

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN, ESTUDIOS NACIONALES Y
SERVICIOS AMBIENTALES



Eficiencia de los digestores anaeróbicos de la planta de biogás de San Marcos, Carazo, en la estabilización de residuos sólidos urbanos orgánicos y potencial energético del metano generado.

Tesis sometida a la consideración del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales para optar al título de Maestro en Ingeniería Ambiental.

Autores:

Ing. Mario Francisco Castellón Zelaya

Ing. Ronald Francisco Rivera Madriz

Tutor: Dr. Ing. Edouard Jacotin

Asesor: MSc. Lic. Rodolfo Jaen

Managua, Septiembre 2014

DEDICATORIA

A **Dios Nuestro Señor** por ser la fuente principal de la vida, de la sabiduría y la fortaleza para enfrentar los desafíos de cada día.

A mi esposa **Marleng Guatemala** por su apoyo, su comprensión y su amor, que la han convertido en pilar fundamental de mis logros.

A mis preciosas hijas, **Brissa Xilonem** y **Athziryan Marian**, quienes desde su llegada han llenado mi vida de dicha y felicidad. Por haberse convertido en mi principal inspiración.

A mis padres **Francisca Zelaya** y **Mario Castellón**, porque gracias a su tenaz e incansable deseo de darnos un futuro mejor es que hoy este logro es una realidad.

A mis hermanos **Mario Ulises, Leslie, Aura y Michael**, a quienes amo y han sido siempre no solo mis hermanos, sino también mis amigos.

Ing. Mario Francisco Castellón Zelaya

DEDICATORIA

A **Dios el creador de todas las cosas**, por haberme dado la vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre **Adela Madriz**, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar la situación, de igual manera a mis tíos, en especial a mi **tía Gloria Madriz** por ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto de formación tanto académica como personal.

A la memoria de mis abuelos **Ramón Madriz y Amanda Rivera** que siempre me demostraron su apoyo y cariño, además de servirme de ejemplo de vida.

A mi hermano **Jorge Rivera** que siempre ha estado junto a mí brindando me su apoyo.

Ing. Ronald Francisco Rivera Madriz

AGRADECIMIENTO

A las **Autoridades Superiores de la Universidad Nacional de Ingeniería** y a la **Dirección del PIENSA** por su apoyo incondicional y decidido a la Investigación como proceso fundamental en el quehacer universitario.

A la **Vicerrectoría de Investigación de la UNI** quien a través de la **Dirección de Investigación y Desarrollo** nos dio su total respaldo a través de la gestión del financiamiento de esta investigación.

A nuestros docentes de la Maestría en Ingeniería Ambiental, en especial a nuestro tutor el **Dr. Ing. Edouard Jacotin** y a nuestro asesor el **Msc. Lic. Rodolfo Jaen** por su tiempo y por compartir sus amplios conocimientos y experiencia.

A la **Lic. Violeta Machado Escobar** y al **Ing. Herty Guevara**, Presidenta y Jefe de Proyectos de **APRODIM**, respectivamente, por su total respaldo a través de su acompañamiento en la gestión y obtención de las condiciones necesarias para el estudio.

Al **Lic. Marco Tulio Navarro**, Concejal Municipal de la **Alcaldía de San Marcos**, por su enorme disposición y trabajo como autoridad municipal.

A los operadores de la Planta de Biogás por su indispensable apoyo, su dedicación y empeño.

A todas las personas que de muchas maneras dieron su aporte para que el anhelo de cursar nuestra maestría y de realizar esta tesis fuera una realidad.

RESUMEN EJECUTIVO

La conversión energética de los Residuos Sólidos Urbanos se ha perfilado en las últimas décadas como una de las formas más rápidas y seguras para resolver el problema del manejo inadecuado de los residuos sólidos alrededor del mundo y especialmente en la región latinoamericana. En Nicaragua se han dado pasos significativos en esta línea, siendo uno de los más notables la construcción y puesta en marcha a escala piloto de la Planta de Biogás de la ciudad de San Marcos, departamento de Carazo; la cual ha sido objeto de este estudio.

La planta cuenta con 7 Biodigestores de Presión Hidráulica (DPH) con una pila de alimentación común y fue diseñada para ser alimentada con residuos sólidos orgánicos seleccionados de los RSU recolectados por la Alcaldía Municipal, seleccionando de los mismos los restos de comida, complementados con los denominados residuos de mercado, o sea cáscaras de frutas y verduras.

El presente estudio nace con el objetivo principal de contar a nivel nacional con indicadores de eficiencia en cuanto a la estabilización y generación de biogás en el proceso de digestión anaerobia de los Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos (RSOU) mediante su tratamiento en Digestores de Presión Hidráulica. Así también como estimar el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa de los RSU en Nicaragua como fuente alternativa de energía y de su aporte medioambiental en la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI's).

