anaerobio, fueron responsables de la degradación, reduciendo su actividad y con ellos el consumo de oxígeno (Soria *et al.*, 2001), representando aguas poco contaminadas.

#### **2.5. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Esta técnica de acuerdo con Okafor (2007), representa la cantidad requerida de oxígeno, en mg/l, para estabilizar o descomponer la materia orgánica contenida en el agua residual, por medio de microbios aeróbicos durante un período de cinco días a 20°C. Además, este método fue desarrollado debido a la complejidad de los materiales orgánicos introducidos en el agua y también por el papel dominante que juega el oxígeno en el apoyo de las bacterias aerobias que degradan la materia orgánica.

La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales, los orgánicos carbónicos, los cuales son utilizables como fuentes de alimentación por organismos aeróbicos; los de nitrógeno oxidable, que son derivados de la presencia de nitritos, amoníaco y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas; y los compuestos químicos reductores (ión ferroso, sulfitos, sulfuros que se oxidan por oxígeno disuelto). Por ende esta técnica es utilizada para determinar la demanda de oxígeno de los materiales orgánicos carbónicos que se encuentran en las aguas residuales. Por lo tanto valores bajos de DBO, implican que no hay suficiente materia orgánica presente para consumir oxígeno, representando aguas no contaminadas y asimismo se puede establecer lo contrario cuando se presentan DBO altos (Ramalho, 1996).

## **2.6. El Material de Carga**

Es toda aquella materia que se utiliza para la fermentación, principalmente los desechos orgánicos que se introducen dentro de un biodigestor para su degradación. También se pueden usar aguas residuales, las cuales se muestrean y se analizan para determinar la eficiencia del funcionamiento del sistema de tratamiento (Okafor, 2007). Es muy indispensable que la relación óptima de carbono/nitrógeno (C/N) sea de 30:1, ya que las pérdidas de nitrógeno asimilable, pueden reducir la calidad del material digerido. Por el contrario, si la relación es muy amplia por ejemplo 40:1, se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir es de 7 a 9 y se consigue al diluir el material orgánico con agua (Soria *et al.*, 2001).

Otro factor importante para determinar la cantidad de materia orgánica que se encuentra dentro del biodigestor son los sólidos totales, que se refieren a la materia suspendida o disuelta en agua o aguas residuales, y se relacionan con la conductancia específica y la turbiedad. Los sólidos totales (también llamados residuo total) son el término usado para describir a la materia después de la evaporación y de la sequedad de una muestra de agua. En estos se incluyen ambos sólidos suspendidos totales, los cuales son la porción de agua que pasa a través de un filtro de fibra de vidrio menor de 6 micrómetros. Otro factor significativo son los sólidos suspendidos volátiles (SSV), los cuales son los sólidos (mg/l) que se pueden oxidar para proveer gas a 550°C. La mayoría de los compuestos orgánicos se oxidan a CO<sub>2</sub> y a H<sub>2</sub>O en esa temperatura y los compuestos inorgánicos permanecen como ceniza (Okafor, 2007). Según Osorio y colaboradores (2007) los SSV constituyen el 80% de los sólidos totales, y están conformados principalmente por un 30% de compuestos de C, 5% de N, y un 65% de H, O, S.

## 2.7. Inhibidores de la Fermentación

Son aquellos factores, que inhiben la actividad de los microbios. Con base a lo anterior, los compuestos tóxicos, aún en concentraciones bajas, influyen negativamente en el proceso de digestión al disminuir la velocidad del metabolismo de la microflora. Por consiguiente, debido al lento crecimiento de las metanobacterias, su inhibición puede llevar a un fallo completo en el proceso en sistemas mixtos, debido a un desbalance en la población bacteriana. Los dos principales indicadores de la presencia de algún tipo de inhibición en el proceso son la disminución en la producción de metano y un incremento en la concentración de AGCC en el medio. Además la excesiva concentración de amoníaco y N, destruyen las bacterias, igualmente, todo tipo de químicos avícolas, en especial los tóxicos fuertes aún en ínfimas proporciones podrían destruir totalmente la digestión normal. También muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores (Dias, *et al.*, 2007; Domínguez y Ly, 2005; Soria *et al.*, 2001).

### **3. OBJETIVOS**

---

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Caracterizar los parámetros de operación de los biodigestores a escala en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar semanalmente la temperatura y el pH a la entrada y a la salida de los biodigestores para caracterizar su comportamiento según las condiciones ambientales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Valorar tanto el influente como el efluente mediante análisis químicos para comparar la cantidad y calidad de materia orgánica que entra y que sale del biodigestor.
- Estimar la producción y la calidad del biogás que se produce para que se compruebe la funcionalidad del modelo a escala.

#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

---

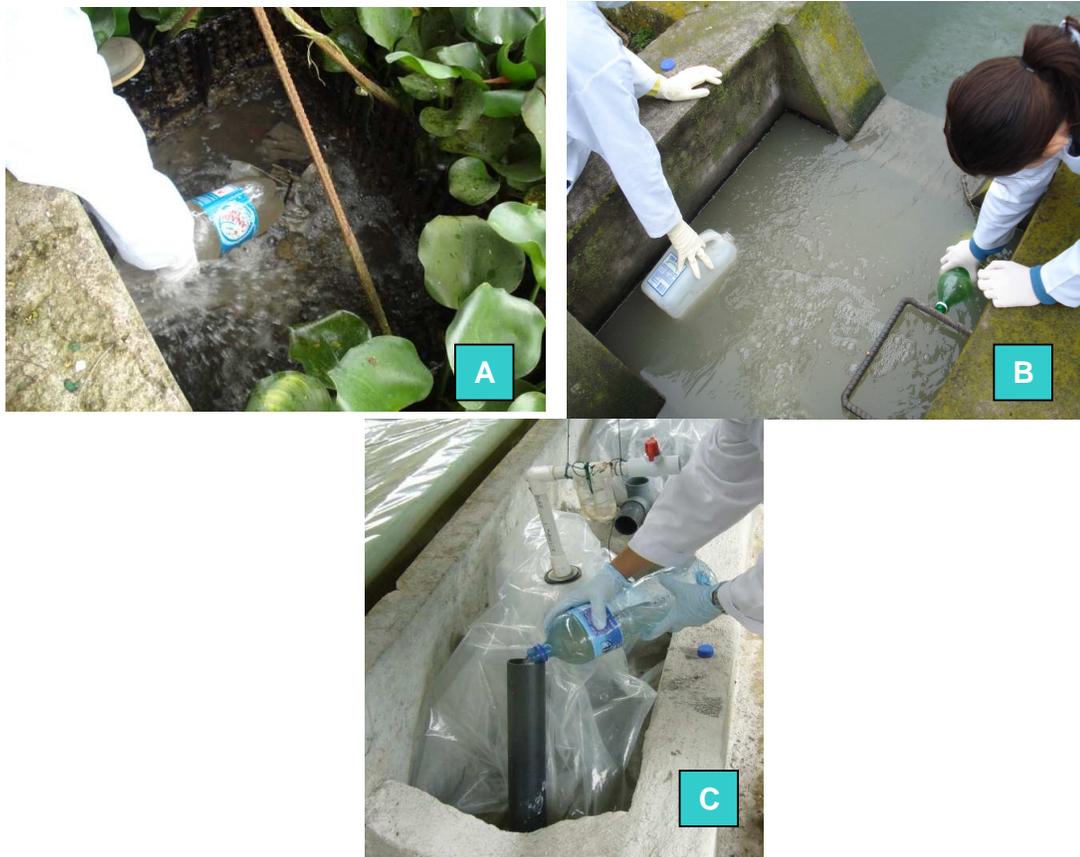
Esta investigación se llevó a cabo en los Laboratorios de Aguas Residuales del Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), entre los meses de agosto a diciembre del 2009, asimismo los muestreos se tomaron en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del ITCR, lugar donde se instalaron los biodigestores a escala, en la provincia de Cartago, en la Región Central de Costa Rica a una altura de 1.435 msnm, con una temperatura promedio de 19.2°C y una precipitación anual de 1.500 - 2.000 mm.

Los seis biodigestores utilizados en el experimento fueron de tipo Taiwán, de flujo continuo, construidos en bolsa a escala de polietileno, los cuales tienen una capacidad líquida de 80 litros y una fase gaseosa de aproximadamente de 20 litros; con dimensiones de 70cm de largo, 37cm de ancho y 40cm de alto. Para la construcción de cada biodigestor se utilizaron 2 bolsas plásticas de 90x145cm, 1 adaptador macho pvc ½", 1 adaptador hembra pvc ½", 1 codo 90° pvc ½", 1 llave de paso pvc ½", 50cm tubo pvc ½", 1 tubo pegamento pvc, 60cm tubo pvc 2", 3 codos de 90° pvc 2" (Figura 1).



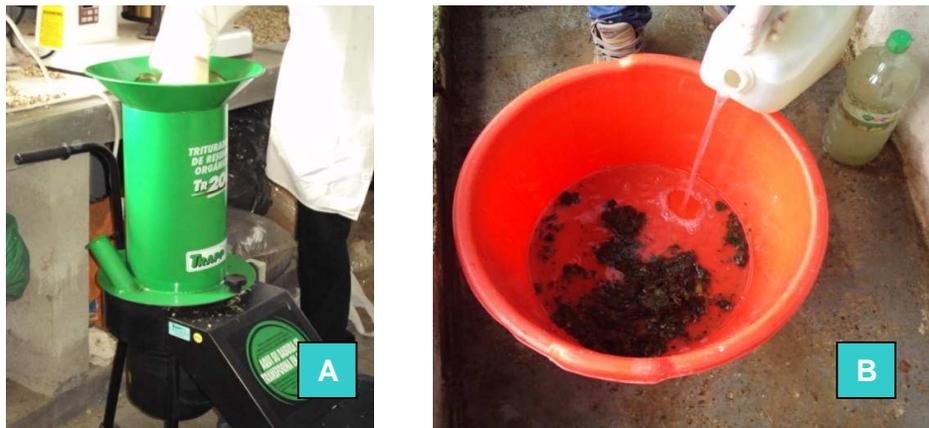
**Figura 1.** Biodigestores a escala.

Estos biodigestores se inocularon diaria y manualmente con ocho litros de las aguas residuales provenientes de las plantas de tratamiento del ITCR; tanto de la entrada a las lagunas que dan tratamiento a las aguas institucionales (Figura 2A, B, C), como de la entrada a las lagunas que dan tratamiento a las aguas de la urbanización Istarú, ubicada en los alrededores de la institución.



**Figura 2.** **A.** Muestreo de agua de la entrada a la laguna de tratamiento del ITCR. **B.** Muestreo de aguas de la entrada a la laguna de tratamiento del residencial Istarú. **C.** Alimentación manual de los biodigestores.

La primera inoculación se realizó el 28 de agosto del 2009 y al cabo de tres semanas se estipuló que era necesario agregar mayor cantidad de sólidos, por lo que se procedió a agregar lirios acuáticos (*Eichhornia crassipes*) triturados tomados de las mismas lagunas de la planta de tratamiento, éstos se trituraron en un triturador de residuos orgánicos industrial Trapp TR200 (Figura 3A) para posteriormente ser secados (exponiéndolos al sol) y agregados a razón de 400 g por cada 7,5 L del agua residual, haciendo la mezcla antes de agregarla al biodigestor (Figura 3B). Pero a los biodigestores que no se les agregó lirios se les añadió solo 8L de las aguas residuales. Los biodigestores se dividieron para realizar diferentes experimentos de productividad de biogás, de acuerdo a como se detalla en la tabla 1. Se realizó una alimentación semi-continua cargando los biodigestores dos veces por semana, para cumplir con el tiempo de retención de 10 días establecido. Luego de acuerdo a los análisis de la concentración de sólidos y a los malos olores del efluente, se optó por reducir la cantidad de lirios triturados, los cuales se agregaron la mitad de lo que se le adicionó con anterioridad, es decir 200 g.



**Figura 3.** A. Triturador de residuos orgánicos utilizado. B. Mezcla de los lirios triturados con el agua residual.

**Tabla 1.** Biodigestores a escala que se analizaron en la investigación.

<b>Biodigestor</b>	<b>Agua residual</b>	<b>Lirios</b>
1	ITCR	Sí
2	Istarú	No
3	Istarú	No
4	ITCR	No
5	Istarú	Sí
6	Istarú	Sí

#### **4.1. Muestreo**

Para el análisis completo de aguas, se tomaron muestras, tanto al influente como al efluente del biodigestor. Se hizo un muestreo de las dos diferentes entradas que posee la planta del residencial Istarú. En cuanto a las aguas del ITCR, se hizo solo un muestreo en la única entrada. Luego se realizaron muestreos adicionales en la segunda entrada de Istarú (Istarú II, identificación de la muestra) con lirios, al igual que la entrada de agua residual del ITCR con lirios. Con respecto, a los efluentes, se valoraron durante los dos meses posteriores a la primera inoculación, es decir, después de que pasara el período de estabilización y luego 22 días después del primer muestreo, se procedió a ejecutar el último análisis a los efluentes.

#### **4.2. Evaluación de Parámetros de Operación**

En cuanto a los análisis de la carga y descarga del biodigestor, se recolectaron un volumen final de muestra de aproximadamente de 2 a 3 litros, esto según los tipos de análisis, los cuales incluyeron la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST); Sólidos Suspendidos (SS), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Sedimentables (SSed), Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), el pH y temperatura del influente y efluente del biodigestor. Conjuntamente se realizaron análisis de nutrientes, donde se midió el contenido de potasio (K), nitrógeno (N) y Fósforo (P) a las entradas con lirios y sin lirios, pero solo a las salidas del biodigestor 1, biodigestor 2, biodigestor 4 y el biodigestor 6.

A continuación se describen los procedimientos mencionados según Clesceri *et al.*, (2005).

#### **4.2.1. Temperatura**

La temperatura del influente y del efluente de los biodigestores, se midió con un termómetro de mercurio, cada vez que se realizaron los muestreos y las alimentaciones del biodigestor.

#### **4.2.2. pH**

El pH se evaluó con un pH-metro portátil marca E2000 pH50114, a las entradas y a las salidas de los biodigestores inmediatamente cuando se realizaron las cargas y los muestreos.

#### **4.2.3. Concentración de la Carga**

Este parámetro de medición de la materia orgánica de la entrada y de la salida, se calculó con base en el análisis de ST de la carga, para el cual se tomó en cuenta la cantidad de agua que se agregó y las proporciones de los componentes. Por lo tanto, se colocaron en beakers y se sometieron a un proceso de secado en la estufa a 103 a 105°C y luego se pusieron a enfriar en desecadores. Después se pesaron (volumen inicial) y se le agregaron 50 ml de muestra, luego se ubicaron en la estufa hasta evaporarse. Por último se pesaron los beakers, para obtener el volumen final y se calculó la diferencia de peso.

Para la determinación de Sólidos Suspendidos se colocaron en un papel de fibra de vidrio de 0,45  $\mu\text{m}$  de poro, con la parte rugosa hacia arriba, en el equipo de filtración al vacío. Luego se lavaron con 5 porciones de 20 ml de agua destilada. Después de la filtración del agua se desprendió el papel usando pinzas y se colocaron en una placa Petri. Seguidamente se pusieron en una estufa y luego se almacenaron en un desecador aproximadamente por una hora hasta que se enfriaran y se luego se pesaron. Asimismo, se evaluaron por diferencia de pesos. Igualmente, se realizaron pruebas de Sólidos Sedimentables, para cual se tuvo que agitar primero la muestra de 1 litro. Después se agregó en un cono Imhoff (Apéndice 1), donde se dejaron sedimentar los sólidos por 45 minutos. Luego se agitaron con una varilla de vidrio suavemente y se dejaron sedimentar los sólidos durante otros 15 minutos para completar la hora.

Por ultimo, se realizaron análisis de Sólidos Volátiles, los cuales se colocaron en un papel de fibra de vidrio de 0,45  $\mu\text{m}$  de poro, con la parte rugosa hacia arriba, en el equipo de filtración al vacío. Luego se lavaron con 5 porciones de 20 ml de agua destilada. Después de la filtración del agua se desprendieron los papel filtro usando pinzas y se colocaron en una placa Petri, seguidamente se ubicaron en una estufa y luego se almacenaron en un desecador aproximadamente por una hora hasta que se enfriaran y se luego se pesaron (Volumen inicial). Posteriormente se agregaron las muestras a través de la fibra de vidrio y se filtraron al vacío. Consecutivamente se colocaron en un Crisol Gooch y se pusieron en una mufla a 550°C, luego esperó a que las muestras se enfriaran y por último se midió la masa (Volumen Final).

#### 4.2.4. DQO

A las muestras tanto del influente como del efluente que se almacenaron se les hizo un tratamiento previo, el cual consistió en bajarles el pH hasta que fuera menor que 2. Luego para el análisis de DQO se tomó un balón de fondo plano, el cual se agregaron 0,2 g de sulfato de mercurio, 5 ml dicromato de potasio y rápidamente se le adicionaron 10ml de la muestra y 15 ml ácido sulfúrico. Además se realizaron dos blancos, uno en frío y otro caliente. El blanco frío (temperatura ambiente) contenía 5ml de dicromato de potasio, 10ml de agua destilada y 15ml ácido sulfúrico. Al blanco caliente se le adicionaron 5 ml de dicromato de potasio 0,2 g sulfato mercurio y 15ml ácido sulfúrico y 10 de agua destilada. Después los balones se acoplaron al condensador y se abrieron los flujos de agua refrigerante. Al mismo tiempo, se debieron tomar en cuenta la agitación para la mezcla de reflujo antes de suministrarles el calor para que se previnieran los sobrecalentamientos en los fondos de los balones y la formación de espuma. Posteriormente, se cubrieron el extremo superior del condensador con un vaso pequeño para prevenir la entrada de materiales extraños a la mezcla y se dejaron en reflujo durante 1,45 h. Luego se dejaron enfriar y se lavaron los condensadores desde la parte superior con 60 ml de agua destilada. Inmediatamente, después de que se enfriaron los balones hasta temperatura ambiente, se valoró el exceso de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) con sulfato de amonio y hierro (II) (FAS) en presencia de 0,10 a 0,15 ml (2 ó 3 gotas) de indicador de ferroina y se tomaron como punto final de la titulación el primer cambio nítido de color azul-verdoso a café-rojizo. De la misma manera, se sometieron a reflujo y a titular los blancos y una disolución estándar de ftalato ácido de potasio, la cual sirvió para evaluar la técnica y la calidad de reactivos. Por último se expresaron los resultados a través de la siguiente fórmula:

$$DQO = \frac{(V_{BC} - V_{muestra}) \times Alícuota_{K_2Cr_2O_7} \times M_{K_2Cr_2O_7} \times 48000}{Alícuota_{muestra} \times V_{Bf}}$$

Donde:

**V<sub>BC</sub>**= Vol en ml de disolución de sulfato de amonio y hierro (II) gastado de la valoración del blanco caliente

**V<sub>Bf</sub>**= Vol en ml de disolución de sulfato de amonio y hierro (II) gastado de la valoración del blanco frío

**V<sub>muestra</sub>**= Vol en ml de disolución de sulfato de amonio y hierro (II) gastado de la valoración de la muestra

**Alícuota<sub>K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></sub>**= Cantidad ml de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> agregados a la muestra y los blancos

**M<sub>K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></sub>**= Molaridad del K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ≈ 0,0417mol/l (0,025N)

**Alícuota<sub>muestra</sub>**= Cantidad ml de muestra utilizados en el análisis

**48000**= Factor conversión por equivalencia química del oxígeno = 1000x8x6

#### 4.2.5. DBO

Este análisis se realizó tanto al influente como al efluente. Por lo tanto, primera instancia se tuvo que preparar el agua de dilución, para ello se colocó la cantidad de agua aireada necesaria en una botella y se agregó por cada litro, 1 ml de cada una de las siguientes soluciones: tampón fosfato, MgSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, y FeCl<sub>3</sub>. Seguidamente se llevó el agua de dilución a una temperatura de 20°C antes de su uso y se saturó con oxígeno disuelto (OD), mediante burbujeo de aire filtrado libre de materia orgánica (MO). Se empleó material de vidrio bien limpio para proteger la calidad del agua. Luego se determinaron alícuotas de las muestras que se utilizaron, las cuales dependían de los resultados del análisis del DQO. Una vez que se tenía el resultado de DQO, se agregaron alícuotas de las muestras en botellas Wheaton y se llenaron con el agua aireada con nutrientes. Además, se prepararon patrones de glucosa-ácido glutámico con anterioridad. Por consiguiente, se determinaron las lecturas iniciales con el método de electrodo de membrana, para que determinaran el OD inicial en todas las muestras diluidas y testigos. Seguidamente se taparon las botellas que contenían las diluciones, los patrones y blancos (solo agua de dilución), con bolsas y ligas y se incubaron por cinco días a (20± 1) °C. Después de los cinco días se realizaron las lecturas finales con el medidor de oxígeno hasta que éste se estabilizara. Por último, se expresaron los resultados a través de la siguiente fórmula:

$$DBO_5 = \frac{(OD_i - OD_f) - (OD_{i-f \text{ Blanco}})}{\text{Volumen muestra}}$$

Donde:

**OD<sub>i</sub>**= mg de oxígeno disuelto/l antes de incubar

**OD<sub>f</sub>**= mg de oxígeno disuelto/l después de los 5 días de incubar

**OD<sub>i-f Blanco</sub>**= valor promedio de O<sub>2</sub> consumido en mg/l durante los 5 días

#### **4.2.6. Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)**

Se realizaron estas pruebas físicas de detergentes a las entradas y a las salidas, los cuales se determinaron utilizando un Kit de la empresa HACH. Se tomaron tubos de ensayo con 10ml de la muestra, luego se le agregaron 12 gotas de la disolución del detergente “Reaget eat” 1059-32 (100ml), seguidamente se agregaron 5ml de cloroformo, se taparon y se agitaron los tubos de ensayo, por último se esperó de 30 a 60 segundos para que se separaran las capas. En caso necesario, las muestras se diluyeron 1:20.

#### **4.2.7. Análisis de Nutrientes**

Se realizaron análisis de Nitrógeno Total, Fósforo Total y Potasio a la entrada y a la salida de los biodigestores, en el Laboratorio Químico de Control de Calidad Industrial AQYLASA, los cuales se basaron en la metodología del libro Standard Methods for Examination of Water and Waste Water (2005).