Las actividades desarrolladas como parte del plan de trabajo incluyeron la caracterización física y química de los RSUO utilizados en la alimentación de los biodigestores. Posteriormente se realizó el monitoreo in situ de los parámetros de operación de la planta (Temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica y Velocidad de Carga Orgánica). Durante el monitoreo de la operación de la planta se llevó registro de los volúmenes y composición del biogás generado utilizando

dos sustratos diferentes: cáscara de Pitahaya (denominado Sustrato 1) proveniente de una planta procesadora de frutas; y residuos de comida y cáscaras de frutas (denominado Sustrato 2) provenientes de viviendas y establecimientos comerciales como restaurantes y comiderías del casco urbano de la ciudad.

Los valores registrados in situ fueron contrastados con valores teóricos obtenidos del Balance de Masas en base a la reacción global de descomposición del carbono orgánico presente en los diferentes sustratos.

Se tomaron muestras de lixiviados y de efluentes líquidos y sólidos provenientes de la planta, las cuales fueron analizadas en los laboratorios para luego determinar la eficiencia de los bio digestores en la estabilización de los RSUO.

Finalmente, se utilizaron modelos matemáticos recomendados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) para estimar el potencial energético de los RSUO tratados en la planta, así como para cuantificar la cantidad de GEI's

Como resultados se obtuvo que la Producción Per Cápita (PPC) en el casco urbano del municipio de San Marcos es de 0.55 kg/hab/día, con un volumen total de generación de 79.70 m³/día. El 88% del volumen de residuos sólidos corresponden a la Fracción Orgánica, compuesta mayormente por follajes o residuos de jardín en un 59%, y restos de comida en un 24%.

De los dos sustratos utilizados durante el monitoreo, la Pitahaya posee una humedad del 90%, lo cual es consecuente dado su alta densidad de 650.99 kg/m³. En el caso de los RSUO la humedad es del 43.21% con una densidad de 367.43kg/m³, Así mismo el porcentaje de Materia Volátil de la cáscara de Pitahaya es de 90.1% y la de los RSUO es de 42.59%.

Según los registros los bio digestores operan con valores de temperatura en un rango de 24 - 27 °C, que corresponde a un rango mesofílico. Los valores de pH de operación variaron de 7.0 – 8.5, manteniéndose sin variaciones significativas.

La Velocidad de Carga Orgánica para los dos sustratos tiene un valor de $0.06 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{día}$ para la cáscara de Pitahaya y de $0.07 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{día}$ para los RSUO, pudiendo estar influenciada por el alto contenido de Sólidos Volátiles de la cáscara de Pitahaya (90%) respecto a los RSUO (43%).

Con Tiempos de Retención Hidráulica de 32 días para el Sustrato 1 se obtuvieron valores de remoción de DQO y DBO_5 de 65 y 54% respectivamente. En el caso de los RSUO con un TRH de 33 días la remoción tanto de DQO como de DBO_5 fue del 95%.

Para el sustrato 1 se obtuvo una producción promedio de biogás $3.47 \text{ m}^3/\text{día}$ y de $3.20 \text{ m}^3/\text{día}$ para el sustrato 2. Esto equivale a una generación de $0.34 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ y $0.24 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ respectivamente. Expresada en función de la Materia Seca de alimentación se obtiene una producción de $0.31 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgMS}$ y $0.10 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgMS}$ para el Sustrato 1 y 2 respectivamente.

Este valor es similar a lo reportado en la bibliografía y comparado con los resultados del Balance de Masas, el porcentaje de metano del biogas medido se encuentra por encima del estimado que fue de 52.83% y 53.42% para el sustrato 1 y 2 respectivamente.

El uso de la cáscara de Pitahaya como sustrato en la alimentación de los bio digestores representa un potencial de 0.114 TJ/año, que de ser aprovechado para la co generación de energía eléctrica representa un potencial de 40.11 MW-hr/año. En cambio para los RSU el potencial energético es de 0.07 TJ/año, significando una capacidad de generar 19.62 MW-hr/año.

Las reducciones en las emisiones de GEI's son bastante considerables alcanzando las $817 \text{ tonCH}_4/\text{ton}$ Materia Seca, lo cual permite validar el beneficio ambiental de la digestión anaerobia como una tecnología limpia para el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	7
II. OBJETIVOS.....	8
2.1 OBJETIVO GENERAL	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
III. LIMITANTES DEL ESTUDIO.....	9
IV. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	10
4.1 BIOMASA.....	10
4.1.1 Fuentes de generación de biomasa	10
4.1.2 Características de la biomasa	11
4.2 TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA	14
4.2.1 Conversión térmica.....	14
4.2.2 Conversión mediante procesos bioquímicos	14
4.3 DIGESTIÓN AEROBIA	15
4.4 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	16
4.4.1 Digestión anaerobia de aguas residuales.....	17
4.4.2 Digestión anaerobia de residuos sólidos.....	17
4.4.3 Condiciones térmicas.....	18
4.4.4 Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia	19
4.4.5 Velocidad de Carga Orgánica (VCO)	22
4.4.6 Energética del proceso de digestión anaerobia	23
4.4.7 Tamaño de las partículas.....	25
4.4.8 Inhibidores de la digestión.....	26
4.4.9 Tiempo de Retención Hidráulica.....	26
4.5 BENEFICIOS AMBIENTALES DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RSU.....	27
4.5.1 Biogás y efecto invernadero.....	28
4.5.2 Cuantificación de emisiones de GEI´s.....	28
V. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE BIOGÁS	31
5.1 LOCALIZACIÓN	31