### 4.3. Estimación de la Producción y Calidad del Biogás

#### 4.3.1 Evaluación Teórica

Se realizó un cálculo de la producción de biogás a los dos muestreos de la salida de los biodigestores a escala, con una diferencia de tres semanas entre cada muestreo, utilizando la siguiente fórmula según Umaña (1985).

$$\text{m}^3 \text{ Biogás/día} = [(0,35 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 \times \text{Caudal en litros/día} \times (\text{DQO}_{\text{influyente}} - \text{DQO}_{\text{efluente}})] / 1000$$

Esta es una metodología de cálculo alternativo que se utiliza cuando no se ha usado un medidor de biogás instalado en el biodigestor o en un recolector de gas.

#### 4.3.2 Medición del Metano

Se determinó la calidad del biogás producido por medio de un equipo portátil especializado RECON/4 marca Enmet (Figura 4), que detectó gases, como Monóxido de Carbono (CO), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), Oxígeno (O<sub>2</sub>) y gases combustibles electroquímicos – catalíticos como el metano (CH<sub>4</sub>). Luego del mes de tomar las lecturas con del detector de gases, éste se dejó de utilizar debido a que los gases presentes en los biodigestores se encontraban a concentraciones mayores a los límites de detección del equipo.



**Figura 4.** Detector de gases RECON/4.

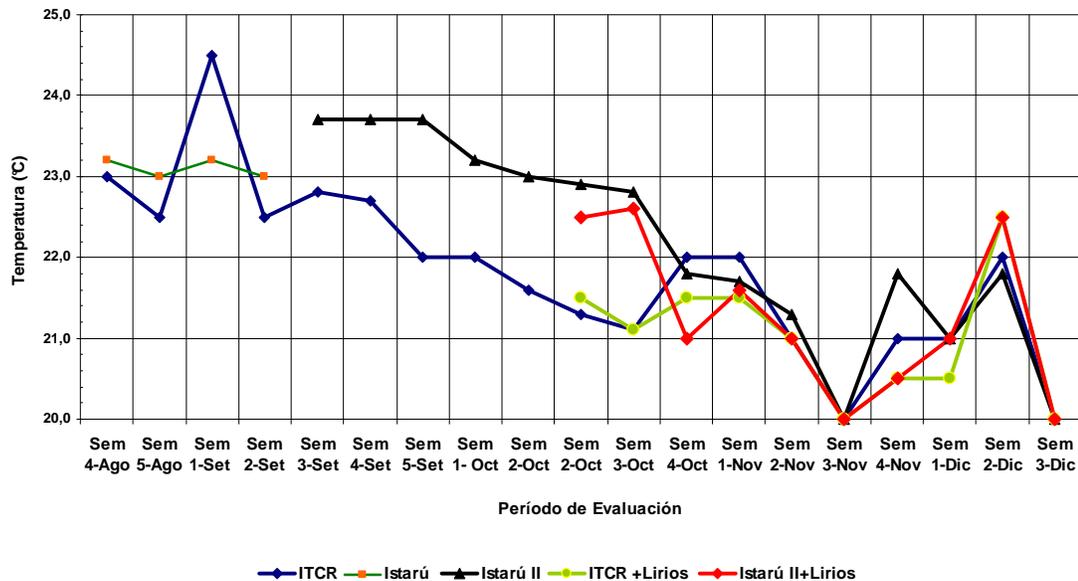
Además se realizó un análisis químico de gases, al biodigestor 6, para evaluar el porcentaje de metano, en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), de la Escuela de Química de la Universidad de Nacional. El muestreo se realizó en bolsas de teflón, durante 1 hora. Se tomaron muestras cada 30 minutos. El metano contenido en las muestras fue concentrado en un sistema criogénico, enfriado con nitrógeno líquido y se inyectaron en un cromatógrafo de Gases Perkin Elmer, AUTOSYSTEM- XL, equipado con una columna capilar de 60 m de largo marca Phenomenex Zebron ZB-1, de 0,32 mm de diámetro interno y de 1 $\mu$ m de fase estacionaria tipo dimetilpolisiloxano al 100%. Además el detector utilizado fue un detector ionización de llama, FID.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Evaluación de Parámetros de Operación

#### 5.1.1. Temperatura

La estimación de la temperatura del influente de los biodigestores se representa a continuación en la figura 5, en la cual, se evaluaron dos entradas de agua con diferente cantidad de materia orgánica, provenientes del residencial Istarú. De estas entradas, la primera (Istarú) solo se valoró por un período muy corto, presentando temperaturas constantes. No obstante, pese a que la segunda entrada (Istarú II) mostró temperaturas (20-23,7°C) y valores de pH muy similares (6,75-7,95) a las de la primera entrada, se optó por continuar solo con las mediciones de la segunda entrada (figura 7).



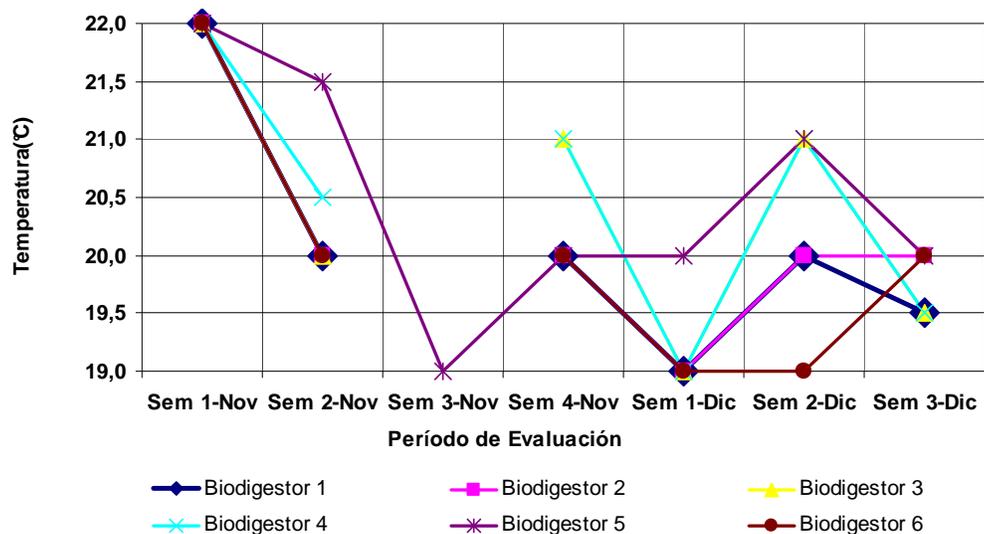
**Figura 5.** Comportamiento promedio por semana de la temperatura de la entrada a los biodigestores a escala.

Elaborado con el programa Excel

En cuanto al estado térmico de las entradas de agua, tanto para el Istarú II como para la entrada del ITCR, disminuyeron desde la tercera semana de septiembre hasta la tercera semana de noviembre, presentando variaciones en la temperatura (al final de las evaluaciones), cuando la alimentación de los biodigestores fue discontinua (dos veces por semana) (figura 5).

No obstante, las temperaturas tanto de las entradas con lirios del ITCR como del Istarú II, se comportaron muy semejantes entre sí, ya que se mantuvieron entre un rango de 7,05-8,20 (figura 5).

Como se aprecia en la figura 6, los efluentes presentaron temperaturas iguales (22°C) en la primera semana de noviembre, sin embargo, durante la segunda semana, solo los efluentes de los biodigestores 1, 2 y 3 poseían la misma temperatura (20°C), mientras que los efluentes de los biodigestores 4, 5 y 6 tenían rangos de 20 a 21,5 °C. Posteriormente, en la tercera semana de noviembre, sólo se evaluó el efluente del biodigestor 5, que presentó una temperatura de 19°C. Además, en la primera semana de diciembre, los efluentes de todos los biodigestores disminuyeron sus temperaturas, con excepción del biodigestor 5, que mantuvo una temperatura constante de 20°C. Seguidamente, en la segunda semana de diciembre, todos sufrieron aumentos de temperatura, pero el efluente del biodigestor 6 se mantuvo. Finalmente, en la última semana de la toma de mediciones, los efluentes de los biodigestores 1, 3 y 4 presentaron una temperatura de 19,5°C y los demás una temperatura 20°C.

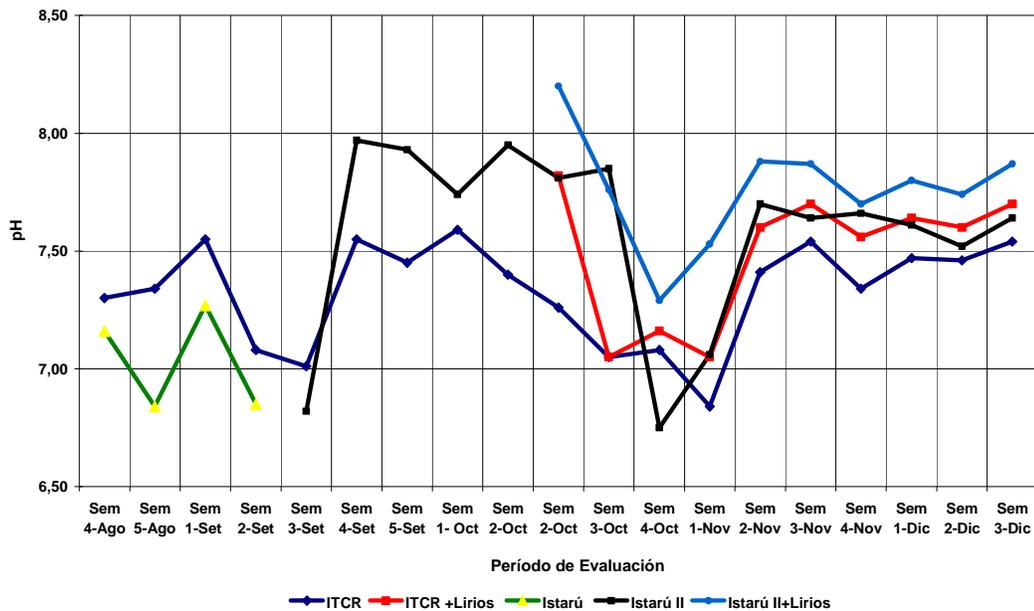


**Figura 6.** Temperatura semanal promedio a las salidas de los biodigestores a escala.  
Elaborado con el programa Excel

### 5.1.2. pH

En relación al pH de las entradas tanto de Istarú II como la entrada del ITCR, presentaron fluctuaciones al inicio de las semanas de estimación, y se mantuvieron constantes en las últimas (figura 7).