5.2	DATOS GENERALES DE LA PLANTA	31
5.3	FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA	32
5.3.1	<i>Tipos de digestores</i>	33
5.3.1	<i>Pre tratamiento y mezcla de los RSU</i>	34
5.3.2	<i>Tiempo de retención hidráulica</i>	35
5.3.3	<i>Velocidad de carga orgánica</i>	36
5.3.4	<i>Almacenamiento y uso del biogás</i>	36
5.3.5	<i>Disposición de biol o efluente líquido</i>	37
VI.	DISEÑO METODOLÓGICO	38
6.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	38
6.2	UNIVERSO DE ESTUDIO	38
6.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE LOS SUSTRATOS	38
6.3.1	<i>Muestra</i>	38
6.3.2	<i>Caracterización de sustratos</i>	40
6.4	ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LA PLANTA.....	42
6.4.1	<i>Recolección de RSU</i>	42
6.4.2	<i>Almacenamiento</i>	42
6.4.3	<i>Selección y pesaje</i>	43
6.4.4	<i>Triturado y mezcla de RSU</i>	44
6.4.5	<i>Alimentación</i>	45
6.5	MONITOREO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	45
6.5.1	<i>Temperatura</i>	45
6.5.2	<i>pH</i>	46
6.5.3	<i>Velocidad De Carga Orgánica</i>	46
6.5.4	<i>Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)</i>	47
6.6	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	47
6.6.1	<i>Medición de biogás producido</i>	47
6.6.2	<i>Toma de muestras</i>	47
6.6.3	<i>Producción de metano</i>	48
6.7	EFICIENCIA DE ESTABILIZACIÓN DE RSU	49
6.7.1	<i>Calidad de lixiviado</i>	49
6.7.2	<i>Calidad del biol</i>	50
6.8	PODER ENERGÉTICO DE LOS RSU.....	52
6.9	REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI'S	53

VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
7.1	RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN SAN MARCOS.....	55
7.1.1	<i>Muestra</i>	55
7.1.2	<i>Producción</i>	55
7.1.3	<i>Caracterización física</i>	55
7.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE SUSTRATOS	56
7.3	PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA	56
7.4	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	60
7.4.1	<i>Caracterización de biogás</i>	62
7.4.2	<i>Relación entre producción de Biogás y temperatura</i>	64
7.4.3	<i>Relación entre producción de Biogás y temperatura</i>	65
7.1	ESTABILIZACIÓN DE RSU.....	67
7.1.1	<i>Efluente líquido</i>	67
7.1.2	<i>Lodos</i>	73
7.2	PODER ENERGÉTICO DE LOS RSU SEGÚN SUSTRATO	74
7.3	REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI'S SEGÚN SUSTRATOS.....	74
VIII.	CONCLUSIONES	76
IX.	RECOMENDACIONES.....	79
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	81
XI.	ANEXOS	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Valores de PCI para RSU.....	13
Cuadro 2.- Transformaciones energéticas de la biomasa.....	14
Cuadro 3.- Composición del biogás.....	23
Cuadro 4.- Referencias de producción de metano de la Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM).....	23
Cuadro 5.- Producción de metano en rellenos sanitarios.....	24
Cuadro 6.- Efecto del tamaño de las partículas en la producción de biogás.....	26
Cuadro 7.- Características físico química de sustratos.....	56
Cuadro 8.- Valores de Temperatura y pH. Sustrato 1.....	57
Cuadro 9.- Valores de Temperatura y pH. Sustrato 2.....	58
Cuadro 10.- Porcentaje de metano en biogás generado.....	63
Cuadro 11- Cuadro comparativo de concentraciones y eficiencia de remoción de DQO.....	69
Cuadro 12.- Cuadro comparativo de concentraciones y eficiencia de remoción de DBO5.....	73
Cuadro 13.- Contenido de nutrientes en lodos del biol.....	73