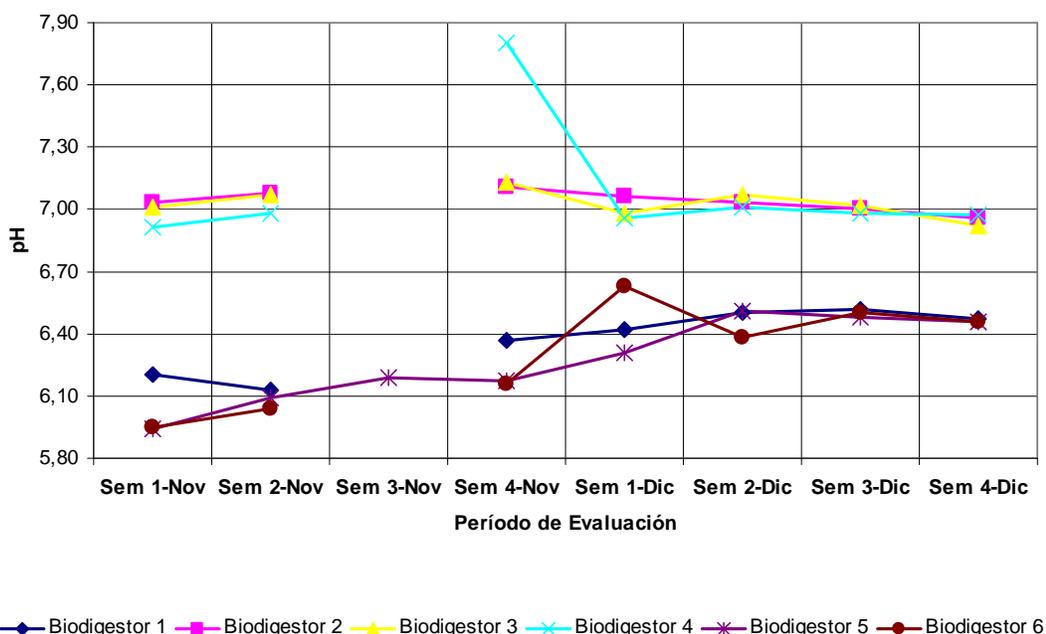
No obstante, el pH de los influentes sin lirios presentó rangos de 6,75-7,95, ver figura 7.



**Figura 7.** pH semanal promedio de la entrada a los biodigestores a escala.

Elaborado con el programa Excel

En cuanto a los valores de pH del efluente de los biodigestores (representados en la figura 8), su comportamiento tuvo pocas variables significativas durante las dos primeras semanas de noviembre, ya que sus rangos fueron de 5,94 a 7,11. Posteriormente, en la tercera semana de noviembre, sólo se evaluó el fluente del biodigestor 5, que presentó un pH de 6,19. Así mismo, a partir de la segunda semana de diciembre los biodigestores 1, 5 y 6 que contenían los lirios, presentaron un pH similar (6.38 a 6.52) entre ellos. De igual forma, los biodigestores 2, 3 y 4, también tenían un pH equivalente entre ellos (6.92 a 7.80). Además, los biodigestores sin lirios (Biodigestores 2, 3 y 4) mostraron un mayor pH, pero estos se mantuvieron en los límites establecidos para el buen funcionamiento del reactor.



**Figura 8.** pH semanal promedio al efluente de los biodigestores a escala.

Elaborado con el programa Excel

### 5.1.3. Concentración de la Carga, DQO y DBO

En la tabla 2 se presentan los análisis químicos que se realizaron a las entradas, donde se determinó que se aumentó el DBO, el DQO y todos los sólidos totales al igual que los sedimentables, suspendidos y los volátiles, esto al adicionarles lirios a las entradas, exceptuado las pruebas del SAAM, las cuales se redujeron (anexos 3, 4 y 6).

**Tabla 2.** Caracterización físico-química de las entradas de aguas del ITCR e Istarú y de la II Entrada del residencial Istarú a los biodigestores a escala.

Parámetros	ITCR	ITCR+ Lirios	Iztarú	Istarú II	Istarú II+Lirios
DBO (mg/l)	176 ±16	208±81	246 ± 16	166± 2	176±81
DQO (mg/l)	494 ± 41	480±67	400 ± 37	312±16	576±67
Sólidos Totales (mg/l)	1586,0 ± 8,5	4647±14	1365,0 ± 8,1	583,0±7,1	25181±24
Sólidos Suspendidos (mg/l)	245 ± 34	250±34	550 ± 35	125 ± 7	570±34
Sólidos Sedimentables (±0,05ml/L)	10	300	25	4,50	350
Sólidos Volátiles (mg/l)	0,4	1,53	0,74	0,53	0,85
Sustancias Activas al azul de metileno (±0,05 mg/l)	16	6	26	13	10

Elaborado con el programa Excel

Los efluentes de cinco biodigestores fueron igualmente estudiados por medio de análisis químicos (anexos 5 y 6). Los resultados se resumen en la tabla 3, al mismo tiempo se destaca que el biodigestor 6 (Istarú II+Lirios) fue el que presentó los valores más altos en todos los parámetros de operación analizados, a excepción de ST y SAAM, contrariamente el biodigestor 4 (ITCR) que presentó los valores más bajos de los parámetros que se evaluaron. Además los biodigestores a los cuales se les agregó lirios, excedieron todos los valores máximos admisibles por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas residuales, con excepción de los SSed. De la misma manera, los biodigestores 2 (Istarú II) y 4 (ITCR) mostraron resultados admisibles por el reglamento anteriormente mencionado, pero con alteraciones en los SS y en los análisis de SAAM.

**Tabla 3.** Determinación de las propiedades físico-químicas del efluente de cinco de biodigestores utilizando las aguas residuales del ITCR y de la II entrada de Istarú como carga.

Parámetros	Valores Máximos admisibles	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
DBO (mg/l)	50	447 ± 16	28,0 ± 1,1	21,0 ± 1,0	641± 163	1250±163
DQO (mg/l)	150	960± 58	78,3 ± 8,0	59,0 ± 7,1	960± 80	1974±134
Sólidos Totales (mg/l)	No aplica	1515,0±8,4	325,0±7,0	315,0±7,0	1191,0±9,0	1394,0±8,1
Sólidos Suspendidos (mg/l)	1	33,5±3,4	8,0±3,4	7,0 ± 3,4	40,5 ± 3,4	41,0±3,4
Sólidos Sedimentables (±0,05ml/L)	1	1	0,1	0,2	0,5	0,5
Sólidos Volátiles (mg/l)	No aplica	0,05	0,01	0,01	0,04	0,10
Sustancias Activas al azul de metileno (±0,05mg/l)	5	10	12	12	4	8

Elaborado con el programa Excel

En cuanto a las comparaciones de la entrada (tabla 2) con la salida (tabla 3) de los biodigestores a escala, los biodigestores con lirios presentaron aumentos en DBO, DQO y SAAM (sólo en el biodigestor 1), pero a la vez se redujeron considerablemente todos los sólidos orgánicos analizados. Sin embargo, los biodigestores 2 y 4 mostraron disminuciones considerables en todos los parámetros evaluados.

En la tabla 4 se presenta una segunda evaluación de las salidas de cinco biodigestores a escala, realizada tres semanas después de la primera valoración (Tabla 3). Los biodigestores 5 y 6 (Istarú II+Lirios), presentaron mayores valores de DBO y DQO y sólidos orgánicos en comparación con los otros biodigestores. Además se presentaron aumentos muy considerables en el DBO, DQO de los biodigestores sin lirios en comparación con el primer muestreo que se realizó. Al mismo tiempo, se destacó el biodigestor 6, el cual presentó una reducción significativa en el DBO, DQO y ST, pero el biodigestor 1, mostró aumentos en el DBO, DQO y ST y en las mismas circunstancias el biodigestor 5 donde se aumentó el DQO y ST, pero disminuyó DBO (anexos 7 y 8).

**Tabla 4.** Valoración de un segundo muestreo de los efluentes de cinco de los biodigestores a escala.

Parámetros	Valores Máximos admisibles	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
DBO (mg/l)	50	461±16	28,0± 1,0	22,0± 1,0	979± 86	733±109
DQO (mg/l)	150	685 ± 74	392 ± 66	196 ± 63	1660±163	1131± 77
Sólidos Totales (mg/l)	No aplica	1930,0±9,1	410,0±7,0	425,0±7,0	1991,0±9,2	1133,0±8,0
Sólidos Suspendidos (mg/l)	1	17,0±3,4	7,0±3,4	7,0 ± 3,4	23,5 ± 3,4	54,0±3,4
Sólidos Sedimentables (±0,05ml/L)	1,00	0,5	0,2	0,1	0,7	3
Sólidos Volátiles (mg/l)	No aplica	0,05	0,01	0,01	0,04	0,08

Elaborado con el programa Excel

#### **5.1.4. Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)**

Los biodigestores con entrada de agua del ITCR que no contenían lirios, revelaron altos valores de SAAM ( $16,00 \pm 0,05$ ) mg/l en comparación con los que contenían lirios ( $6,00 \pm 0,05$ ) mg/l. De la misma forma, la segunda entrada de Istarú (Istarú II) sin los lirios, presentó más sustancias activas que la entrada de Istarú II con lirios, con ( $13,00 \pm 0,05$ ) mg/l y ( $10,00 \pm 0,05$ ) mg/l, respectivamente. En el caso del efluente del Biodigestor 1 (ITCR+lirios) presentó valores similares a los anteriores, ya que mostró menos sustancias activas ( $10,00 \pm 0,05$ ) mg/l que el Biodigestor 4 (ITCR) sin lirios ( $12,00 \pm 0,05$ ) mg/l. Asimismo, los biodigestores del residencial Istarú presentaron situaciones semejantes, ya que el análisis SAAM fue más bajo en los Biodigestores 5 y 6 (alimentados con aguas más lirios) en comparación con el biodigestor 2, el cual contenía ( $4,00 \pm 0,05$ ) mg/l, ( $8,00 \pm 0,05$ ) mg/l y ( $12,00 \pm 0,05$ ) mg/l, respectivamente (apéndice 2).

#### **5.1.5. Análisis de Nutrientes**

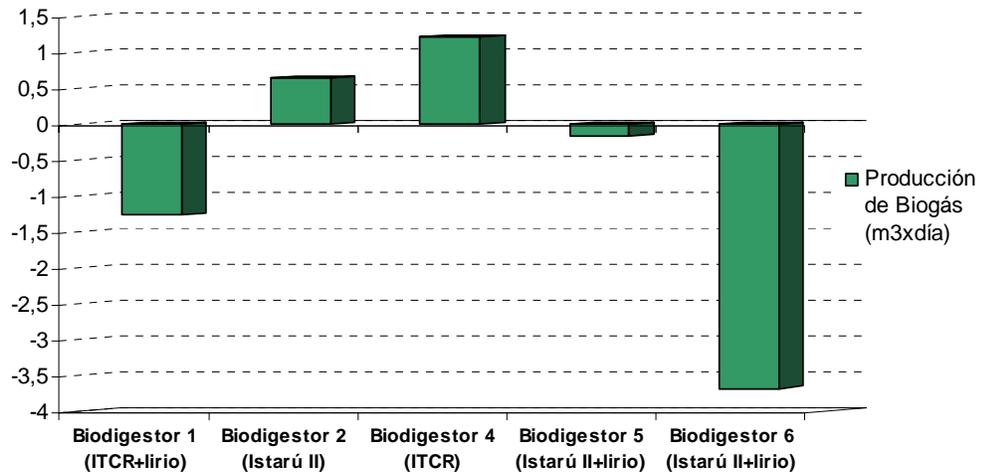
De acuerdo con los análisis realizados en el Laboratorio Químico de Control de Calidad Industrial AQYLASA, donde se evaluó la concentración de nitrógeno total, fósforo total y potasio tanto del influente sin lirios como del efluente del biodigestor 1, biodigestor 2, biodigestor 4 y del biodigestor 6. A la entrada del ITCR se presentó una gran concentración de nitrógeno total con ( $31,8 \pm 0,5$ ) mg/l y de potasio con ( $2032 \pm 100$ ) mg/l, pero hubo menor cantidad de fósforo total ( $25,0 \pm 0,7$ ) mg/l, en comparación con la segunda entrada de Istarú (Istarú II), la cual mostró resultados de ( $22,8 \pm 0,5$ ) mg/l de nitrógeno total, ( $1072 \pm 80$ ) mg/l de potasio, y ( $60,7 \pm 0,7$ ) mg/l de fósforo total.