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.- Trituradoras de Materia Orgánica.....	35
Fotografía 2.- Pila de mezcla de residuos triturados.....	35
Fotografía 3.- Bolsas para almacenamiento de biogás.....	36
Fotografía 4.- Vertido de efluente líquido.....	37
Fotografía 5.- Almacenamiento temporal de RSU.....	43
Fotografía 6.- Pesaje de residuos sólidos orgánicos.....	43
Fotografía 7.- Triturado de RSU.....	44
Fotografía 8.- Homogenización de mezcla de alimentación.....	45
Fotografía 9.- Medición de pH.....	46
Fotografía 10.- Medidor de flujo de gas.....	47
Fotografía 11. Toma de muestras de biogás.....	48
Fotografía 12.- Proceso de lixiviación de sustratos.....	49
Fotografía 13.- Recolección de muestra de biol.....	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.- Clasificación de Residuos Sólidos Urbanos.....	55
Gráfico 2.- Producción de biogás por digestor. Sustrato 1.....	60
Gráfico 3.- Producción de biogás por digestor. Sustrato 2.....	61
Gráfico 4.- Producción de metano. Sustrato 1.....	62
Gráfico 5.- Producción de metano. Sustrato 2.....	63
Gráfico 6.- Producción de metano vs temperatura. Sustrato 1.....	64
Gráfico 7.- Producción de metano vs temperatura. Sustrato 2.....	65
Gráfico 8.- Producción de metano vs pH. Sustrato 1.....	66
Gráfico 9.- Producción de metano vs pH. Sustrato 2.....	66
Gráfico 10.- Concentración de DQO salida y entrada. Sustrato 1.....	67
Gráfico 11.- Remoción de DQO. Sustrato 1.....	68
Gráfico 12.- Concentración de DQO salida y entrada. Sustrato 2.....	68
Gráfico 13.- Remoción de DQO. Sustrato 2.....	69
Gráfico 14.- Concentración de DBO5 salida y entrada. Sustrato 1.....	70
Gráfico 15.- Concentración de DBO5 salida y entrada. Sustrato 2.....	71
Gráfico 16.- Remoción de DBO5. Sustrato 1.....	72
Gráfico 17.- Remoción de DBO5. Sustrato 2.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Generación bruta de electricidad Nicaragua 2011.....	11
Figura 2.- Fases de la digestión anaerobia.....	21
Figura 3.- Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía.....	25
Figura 4.- Macro y micro localización de Planta de Biogás.....	31
Figura 5.- Esquema general de Planta de Biogás San Marcos.....	32
Figura 6.- Esquema general de un DPH de 10 m ³ de capacidad efectiva.....	33
Figura 7.- Componentes de un DPH.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Registro de peso y cálculo de PPC San Marcos	
Anexo 2.- Análisis de Laboratorio. Sustrato 1	
Anexo 3.- Análisis de Laboratorio. Sustrato 2	
Anexo 4.- Registro de producción de biogás. Sustrato 1: Cáscara de Pitahaya	
Anexo 5.- Registro de producción de biogás. Sustrato 2: RSU	
Anexo 6.- Balance de masa. Sustrato 1	
Anexo 7.- Balance de masa. Sustrato 2.	

I. INTRODUCCIÓN

La producción de desechos sólidos o residuos ha sido una constante desde la existencia de la vida en nuestro planeta. La generación de los residuos sólidos urbanos (RSU) se ha incrementado, principalmente por la concentración de la población en núcleos urbanos y el aumento progresivo del nivel de vida. (Rossin, Teixeira y Zepeda, 1998).

La conversión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en energía es hoy una actividad extendida en países europeos y del primer mundo, con el objetivo fundamental de disponer en forma rápida y eficiente los residuos producidos por las comunidades, minimizando así la contaminación ambiental asociada a su inadecuado manejo y disposición. (INTI, 2010, p.4).

Como una alternativa en el aprovechamiento energético de los RSU, surge el uso de reactores anaeróbicos (biodigestores) para la biodigestión de la biomasa proveniente de los RSU. El proceso de biodigestión consiste en utilizar las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de microorganismos para producir básicamente un gas compuesto de metano y dióxido de carbono llamado biogás y residuos sólidos similar al abono orgánico tipo compost. (Forster, 2005).

A través de este estudio se monitoreó y evaluó la operación de la Planta de Biogás existente en el municipio de San Marcos, departamento de Carazo, la cual trata una Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) generados en el municipio. Esto con el fin de determinar y evaluar los parámetros de operación de la planta, tales como temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), entre otros. Así mismo se determinó la cantidad y calidad del biogás generado, y la calidad del efluente líquido de los bio digestores para medir la eficiencia con que son estabilizados los RSU.

Tomando como referencia el volumen y características del biogás generado, se calculó el potencial de aprovechamiento del biogás como fuente alternativa para la

generación de energía eléctrica expresado en función de su poder calorífico y además se estimó la reducción en las emisiones de Dióxido de Carbono y Metano, los cuales son algunos de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI's).

El monitoreo se realizó para diferentes sustratos, tomando en cuenta que los RSU no solo incluyen los residuos domésticos sino también de las actividades industriales desarrolladas en el municipio. El primer sustrato utilizado fue la cáscara de Pitahaya, la cual es un residuo de los procesos desarrollados en plantas agroindustriales aledañas al sitio de la planta. El segundo sustrato está formado por RSU domésticos obtenidos de tres barrios urbanos y de algunos establecimientos comerciales como restaurantes y comiderías.