La salida del biodigestor 1 presentó mayor concentración de nitrógeno total con  $(82,6 \pm 0,7)$  mg/l y menor cantidad de potasio con  $(193 \pm 20)$  mg/l en comparación con los otros tres biodigestores, además presentó  $(54,3 \pm 0,6)$  mg/l de fósforo total; con respecto al biodigestor 2 mostró  $(36,1 \pm 0,3)$  mg/l de nitrógeno total,  $(1266 \pm 16)$  mg/l de potasio y  $(32,7 \pm 0,3)$  mg/l de fósforo total; en cuanto al biodigestor 4, presentó menor concentración de nitrógeno total con  $(19,9 \pm 0,2)$  mg/l y de fósforo total con  $(28,4 \pm 0,4)$  mg/l en comparación con los biodigestores evaluados y adicionalmente presentó  $(1976 \pm 32)$  mg/l de potasio, asimismo el biodigestor 6 tuvo mayor cantidad de potasio que los demás biodigestores, con  $(13530 \pm 200)$  mg/l, además tuvo  $(70,3 \pm 0,7)$  mg/l de nitrógeno total y  $(72,0 \pm 0,6)$  mg/l de fósforo total.

## **5.2. Estimación de la Producción y la Calidad del Biogás**

### **5.2.1. Evaluación Teórica**

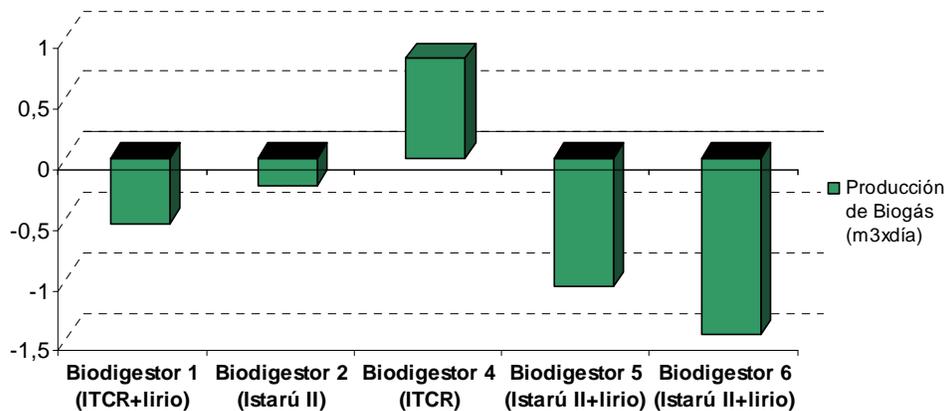
La evaluación teórica de la productividad de los biodigestores a escala del primer muestreo de los efluentes, mostró que el biodigestor 4 fue el que produjo más biogás  $(1,22 \text{ m}^3/\text{día})$  y también el biodigestor 2  $(0,65 \text{ m}^3/\text{día})$ , con respecto a los otros biodigestores a escala. Contrariamente, los biodigestores 1, 5 y 6 revelaron resultados negativos  $(-1,26 \text{ m}^3/\text{día})$ ,  $(-0,17 \text{ m}^3/\text{día})$  y  $(-3,68 \text{ m}^3/\text{día})$ , es decir que no presentaron una producción real de biogás (figura 9).



**Figura 9.** Producción de biogás por día del primer muestreo realizado a las salidas de cinco biodigestores a escala

Elaborado con el programa Excel

Con respecto al segundo muestreo se observó disminuciones en los biodigestores 2, 4 y 5 (-0,22 m<sup>3</sup>/día, 0,83 m<sup>3</sup>/día y -1,06 m<sup>3</sup>/día, consecutivamente), además se estimó que los biodigestores 1 y 6 continuaron con la inexistente producción real de biogás al seguir presentando valores negativos (el primero con -0,54 m<sup>3</sup>/día y el último con -1,46 m<sup>3</sup>/día) (figura 10).

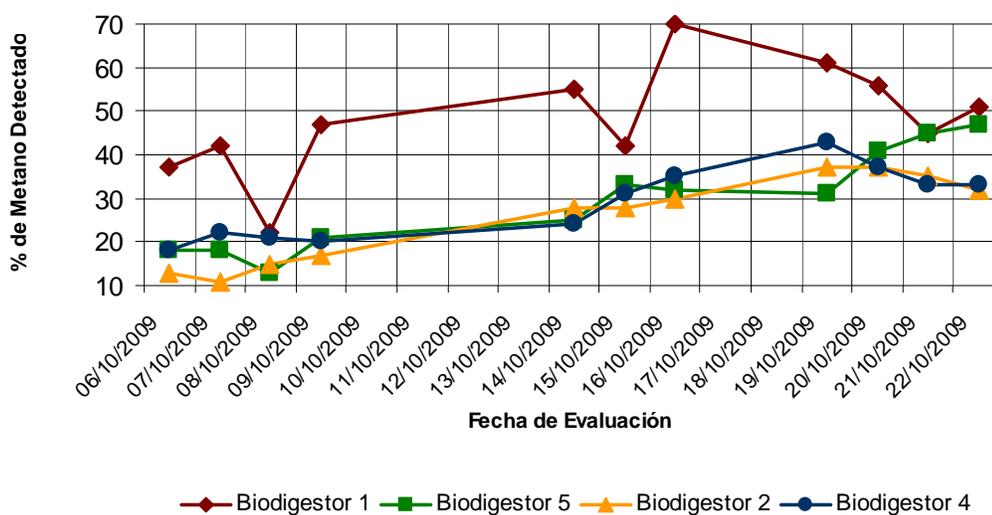


**Figura 10.** Producción de biogás por día, evaluando el segundo muestreo realizado a los efluentes de cinco biodigestores a escala.

Elaborado con el programa Excel

### 5.2.2. Medición del metano presente en el biogás

El Biodigestor 1 (ITCR+Lirios) presentó muchas variaciones sobre todo en las fechas del 8, 15 y 21 de octubre, ya que disminuyó considerablemente la obtención de metano. Además en los biodigestores 2 y 4 (Istarú II e ITCR), esa concentración aumentó conforme pasaba el tiempo de evaluación, e incluso en el biodigestor 5 hubo una producción inestable de CH<sub>4</sub> (figura 11).



**Figura 11.** Porcentaje de metano detectado en los biodigestores alimentados con distintas fuentes de aguas residuales sin lirios y con lirios, utilizando el detector de gases RECON/4. Elaborado con el programa Excel

Con respecto a la determinación de producción de metano mediante el análisis químico de gases, por cromatografía, elaborado por el Laboratorio LAQAT solo al biodigestor 6, dio como resultado un porcentaje de metano de  $14,5 \pm 0,1$  m/v, con una concentración de  $96 \pm 0,1$  g/m<sup>3</sup>.

## 6. DISCUSIÓN

---

El primer objetivo específico de esta investigación fue medir semanalmente la temperatura y el pH tanto del influente como del efluente, observándose disminuciones constantes de temperatura a las entradas de los biodigestores como se aprecia en la figura 5, esto debido a las condiciones ambientales externas, ya que en el ITCR, según el Instituto Meteorológico Nacional a partir del mes octubre se disminuye la temperatura media de 19,2°C., provocando una mala digestión anaerobia, ya que según Jarauta (2005), La biodigestión es posible de forma satisfactoria cuando la media de la temperatura anual está por encima de los 20 °C.

Además, el diseño de los biodigestores, construidos sobre una estructura de cemento y con gran exposición al clima frío característico de la provincia de Cartago, contribuyó a las reducciones de temperatura durante el periodo de evaluación, implicando la posible inhibición de la formación de biogás en los biodigestores a escala, ya que según Guevara (1996), la temperatura afecta tanto el tiempo de retención para la digestión como a la degradación del material dentro del digester, afectando así la producción de biogás.

En cuanto a las salidas, la temperatura se tomó con el propósito de ver el funcionamiento interno del biodigestor, ya que dentro del reactor se debe encontrar en el rango tolerado por los diferentes microorganismos (20-55°C), por lo que de acuerdo con la figura 6, la temperatura fue disminuyendo, esto se debió a la falta de movilidad interna del biodigestor, ya que según Dominguez y Ly (2005), la falta de actividad microbiana, puede ser un indicador de las bajas temperaturas, ya que además de retardar la producción de metano, produce la acumulación de grandes ácidos, provocando fallas en el reactor biológico, sobretodo en este parámetro, ya que normalmente las velocidades de las reacciones químicas y bioquímicas, se incrementan usualmente cuando se eleva la temperatura, creando un microclima cálido interno en los biodigestores para la generación de las bacterias metanogénicas, pero en este caso se presentaron bajas temperaturas, provocando baja producción de metano sobre todo en el biodigestor 6 con 14,5% m/v. También otra causa de las bajas temperaturas internas, se debe a los defectos del diseño de los estos biodigestores a escala, tema que se profundizará más adelante, ya que la temperatura, es uno de los factores más importantes para la obtención del biogás.

En cuanto al pH del influente como otro de los factores críticos para que se pueda dar correctamente la biodigestión, como se presenta en la figura 7, éste se mantuvo dentro del rango aceptable ( $7,46 \pm 0,31$ ), ya que según Osorio y colaboradores (2007), lo ideal es que el pH oscile entre 7 y 8, pero también en operaciones correctas podría estar entre 6,5 y 7,5.

Por otra parte, el pH a la salida de los biodigestores, no se mantuvo entre los rangos óptimos para la biodigestión que se mencionaron anteriormente ( $6,68 \pm 0,41$ ), ya que según Jarauta, (2005), un aumento de la carga con materia orgánica disuelta, se desequilibran las tres etapas, pero aumentan considerablemente la presencia de ácidos volátiles, y por lo tanto se incrementa la producción de gas y el pH se reduce. Además cuando la temperatura óptima de  $35^{\circ}\text{C}$  cae numerosas veces o por un tiempo prolongado, esto puede conducir a un desbalance en la proporción de los microorganismos y en última instancia a problemas de bajo pH (Soria *et al.*, 2001).

Otro de los objetivos de esta investigación fue la medición de parámetros químicos a la entrada y salida de los biodigestores a escala. Como resultado se observó en la tabla 2 un aumento de la DBO, DQO y todos los sólidos orgánicos de las entradas de los biodigestores a escala que contenían lirios, lo cual se debe a que posiblemente la cantidad de material vegetal triturado que se agregó a cada biodigestor a escala fue excesiva para la capacidad de degradación de los mismos. Según Hilbert (2002), las sustancias con alto contenido de lignina en este caso no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles para transformarlas en incrustaciones de lignina, ya que así son aprovechables para los microorganismos, por lo que, para contrarrestar el efecto del exceso de lirio y de la falta de movilidad interna, se debió aumentar el tiempo de retención con respecto al de los biodigestores a escala sin lirios.