1.1 ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas, los rellenos sanitarios a nivel mundial y nacional han constituido el sistema de tratamiento final de residuos sólidos urbanos que ofrece las mejores soluciones técnicas, económicas y sanitarias. Sin embargo, el aprovechamiento energético de los RSU mediante esta tecnología se ve considerablemente reducido, ya que el proceso de biodigestión de la biomasa se lleva a cabo en periodos largos de tiempo. (López, 2003)

Ante esta realidad, el uso de reactores anaeróbicos o biodigestores se ha extendido ampliamente, iniciando su aplicación en el tratamiento de heces humanas y estiércol vacuno hasta su uso en el tratamiento de RSU y aguas residuales. Un biodigestor es un depósito que permite la fermentación de la materia orgánica de manera anaerobia produciendo biogás y estabilizando la materia procesada biológicamente. (Monroy, 1977)

En Nicaragua, hasta la fecha el aprovechamiento energético de la biomasa se ha limitado al de bagazo de caña producido en los ingenios azucareros, a partir del cual se genera energía eléctrica a través de un proceso de incineración donde se puede controlar la temperatura crítica para reducir la formación de NO_x, CO, reducir el material particulado y aprovechar el calor.

Se cuentan algunas experiencias en la implementación de bosques con fines energéticos, así como de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, que generan como subproducto, el biogas.

En cuanto a la biodigestión, existen algunas experiencias de la aplicación de tecnologías de biodigestión para el aprovechamiento de residuos generados en algunas industrias, principalmente en los mataderos y granjas porcinas. También existe una amplia experiencia en el uso de biodigestores en el procesamiento de estiércol vacuno y humano.

Sin embargo, en la biodigestión de la biomasa proveniente de los RSU, es en el año 2012 que por primera vez en Nicaragua se lleva a cabo un proyecto a nivel piloto, el cual consistió en la construcción de una Planta Biodigestora compuesta por siete Digestores de Presión Hidráulica (DPH) que tratan una porción de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) generados, para el aprovechamiento energético de los biogases resultantes del proceso anaeróbico.

Los objetivos principales del proyecto fueron contribuir a la solución del problema de manejo y disposición final de los RSU del municipio, así como lograr el aprovechamiento energético integral del biogás producido tanto como combustible para la cocción de alimentos como para la producción de energía eléctrica.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos en Nicaragua es en la actualidad incipiente, debido en gran medida a que las tecnologías de tratamiento implementadas hasta ahora, principalmente los rellenos sanitarios, demandan un largo periodo de tiempo para su explotación como fuente energética.

Al problema de la sub explotación del potencial energético de los RSU, se agrega el hecho de que el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), que son gases producidos por digestión anaerobia en los rellenos sanitarios y vertederos a cielo abierto, provoquen un considerable impacto medioambiental pues son Gases de Efecto Invernadero responsables del calentamiento del planeta.

En el año 2012 se puso en marcha la primera Planta de Biogás en Nicaragua, para el tratamiento de RSU; con el fin de que a través de un proceso de biodigestión anaeróbica se lograra potencializar los beneficios asociados a esta tecnología. No obstante, desde la puesta en marcha de la Planta de Biogás hasta la fecha, no se cuenta con datos sistematizados sobre los parámetros con los cuales opera la planta, ni de su eficiencia en el tratamiento de los RSU.

Este hecho ha significado una seria limitante en cuanto a la operación óptima de la planta al no disponer de guías operativas. Así mismo ha restringido su difusión y réplica en otras localidades, pues se carece de parámetros de diseño ajustados a las condiciones propias de la región.

En consecuencia a lo antes mencionado, se generó las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la eficiencia de los Digestores de Presión Hidráulica (DPH) en estabilización y en la generación de metano durante el proceso de biodigestión anaeróbica de la biomasa de los residuos sólidos?

- ¿Cuál es el potencial energético de la biomasa de residuos sólidos urbanos y los beneficios ambientales, en base a la captura y aprovechamiento del metano generado en la biodigestión anaeróbica?

1.3 JUSTIFICACIÓN

En Nicaragua, a pesar de la existencia de rellenos sanitarios, el potencial energético de los RSU como fuente renovable, ha sido desaprovechado. Un dato que sustenta la afirmación anterior es que según el Balance Energético Nacional 2011, del Ministerio de Energía y Minas, en Nicaragua la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa representó el 9% del total de energía generada en el país, reduciéndose su aprovechamiento al bagazo de caña y estiércol vacuno. (Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2012)

En la búsqueda de alternativas amigables con el medio ambiente, la biomasa de RSU se constituye como una opción de fuente de energía renovable. Sin embargo, para hacer un uso óptimo del potencial energético de este importante recurso es necesario profundizar en el conocimiento de los aspectos específicos relacionados con su potencial energético y su aprovechamiento, haciendo uso de la tecnología de biodigestores anaeróbicos.