Por otra parte, el porcentaje de los sólidos totales de la entrada del ITCR+Lirios ( $0,46\% \text{m/v}$ ) aumentó en  $187,5\%$  en comparación con la entrada del ITCR sin lirios ( $0,16\% \text{m/v}$ ), ya que se acumuló mayor cantidad de material orgánico en el interior del biodigestor a escala. En el caso de la entrada de agua del residencial Istarú II ( $0,06\% \text{m/v}$ ), el porcentaje de sólidos totales aumentó en un  $4100\%$  al agregarle esta planta acuática ( $2,52\% \text{m/v}$  de ST).

Con respecto a las salidas de los biodigestores a escala a los cuales se les agregó lirios, se presentó en la tabla 3 un aumento considerable en la DBO y la DQO en comparación con los influentes, lo que indicó una alta incidencia microbiana, ya que según Okafor (2007), el DBO representa el valor total de la respiración de los organismos presentes en los biodigestores y en estudios realizados por otros autores como Soria y colaboradores (2001), resaltan que los DQO altos revelan la existencia de cargas importantes de componentes orgánicos que no son degradados biológicamente, representando aguas altamente contaminadas. Asimismo, el mezclado y el tipo de sustrato de la carga están ligados directamente con el tiempo de retención tanto de líquidos como de sólidos. Por lo que generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retienen moléculas resistentes como la celulosa, las cuales demandan mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. Debido a la continua salida de efluente de los biodigestores a escala la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas fue baja, ya que se expulsaron una determinada cantidad de bacterias que se encontraban en el líquido y esta extracción debió ser compensada por la multiplicación de las bacterias que permanecían dentro del reactor, por lo que se dio la putrefacción de la materia orgánica y una incorrecta biosíntesis.

Además, estos biodigestores a escala con lirios, no poseían un buen funcionamiento como plantas de tratamiento, ya que los parámetros físico-químicos no cumplieron con los valores admisibles por el reglamento de vertido y reuso de aguas residuales, por lo que se recomienda realizar tratamientos previos como el compostaje de los lirios o la incorporación de lodos activos para aumentar los microorganismos, para degradar más la lignina y la celulosa, de modo que se promueva una adecuada biodigestión.

Por el contrario, la reducción de los contaminantes en las salidas de los biodigestores 2 y 4, los cuales no contenían lirios, fue considerable ya que se disminuyeron los parámetros de DBO, DQO y ST, con respecto a las entradas, mostrando el cumplimiento con algunos valores admisibles por el reglamento de vertido de aguas.

En cuanto al segundo muestreo (tabla 4), los biodigestores 5 y 6 aumentaron sus parámetros, ya que también poseían lirios y estos al tener mucha materia orgánica acumulada y sin movilización interna, provocaron un incremento del tiempo de retención necesario para degradar dicha materia orgánica. Según Osorio y colaboradores (2007), cuando el pH está cercano a la neutralidad y a altas temperaturas, las mezclas establecen su propio balance y no presentan cambios sustanciales. Sin embargo, como esta capacidad de autorregulación de la mezcla se destruyó, al no haber movilización interna y al no haber adecuadas temperaturas, el pH cayó, lo que incidió un mal funcionamiento de estos biodigestores a escala, ocasionando la producción de malos olores, la reducción de la calidad de los sólidos y líquidos y la disminución en la síntesis de metano.

Sin embargo, los valores de las pruebas de detergentes (SAAM) se redujeron al agregarle lirios acuáticos, esto debido a que se ha demostrado que esta planta posee un valor purificador de aguas residuales, ya que según Hidalgo y colaboradores (2005), las plantas acuáticas remueven sustancias orgánicas así como metales pesados, al retenerlos en sus tejidos, por la formación de complejos entre el elemento químico metálico y los aminoácidos presentes en la célula. Al comparar el efluente con el influente de todos los biodigestores a escala, se observó una reducción en la cantidad de detergentes, con excepción del biodigestor 1 que presentó un aumento, posiblemente debido a la falta de movilidad interna, lo cual impidió que se potenciara el efecto benéfico de los lirios. No obstante, ninguno de los biodigestores a escala cumplió con lo estipulado en el reglamento de uso y vertido de aguas que rige en nuestro país.

Esta prueba mide la cantidad de detergentes y sus valores varían según la naturaleza de las aguas residuales, por lo tanto la presencia de detergentes causó una función inhibitoria en la producción de biogás, ya que según Hilbert (2002) destruyen las bacterias metanogénicas. La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo.

Los análisis de nutrientes son ensayos donde se comprueba el valor nutritivo del efluente para su uso como abono orgánico, por consiguiente, los biodigestores a escala que presentaron altas concentraciones de estos fueron a los que se les hizo una alimentación con lirios acuáticos, ya que estos poseen una fuente muy rica de nitrógeno, potasio y fósforo, junto a los iones calcio, magnesio, hierro, amonio, nitrito, sulfato, cloro, fosfato y carbonato. De igual forma las investigación realizadas por Garcés *et al.*, (2006), a diferentes plantas acuáticas para caracterizarlas como un sistema de descontaminación de aguas residuales, son considerados como macronutrientes de importancia en la fertilización de suelos para potencial agrícola. Al mismo tiempo, este tipo de plantas trituradas presentan altos contenidos de nitrógeno, ya que constituyen un beneficio como materia prima para preparar abonos orgánicos y con una gran capacidad como alimento para dietas de consumo animal, por su alto contenido de proteína cruda y por su gran digestibilidad. Sin embargo, según Osorio y colaboradores (2007) una producción alta de Nitrógeno orgánico en el influente, puede provocar inhibición del proceso biológico y aumentar moderadamente la presencia de ácidos volátiles, pero disminuyendo considerablemente la producción de gas y reduciendo el pH lentamente.

El último objetivo específico de esta investigación, fue estimar la producción y calidad del biogás. Como resultado, se realizó una valoración teórica de la producción de biogás, lo cual estimó la ineficiencia de los biodigestores a escala a los que se les adicionó lirios, con una inexistente producción real de biogás, ya que reportaron valores negativos (figura 9). Además, demostró la poca productividad de biogás que se generaba por día en los biodigestores 2 y 4. Sin embargo después de tres semanas se presentaron reducciones significativas de productividad, manifestando el mal funcionamiento de la biosíntesis y de la inestabilidad de los biodigestores a escala (figura 10), ya que según Umaña (1985), esta fórmula indica una aproximación de la cantidad de gas que se genera por día, además se utiliza también en ambientes tropicales cuando el biodigestor no tiene un sistema de medición de gas.

En el caso de la medición de metano con el detector de gases (figura 11), como los biodigestores 1 y 4 presentaron un comportamiento muy variable, aún antes de realizar la adición de lirios al biodigestor 1, siendo éste último el que parece producir más metano, pero a la vez el que presenta un comportamiento más fluctuante en cuanto a la producción del mismo. Lo anterior podría sugerir una inestabilidad interna del biodigestor, debido a que no tuvo una temperatura interna adecuada y a la falta de movilización de los microorganismos para que se dieran mezclas uniformes y se activaran las bacterias metanogénicas (Weiss, *et al.*, 2009). Igualmente, se observó que luego de adicionar los lirios acuáticos triturados en el biodigestor 1 hubo una disminución en la cantidad de metano reportado por casi quince días y luego se dio un aumento abrupto, lo que demostró que después de un periodo de retención con el agua y los lirios, éstos fueron asimilados por las bacterias; aumentando la capacidad de degradación de la materia orgánica y por lo tanto, la producción de metano.

La urbanización Istarú mostró una similitud en cuanto al incremento progresivo de la generación de metano, que era de esperarse debido a la alimentación continua de los biodigestores. Al pasar el tiempo esto generó un aumento en la producción, hasta que se alcanzó el límite cuando las bacterias metanogénicas se encontraron en las condiciones óptimas de degradación. Igualmente, se evidenció como la inoculación con lirios hizo que tan sólo una semana después se presentara un aumento sostenido en la producción de metano. En el biodigestor al que no se le agregó lirios, fue evidente una disminución en la producción antes de que ocurriera el aumento; el cual no fue tan considerable como con el biodigestor inoculado con lirios.

Además, la falta de productividad de los biodigestores a escala, se le puede atribuir a que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción del biogás. Los objetivos de la agitación, son la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica. También el proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implica una baja actividad biológica y por ende una reducción en la producción de gas. Por lo que se recomiendan varios mecanismos de agitación utilizados desde los más simples que consisten en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de los líquidos hasta sofisticados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas (Hilbert, 2002).

El diseño de los biodigestores a escala no fue el adecuado, ya que al ser construidos sobre una estructura de cemento y de forma cilíndrica, en lugar de la forma tubular característica de los biodigestores de tipo Taiwán, no se logró el aislamiento térmico, ni tampoco la movilidad interna, esto también debido a que los biodigestores son muy pequeños por lo que, el biogás se expande libremente hasta llenar el recipiente que los contiene, y su densidad es mucho menor que la de los líquidos y sólidos. Por esta razón el modelo cilíndrico trabaja a bajas presiones, pero al estar en esa estructura de cemento generó mucha presión provocando posible escape del poco biogás producido. De la misma forma, en éste modelo de biodigestores según Hilbert (2002), el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida, en este caso aproximadamente 8L. Esto para mantener constante el volumen del sustrato en la cámara de digestión.

Debido a la incapacidad de poder determinar la composición real de biogás de los biodigestores por medio del analizador de gases, se decidió que lo más recomendable era realizar análisis de cromatografía de gases para evaluar el porcentaje de metano presente en uno de los biodigestores (biodigestor 6). Estos análisis revelaron una baja concentración de metano (14, 5%) esto debido a todas las variantes en los parámetros anteriormente evaluados, incluyendo la presencia de inhibidores como fue el caso del potasio (K) y el nitrógeno (N), los cuales superaron las concentraciones inhibitorias (2500-4500 mg/l y 25 mg/l, respectivamente) (anexo 2), según Hilbert (2002), sin mencionar la presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes que en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo.

Como resultado, en un biodigestor la producción de biogás es un proceso continuo que aumenta y disminuye, minuto a minuto, debido a factores tales como la temperatura ambiental, tipo de biodigestor, variabilidad de alimentación (cantidad y calidad), días de retención y utilización de agua de lavado, entre otros (Viquez, 2009).

## 7. CONCLUSIONES

---

Este trabajo demostró la posibilidad de utilizar las técnicas biotecnológicas para la de remoción de cargas contaminantes que son expresadas en términos de DBO y DQO y sobre todo para reducir la cantidad de detergentes presentes, utilizando lirios como fuente extra de carbono, ya que por su fisiología tienen la capacidad de reducir sustancias metálicas tóxicas a pequeñas concentraciones. Sin embargo, en la digestión anaeróbica las condiciones climáticas externas afectan las aguas residuales que se introducen al biodigestor y el proceso interno microbiano que ocurre dentro de los biodigestores, lo cual reduce la producción y la calidad del biogás.

La digestión anaeróbica se tiene que complementar con tratamientos previos para darle un buen manejo a los desechos. Por consiguiente, los biodigestores a escala del ITCR como únicos sistemas de tratamiento de aguas residuales, no están cumpliendo con los rangos admisibles por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas residuales, por lo que no hay una buena actividad de los microorganismos descomponedores de la carga orgánica.