A través del presente estudio se determinó la eficiencia de los biodigestores anaeróbicos que actualmente operan en el municipio de San Marcos. Este resultado permitirá emitir criterios y recomendaciones para la optimización en el uso de la tecnología ya implementada y dará pautas para la réplica de plantas de esta naturaleza en otras localidades del país.

Así mismo, el monitoreo de la producción de biogás producido y la determinación de su potencial energético; permitirá determinar su nivel de aprovechamiento como fuente de energía y de reducción de GEI's con el fin de aportar al manejo adecuado de los Residuos Sólidos Urbanos y a la protección ambiental

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar la eficiencia de los digestores anaeróbicos de la planta de biogás de San Marcos, Carazo, en la estabilización de residuos sólidos urbanos orgánicos; y potencial energético del metano generado.

2.2 Objetivos Específicos

- a. Realizar la caracterización físico - química de los residuos sólidos urbanos orgánicos tratados.
- b. Monitorear la generación de biogás, particularmente el metano producido durante el proceso de biodigestión anaeróbica de la biomasa de los residuos sólidos.
- c. Determinar la eficiencia de los Digestores de Presión Hidráulica (DPH) como tecnología para el tratamiento de RSU y de generación de metano para su aprovechamiento como fuente de energía.
- d. Calcular el poder calorífico del metano producido y expresarlo como el potencial energético de la biomasa de residuos sólidos urbanos.
- e. Estimar la reducción de los efectos al medio ambiente provocados por las emisiones de gases de efecto invernadero, con base a la captura y aprovechamiento del metano generado por la biodigestión anaeróbica de la FORSU.

III. LIMITANTES DEL ESTUDIO

- La Planta de Biogás no cuenta con todas las instalaciones necesarias para optimizar su funcionamiento. Actualmente carece de abastecimiento de agua, por lo que durante la época seca se enfrenta serios problemas para la alimentación de los biodigestores.
- Así mismo, no dispone de una fuente de energía eléctrica continua para la correcta trituración de los RSU a ser tratados en la planta, lo cual limita la eficiencia en el proceso de biodigestión y en consecuencia la cantidad y calidad de los subproductos.
- Aun no se ha logrado implementar con éxito la separación en el origen de los RSU, lo cual impide obtener permanentemente un sustrato homogéneo en cuanto a características físicas, influyendo de esta manera en la estabilidad con que opera la planta.
- En el país no se cuenta con un laboratorio especializado en Residuos Sólidos que preste la facilidad para determinar los elementos bio genésicos presentes, por lo que estos fueron obtenidos de estudios de otros países.

IV. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

4.1 Biomasa

La Biomasa es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

“Biomasa es la materia viva presente en una capa muy fina de la superficie terrestre llamada biósfera, la cual representa una fracción muy pequeña de la masa terrestre”. (Hernández, Orduz, Zapata, Cardona y Duarte, 2010, p.118).

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). (Biomass Users Network [BUN-CA], 2002).

4.1.1 Fuentes de generación de biomasa

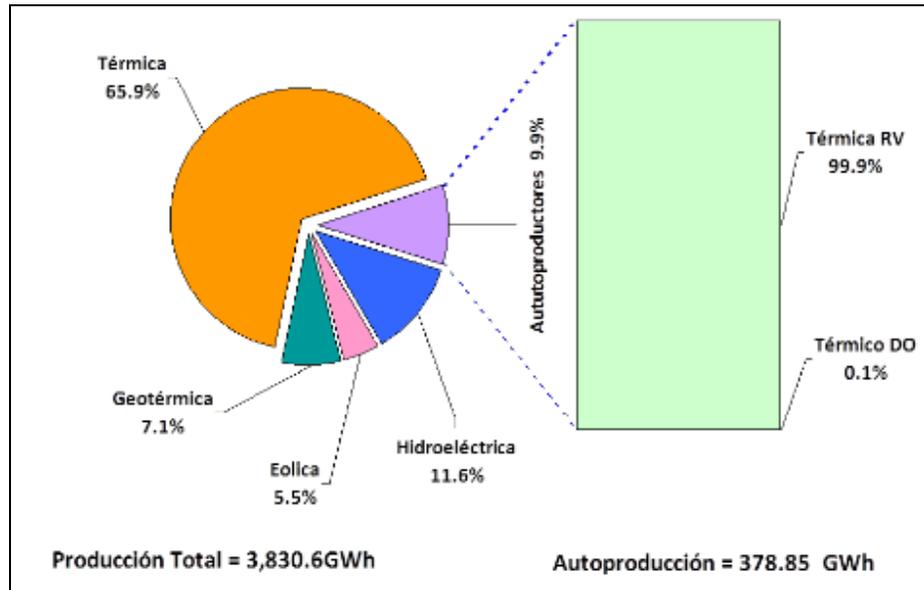
La biomasa puede ser obtenida de diferentes sectores:

- Sector agrícola: recursos forestales y cultivos energéticos.
- Sector pecuario: estiércol animal
- Sector industrial: residuos de carnes, frutas y vegetales procesados.
- Sector urbano: restos de comida, papel, madera, cáscaras, aguas residuales.

Según estimaciones, el potencial de energía de Biomasa en Nicaragua es de 100 MW, equivalente al 3.3% del potencial de recursos energéticos a nivel nacional. (Comisión Nacional de Energía [CNE], s.f.).

Por otra parte, en el 2011 la generación bruta del subsector eléctrico nacional fue de 3830.6 GWhr, de la cual el 9.9% fue generada por Autoprodutores, principalmente residuos vegetales (bagazo de caña). (MEM, 2012) Ver figura 1.

Figura 1.- Generación bruta de electricidad Nicaragua 2011. (Ministerio de Energía y Minas, Nicaragua, 2012)



4.1.2 Características de la biomasa

Para el óptimo aprovechamiento energético de la biomasa es fundamental conocer sus características, pues de estas depende que se puede hacer una adecuada selección del proceso de conversión, así como estimar con mayor certeza el potencial de aprovechamiento.

4.1.2.1 Tipo de biomasa

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular.

Para definir el tipo de biomasa es preciso conocer los siguientes parámetros:

- Composición física: las características físicas más importantes son la densidad y el contenido de humedad.
- Análisis elemental: implica la determinación del porcentaje en peso del Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S) y cenizas.

- Análisis físico - químico: implica la evaluación del contenido de carbono fijo, los sólidos volátiles y las cenizas.
- Análisis estructural: determinación del contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa.

4.1.2.2 Densidad

Se define como el peso de un material por unidad de volumen. (Tchobanoglous, Theisen, y Vigil, 1994, p.82). Este dato es importante pues es básico para determinar la masa y el volumen de residuos a manejar.

4.1.2.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. (BUN-CA, 2010, p.10).

4.1.2.4 Cenizas

Las cenizas corresponden a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material, y se determinan sometiendo una cantidad de RSU a 600°C durante dos horas en una estufa. Lo que queda en la cápsula de porcelana son los sólidos fijos y la diferencia de peso entre la cápsula que contenía los sólidos originales y el peso de la cápsula con las cenizas, constituye los sólidos volátiles. El contenido de cenizas suele expresarse como la cantidad de cenizas por kilogramo de material. El poder calórico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas.

4.1.2.5 Contenido energético

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Esta característica es fundamental para establecer el potencial de una biomasa para ser utilizada como combustible.

“La valorización energética de la biomasa está dada por la cantidad de energía que contiene y que puede llegar a liberar cuando se somete a un proceso de conversión energética” (Hernández et al. 2010, p.119).

Según Hernández et al. (2010), la biomasa es un material formado principalmente por compuestos que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno; estos compuestos son los que reaccionan exotérmicamente cuando el residuo cede energía, lo cual se da por la oxidación de la materia que contiene carbono e hidrógeno, generando como productos, metano y agua.

La cuantificación del valor de la energía liberada en este proceso se define por el Poder Calorífico Inferior (PCI). Ver Cuadro 1.

Cuadro 1.- Valores de PCI para RSU

Tipo	PCI (Kcal/Kg)	Fuente
RSOU	3772	Biomass Users Network Centroamérica." BUN-Ca, 2002
RSU	3664.5	INTI, 2010
RSU	2150 - 2627	Badami, 2008

4.1.2.6 Relación Carbono/ Nitrógeno (C/N)

Esta relación expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteínica. (Tchobanoglous et al. 1994)

Los excesos de cualquiera de los dos componentes conllevan a una situación de carencia. Si el residuo de partida es rico en carbono y pobre en nitrógeno, la fermentación será lenta, las temperaturas no serán altas y el carbono se perderá en forma de dióxido de carbono. Para el caso contrario, en altas concentraciones relativas de nitrógeno, éste se transformará en amoníaco, impidiendo la correcta actividad biológica. La formación de metano y de ácido puede darse con valores mínimos de C/N 16. Sin embargo las bacterias responsables del proceso pueden

tener un excelente desempeño cuando el residuo presenta una relación C/N entre 25 y 30.

4.2 Transformación energética de la biomasa

Hacer una realidad el aprovechamiento energético de la biomasa requiere de la conversión de ésta, para lo cual existen diferentes procesos tanto físicos, químicos y biológicos.

En el cuadro siguiente se sintetizan los procesos de transformación de la biomasa.