Los lirios acuáticos aumentaron el contenido de nutrientes (N, P, K) del efluente de los biodigestores a escala, lo que indica su potencial como bioabono.

La baja productividad de los biodigestores a escala se debió al mal diseño del modelo Taiwán, a la baja temperatura interna, a la falta de movilidad dentro del reactor y a la presencia de inhibidores del proceso fermentativo, ya que se da la presencia de detergentes y de altas concentraciones de nitrógeno, los cuales destruyen las bacterias metanogénicas.

## 8. RECOMENDACIONES

---

Es muy importante tomar en cuenta que la descarga de las aguas residuales en los ríos, y otras aguas de superficie naturales sean tratadas, porque si en las aguas residuales se descarga agua natural rica en materia orgánica degradable, originará una cascada de reacciones, en donde una gran cantidad de los microorganismos aerobios se sintetizarán y descompondrán esa materia orgánica. Esto aumentará el consumo de oxígeno y por consiguiente, los peces y demás vida acuática desaparecerán, ocasionando que las bacterias anaerobias se desarrollen, y causen olores desagradables.

Por lo tanto, se recomienda volver a reestructurar bien el diseño de los biodigestores a escala, ya que la alimentación es incómoda de realizar y sobre todo la toma de muestras del efluente para los diferentes análisis químicos es muy difícil, especialmente para el análisis de la temperatura y pH interno.

Igualmente, utilizar un diseño tubular, ya que el modelo de esta investigación por ser alto y angosto, cuando se produce biogás se genera mucha presión expandiéndose hacia los lados, lo que podría originar fugas en el biodigestor al estar en ese tipo de estructura de concreto a su alrededor, el cual impide que se expanda adecuadamente.

Se considera necesario movilizar la materia orgánica interna constantemente, ya que las bacterias necesitan estar en contacto uniforme con la materia para así aumentar el rendimiento de producción de biogás.

Además se recomienda realizar tratamientos previos, a los lodos triturados, como el compostaje, ya que se pudren muy rápido y no pueden ser aprovechados por los microorganismos responsables de la biodigestión,

Al mismo tiempo, es importante continuar con estudios previos del efluente para evaluar la eficiencia del efluente para la producción de bioabono.

Por otro lado, se debe evaluar con mucho más detalle la composición del biogás.

Finalmente, se aconseja realizar más estudios de productividad con los sustratos, es decir, todos los análisis químicos a las entradas antes de tomar las decisiones de alimentar el biodigestor, ya que se puede estar sobrecargando de materia orgánica, lo que podría causar una inestabilidad en el proceso anaeróbico, e incluso podría haber falta de sólidos y esto afectaría los tiempos de retención, por lo que si son tiempos largos de retención se obtendría un rendimiento bajo de biogás, pero con un efluente más degradado y con excelentes características como fuente de nutrimentos (Soria *et al.*, 2001).

## 9. BIBLIOGRAFÍA

---

Androvetto, E. 2003. Diseño y Operación e Un Modelo para el Tratamiento de las Aguas Residuales Provenientes de la Granja Porcina de La Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de San Carlos de Guatemala. (en línea). Consultado 26 feb, 2009. Disponible en: <<http://bvsde.per.paho.org/bvsaar/fulltext/andro.pdf>>

Bidlingmaier, W. 2006. Fifth ORBIT Conference Probes Anaerobic Digestion. BioCycle Journal of Composting & Organics Recycling, 47(9): 42-49.

Botero, R. 2009. Biogás a bajo costo en Costa Rica. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). (en línea). Consultado 23 feb, 2009. Disponible en: <[http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/forums/newsid\\_7937000/7937917.stm#>](http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/forums/newsid_7937000/7937917.stm#>)

Campero, O. 2007. Biogás en Bolivia: Programa Viviendas Autoenergéticas. Bolivia. (en línea). Publicado en Revista Futuros. 5(18): 1-12. Consultado 02, mar, 2009. Disponible en: <[http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/biogás\\_bolivia.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/biogás_bolivia.pdf)>

Castillo, J. 1990. El uso del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) en el Tratamiento de aguas residuales. Tecnología en Marca. 10(3): 23-28.

Castillo, J. 2001. Uso de Biodigestores en el Tratamiento de Desechos Orgánicos. Revista Energía, San José, Costa Rica, no.35: 9-12.

Celis, J; Junod, J; Sandoval, M. 2005. Resientes Aplicaciones de las Depuraciones de Aguas Residuales con plantas Acuaticas. Theoria. 14(01): 17-25.

- Clesceri, L; Eaton, A; Greenberg, A; Rice, E. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Waste war. 21 ed, USA: ADHA, AWWA y WWEE, American Public, Health, Association. 2p-59p, 5p-14p.
- Coto, J; Maldonado, J; Botero, R; Murillo, J. 2005. Implementación de un Sistema para Generar Electricidad a partir de Biogás en la Earth. (en línea).Tierra Tropical. 3 (2): 129-138 (Trabajo de Graduación. Universidad EARTH). Consultado 19 dic, 2009. Disponible en: <[http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/50\\_v3.2-01\\_CotoMaldonado.pdf](http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/50_v3.2-01_CotoMaldonado.pdf)>
- Dias, E; Kreling, J; Botero, R; Murillo J. 2007. Evaluación de la Productividad y del efluente de Biodigestores Suplementados con Grasas Residuales. Tierra Tropical. 3 (2): 149-160.
- Domínguez, P & Ly, J. 2005. Sistemas integrados de producción con no rumiantes. Biodigestores como Componentes de Sistemas Agropecuarios Integrados. Venezuela. (en línea). Consultado el: 27 feb, 2009. Disponible en: <[http://avpa.ula.ve/eventos/viii\\_encuentro\\_monogastricos/sistemas\\_integrados/conferencia-6.pdf](http://avpa.ula.ve/eventos/viii_encuentro_monogastricos/sistemas_integrados/conferencia-6.pdf)>
- Garcés, K; Gutiérrez, R; Kohlmann, B; Yeomans, J; Botero, R. 2006. Caracterización del Sistema de Descontaminación Productivo de Aguas Servidas en la Finca Pecuaria Integrada de la Universidad Earth: I. Las Plantas Acuáticas. Tierra Tropical 2 (2): 129-140.
- Guevara, A. (1996). Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.Perú. (en línea). Consultado el: 24 feb, 2009. Disponible en: <<http://bvsde.per.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>>

Hilbert, J. 2002. Manual para la Producción de Biogás. Instituto de Ingeniería Rural Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. Consultado 09 dic, 2009. Disponible en: <<http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/Manual%20para%20la%20produccion%20de%20biogas%20del%20IIR.pdf>>

Instituto Meteorológico Nacional (INM). Costa Rica. 2008. Datos Climático. Consultado 22 dic, 2009. Disponible en: <[http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?\\_\\_EVENTTARGET=ClimaCiudad&CIUDAD=10](http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?__EVENTTARGET=ClimaCiudad&CIUDAD=10)>

Jarauta, L. 2005. Digestión Anaerobia para el Tratamiento de Residuos Orgánicos: Estudio de las Necesidades para la Implantación En Perú. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Química. (en línea). Consultado 27 feb, 2009. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2716?locale=es>>

Madigan, J; Martinko, M ; Parker, J. 2004. Biología de los Microorganismos. Crecimiento Microbiano. La Diversidad procariótica: Bacteria y Archaea. Habitat Microbiano, Ciclos de Nutrientes e Interacciones con Plantas y animales. Tratamientos de Aguas Residuales. Trads. Gacto, F; *et al.* Madrid, España. 10 ed. Editorial Pearson Educación S.A. 152p-165p, 635p- 650p, 927p- 934p.

Okafor, N. 2007. Modern Industrial Microbiology and Biotechnology. Treatment of Wastes in Industry. Clemson, Carolina del Sur. Estados Unidos. Science Publishers. 505p-527p.

Osorio, J; Ciro, H; Gonzáles, H. 2007. Evaluación de un Sistema de Biodigestión en Serie para Clima Frío. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. 60(2): 4145-4162

- Quesada, R; Salas, N; Arguedas, M; Botero, R. 2007. Generación de Energía Eléctrica a Partir de Biogás (en línea). Tierra Tropical. (2): 139-147. Consultado 24 feb, 2009. Disponible en: <[http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/51\\_v3.2-02\\_QuesadaSalas.pdf](http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/51_v3.2-02_QuesadaSalas.pdf) >
- Ramalho, R. 1996. Tratamiento de Aguas Residuales. 1ª ed. Barcelona, España. Editorial Reveté, S. A. 19p-34p.
- Sosa, R; Chao; R; Del Río, J. 1999. Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos del Tratamiento de Residuales Agrícolas con Producción de Biogás. (en línea). Revista Computadorizada de Producción Porcina. 6(2): 5-19 (Instituto de Investigaciones Porcinas. La Habana, Cuba). Consultado 14 dic, 2009. Disponible en: <<http://www.iip.co.cu/RCP/RCPP%206.2%20OK.pdf#page=6>>
- Soria, M; *et al.* 2001. Producción de Biofertilizantes Mediante Biodigestión de Excreta Líquida de Cerdo. (en línea) TERRA. 19(4): 354-361. Consultado 17 set, 2009. Disponible en:<<http://www.aqualimpia.com/PDF/Biogás%20estiercol%20de%20cerdo.pdf>>
- Umaña, A. 1985. Diseño y construcción de biodigestores. Tratamiento anaeróbico de desechos agroindustriales: factibilidad técnica y beneficios ambientales. 2 ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 57p-77p.
- Viquez, J. 2009. Biogás: Energía Recuperable. Análisis Energético y Económico de su Potencial en Fincas Lecheras. Revista ECAG. No 50. 24-27.
- Weiss, A; *et al.* 2009. Investigation of Factors Influencing Biogás Production in A Large-Scale Thermophilic Municipal Biogás Plant. Applied Microbiology and Biotechnology. Springer Berlin / Heidelberg. 84(5): 987-1001.

## 10. APÉNDICES

---

### 10.1. Apéndice 1. Figura representativa del cono Imhoff.



Fuente: Laboratorio CEQIATEC, 2009

### 10.2. Apéndice 2. Análisis de sustancias activas al azul de metileno tanto al influente del biodigestor como al efluente.

Muestra	SAAM ( $\pm 0,05$ mg/l)
Entrada ITCR	16,00
Entrada Istarú	26,00
Entrada Istarú II	13,00
Entrada ITCR+lirios	6,00
Entrada Istarú+ lirios	10,00
<b>ITCR</b>	
Salida Biodigestor 1	10,00
Salida Biodigestor 4	12,00
<b>Istarú II</b>	
Salida Biodigestor 2	12,00
Salida Biodigestor 5	4,00
Salida Biodigestor 6	8,00

Fuente: Datos de Laboratorio del CEQIATEC, 2009

## 11. ANEXOS

---

### 11.1. Anexo 1. Composición Química del Biogás

COMPONENTE	DEMANDA QUIMICA	% APROXIMADO
Metano	CH <sub>4</sub>	60 – 70
Gas carbónico	CO <sub>2</sub>	30 – 40
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1
Acido sulfúrico	H <sub>2</sub> S	0,1

**Fuente:** Androvetto, 2003.

### 11.2. Anexo 2. Concentraciones de los Inhibidores del Proceso Fermentativo.

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO <sub>4</sub>	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	
Na	20-40 mg/l
K	3.500-5.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	2.500-4.500 mg/l
	1.000-1.500 mg/l

**Fuente:** Hilbert, 2002.

**11.3. Anexo 3.** Informe del CEQIATEC de los resultados de los análisis químicos de la entrada del ITCR y de la primera entrada de Istarú.



**FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC )**  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

**TEC**  
**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)**  
☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL		<b>FECHA DE RECIBO:</b> 31-08-09
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA		<b>FECHA INICIO ANÁLISIS:</b> 01-09-09
<b>PROCEDENCIA:</b> PLANTA DE TRATAMIENTO- I.T.C.R.		<b>FECHA DE INFORME:</b> 17-12-09
		<b>Nº DE INFORME:</b> 1360809
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN		
ANÁLISIS	RESULTADOS	
	01	02
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(494 ± 41)	(400 ± 37)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(176 ± 16)	(246 ± 16)
Sólidos Suspendedos totales (mg/L) * -	(245 ± 34)	(550 ± 34)
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	( 10,1 ± 0,05)	(25,1 ± 0,05)
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	7,30	7,16
Temperatura (± 0,1°C) *	23,2	23,2
Sustancias Activas al azul de metileno (mg/L) **	(16,00 ± 0,05)	(26,00 ± 0,05)
-----Ultima línea-----		

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Biodigestor planta ITCR  
**Muestra 02:** biodigestor plante IZTARU  
**ND:** No detectable

Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.  
 (±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Prohibida su reproducción  
 Página 1 de 2  
 # Informe 1360809

Uso exclusivo TEC



Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:** *Noemy Quiros B.*  
B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 1360809

Uso exclusivo TEC

**11.4. Anexo 4.** Informe del CEQIATEC del resultado del análisis químico de la segunda entrada de la urbanización Istarú (Istarú II).



**FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC)**  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

**TEC**  
CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)  
☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	AGUA RESIDUAL	<b>FECHA DE RECIBO:</b>	18-09-09
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b>	LIQUIDA	<b>FECHA INICIO ANÁLISIS</b>	23-09-09
<b>PROCEDENCIA:</b>	PLANTA DE TRATAMIENTO- IZTARU.	<b>FECHA DE INFORME:</b>	17-12-09
		<b>Nº DE INFORME:</b>	760909
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN			
<b>ANALISIS</b>	<b>RESULTADOS</b>		
	<b>01</b>		
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(312 ± 16)		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(166,0 ± 2,0)		
Sólidos Suspendidos totales (mg/L) * ~	(125,0 ± 7,0)		
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	( 4,5 ± 7,0)		
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	7,04		
Temperatura (± 0,1°C) *	23,5		
Sustancias Activas al Azul de Metileno ( mg/L) **	(13,00 ± 0,05)		
-----Ultima línea-----			

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Entrada al Sistema planta de tratamiento Iztaru  
Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.  
(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Prohibida su reproducción  
Página 1 de 2  
# Informe 760909

Uso exclusivo TEC



Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:** *Noemy Quiros B.*  
B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 760909

Uso exclusivo TEC

**11.5. Anexo 5.** Informe del CEQIATEC de los resultados de los análisis químicos de las salidas de los biodigestores 1, 2 y 4.



FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC)  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)  
☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	AGUA RESIDUAL	<b>FECHA DE RECIBO:</b>	10-11-09
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b>	LIQUIDA	<b>FECHA INICIO ANÁLISIS</b>	12-11-09
<b>PROCEDENCIA:</b>	BIODIGESTORES A ESCALA TEC .	<b>FECHA DE INFORME:</b>	17-12-09
		<b>Nº DE INFORME:</b>	381109
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN			
ANALISIS	RESULTADOS		
	01	02	03
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(960 ± 58)	(78,3 ± 8,0)	(59,0 ± 7,1)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(447 ± 16)	(28,0 ± 1,1)	(21,0 ± 1,0)
Sólidos Suspendidos totales (mg/L) * -	(33,5 ± 34)	(8,0 ± 3,4)	(7,0 ± 3,4)
Sólidos totales (mg/L) **	(1515,0 ± 8,4)	(325,0 ± 7,0)	(315,0 ± 7,0)
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	(1,00 ± 0,05)	(0,10 ± 0,05)	(0,20 ± 0,05)
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	6,13	7,08	6,98
Temperatura (± 0,1°C) *	20,0	20,0	20,5
Sustancias Activas al Azul de metileno (mg/L) **	(10,0 ± 0,05)	(12,00 ± 0,05)	(12,00 ± 0,05)
-----Ultima línea-----			

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Salida del biodigestor # 1 planta de tratamiento ITCR

**Muestra 02:** Salida del biodigestor # 2 planta de tratamiento ITCR

**Muestra 03:** Salida del biodigestor # 4 planta de tratamiento IZTARU

Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.



TEC

(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:**

*Noemy Quiros B*  
B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 381109

Uso exclusivo TEC

**11.6. Anexo 6.** Informe del CEQIATEC de los resultados de los análisis químicos de las entradas del ITCR y de Istarú II con lirios acuáticos y de la salida del biodigestor 5.



FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC )  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

TEC

CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)

☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.

Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	AGUA RESIDUAL	<b>FECHA DE RECIBO:</b>	17-11-09
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b>	LIQUIDA	<b>FECHA INICIO ANÁLISIS</b>	18-11-09
<b>PROCEDENCIA:</b>	BIODIGESTORES A ESCALA TEC .	<b>FECHA DE INFORME:</b>	17-12-09
		<b>Nº DE INFORME:</b>	651109
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN			
ANALISIS	RESULTADOS		
	01	02	03
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(480 ± 67)	(576 ± 67)	(960 ± 80)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(208 ± 81)	(176 ± 81)	(641 ± 163)
Sólidos Suspendidos totales (mg/L) *	(250 ± 34)	(570 ± 34)	(40,5 ± 3,4)
Sólidos totales (mg/L) **	(4647 ± 14)	(25181 ± 24)	(1191,0 ± 9,0)
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	300	350	0,5
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	7,58	7,88	6,19
Temperatura (± 0,1°C) *	20,0	20,0	19,0
Sustancias Activas al Azul de metileno (mg/L) **	(6,00 ± 0,05)	(10,00 ± 0,05)	(4,00 ± 0,05)
-----Ultima línea-----			

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Entrada al Sistema planta de tratamiento ITCR

**Muestra 02:** Entrada al Sistema planta de tratamiento IZTARU

**Muestra 03:** Salida 5 del Biodigestor

Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.

Prohibida su reproducción

Página 1 de 2

# Informe 651109

Uso exclusivo TEC



TEC

(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:**

*Noemy Quiros B.*

**B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO**



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 651109

Uso exclusivo TEC

**11.7. Anexo 7.** Informe del CEQIATEC de los resultados de los análisis químicos del segundo muestreo a las salidas de los biodigestores 1, 2, 4 y 5.



**FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC )**  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)**  
☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL	<b>FECHA DE RECIBO:</b> 01-12-09			
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA	<b>FECHA INICIO ANÁLISIS:</b> 02-12-09			
<b>PROCEDENCIA:</b> SALIDA DEL BIODIGESTOR	<b>FECHA DE INFORME:</b> 17-12-09			
	<b>N° DE INFORME:</b> 081209			
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN				
ANÁLISIS	RESULTADOS			
	01	02	03	04
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(685 ± 74)	(392 ± 66)	(196 ± 63)	(1660 ± 163)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(461 ± 16)	(28,0 ± 1,0)	(22,0 ± 1,0)	(979 ± 86)
Sólidos Suspendidos totales (mg/L) *	(17,0 ± 3,4)	(7,0 ± 3,4)	(7,0 ± 3,4)	(23,5 ± 3,4)
Sólidos totales (mg/L) **	(1930,0 ± 9,1)	(410,0 ± 7,0)	(425,0 ± 7,0)	(1991,0 ± 9,2)
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	(0,50 ± 0,05)	(0,20 ± 0,05)	(0,10 ± 0,05)	(0,70 ± 0,05)
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	6,42	7,06	6,96	6,31
Temperatura (± 0,1°C) *	19,0	19,0	19,0	19,0
-----Ultima línea-----				

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Il muestreo salida biodigestor 1  
**Muestra 02:** Il muestreo salida biodigestor 2  
**Muestra 03:** Il muestreo salida biodigestor 4  
**Muestra 04:** Il muestreo salida biodigestor 5  
 Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.

Prohibida su reproducción  
 Página 1 de 2  
 # Informe 081209

Uso exclusivo TEC



TEC

(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:**

*Noemy Quiros B.*  
B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 081209

Uso exclusivo TEC

**11.8. Anexo 8.** Informe del CEQIATEC del resultado del análisis químico del segundo muestreo de la salida al biodigestores 6.



**FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC )**  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

**TEC**  
CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)  
☎ (506) 591-5149 ó 550-2368, Fax: (506) 591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: [ceqiatec@itcr.ac.cr](mailto:ceqiatec@itcr.ac.cr)

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO**

<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	AGUA RESIDUAL	<b>FECHA DE RECIBO:</b>	24-11-09
<b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b>	LIQUIDA	<b>FECHA INICIO ANÁLISIS</b>	27-11-09
<b>PROCEDENCIA:</b>	PLANTA DE TRATAMIENTO- I.T.C.R.	<b>FECHA DE INFORME:</b>	17-12-09
		<b>Nº DE INFORME:</b>	971109

**OBJETIVO DEL ANÁLISIS:**  CONTROL     EVALUACIÓN

ANÁLISIS	RESULTADOS
	01
Demanda Química de Oxígeno (mg/L) *	(1131 ± 77)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(733 ± 109)
Sólidos Suspendidos totales (mg/L) * ~	(54,0 ± 3,4)
Sólidos totales (ml/L) **	(1133 ± 8,0)
Sólidos Sedimentables ( ml/L) *	( 3,00 ± 0,05)
pH ( unidades de pH) (± 0,01) *	6,16
Temperatura (± 0,1°C) *	20,0
Sustancias Activas al Azul de metileno (mg/L) **	(8,00 ± 0,05)

-----Ultima línea-----

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química ( PT-QUI ) métodos código PT-QUI-01-01, PT-QUI-01-02, PT-QUI-01-03; PT-QUI-01-04, PT-QUI-01-05, PT-QUI-01-06, basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005

(\*) Ensayo acreditado en análisis químico y microbiológico de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página ([www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)).

(\*\*) Ensayo no acreditado.

**TIPO DE MUESTREO:** Realizado por el Cliente

**OBSERVACIONES:**

**Muestra 01:** Salida # 6 de Biodigestor planta ITCR  
Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 605-06. Vence el 06-10-2011.  
(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Prohibida su reproducción  
Página 1 de 2  
# Informe 971109

Uso exclusivo TEC



Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

**SOLICITADO POR:** SRITA ROSSY GUILLEN

**REALIZADO POR:** *Noemy Quiros B.*  
B.Q. NOEMY QUIROS BUSTOS  
REGENTE QUIMICO



Prohibida su reproducción  
Página 2 de 2  
# Informe 971109

Uso exclusivo TEC