Cuadro 2.- Transformaciones energéticas de la biomasa. (Adaptada de Hernández et al. 2010)

TIPO DE CONVERSIÓN	TECNOLOGÍAS	PRODUCTOS	APROVECHAMIENTO
TÉRMICA	Combustión	***	Calor
	Pirólisis	Biocombustibles sólidos y líquidos	Calor
		Gas de síntesis (SYNGAS)	Electricidad
	Gasificación	Gas de síntesis (SYNGAS)	Electricidad
		Combustible líquido	Calor
Termólisis	Combustible sólido	Calor	
BIOLÓGICA	Fermentación	Combustibles líquidos/gaseosos	Calor
	Digestión Anaeróbica	Biogás	Calor
			Electricidad

4.2.1 Conversión térmica

La conversión térmica consiste en la transformación de la biomasa en productos de conversión gaseosos, líquidos y sólidos con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor. (Tchobanoglous et al. 1994, p.687)

4.2.2 Conversión mediante procesos bioquímicos

En la conversión bioquímica se aprovechan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos. (Hernández et al. 2010, p.126). En cuanto a las características de los microorganismos se requiere tomar en cuenta las necesidades nutricionales para el crecimiento microbiano, los tipos

de metabolismos y los requisitos ambientales que condicionan el crecimiento y supervivencia de los microorganismos. (Forster, 2005, p.252).

Dentro de los procesos bioquímicos se destacan las transformaciones aerobias y anaerobias. Estas transformaciones se diferencian respecto de la transformación global que tiene lugar y del producto final obtenido. Básicamente el proceso aerobio o digestión aerobia elimina el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa microbiana (lodos) y el 20% restante en forma de anhídrido carbónico y agua. En cambio, la digestión anaerobia transforma la materia orgánica en una mezcla de un 5% de biomasa y un 95% de metano y anhídrido carbónico (biogás), susceptible de aprovechamiento y valorización económica. (Vandevivere, De Baere, Biey, Verstrae, y Lissencs, 2001).

4.3 Digestión aerobia

La digestión aerobia o fermentación controlada es un proceso mediante el cual se produce la separación y conversión bacteriana de la biomasa. Básicamente el proceso aerobio o digestión aerobia elimina el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa microbiana (lodos) y el 20% restante en forma de anhídrido carbónico y agua.

En la digestión aerobia de los residuos sólidos, este proceso se conoce como compostaje.

Aunque son extremadamente diversos, los principales microorganismos involucrados en la descomposición aerobia de los desechos sólidos se pueden identificar como: bacterias, hongos, levaduras y actinomicetas. Mientras se encuentra que miembros de cada uno de estos grupos son capaces de descomponer todas las materias primas en los desechos sólidos, como grupo prefieren diferentes compuestos.

Aparte de las exigencias metabólicas, la predominancia de microorganismos varía durante el curso del proceso de fermentación. Uno de los mayores factores

que contribuyen a que esto ocurra es el calor liberado como resultado de las actividades desasimilatorias y asimilatorias de los microorganismos en la conversión de los desechos sólidos a humus estabilizado. Inicialmente, el material que está siendo fermentado se calienta como resultado de la liberación de energía que acompaña a la degradación de los desechos orgánicos fácilmente convertibles y los azúcares; cuando la temperatura sube por encima de 45 a 50°C, empiezan a predominar organismos termofílicos; estos organismos predominarán a alrededor de los 55°C, que ha sido observada como la temperatura óptima para estos organismos. En este rango de temperatura son comunes ciertos tipos de bacterias y actinomicetas. En condiciones normales, la estabilización es más rápida en el rango termofílico que en rango mesofílico.

4.4 Proceso de digestión anaerobia

“La digestión anaerobia es un proceso microbiológico que consiste en la degradación biológica, en ausencia de oxígeno, de un material orgánico complejo, dando como productos finales un biogás, compuesto fundamentalmente por metano y dióxido de carbono, y un residuo con una menor concentración en sólidos volátiles u orgánicos. Así en un proceso equilibrado, la conversión total de la materia orgánica ocurre mediante una serie de etapas que transcurren tanto en paralelo como en serie, en la que participan varios grupos microbianos”. (Forster, 2005, p.14).

En el proceso fermentativo de la digestión anaerobia se desarrolla en unidades llamadas reactores anaerobios y en ellos se produce la conversión de la materia orgánica a metano y de CO₂, en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas.

Mediante estos reactores puede lograrse la generación de metano a partir de diferentes sustratos, entre los cuales destacan las aguas residuales domésticas e industriales, y la biomasa de residuos sólidos urbanos y agrícolas.

4.4.1 Digestión anaerobia de aguas residuales

En el tratamiento anaerobio de aguas residuales existen diferentes reactores que pueden clasificarse en función del tiempo de retención hidráulico (TRH), contacto entre el lodo y el sustrato, volúmenes del reactor, costos y condiciones de operación.

Reactores de primera generación: el tiempo de retención celular es igual al TRH, por lo que se requieren TRH muy altos, existe un contacto inadecuado entre la biomasa y la materia orgánica. Lagunas Anaerobias, Tanque Séptico, Tanque Imhoff.

Reactores de segunda generación: se caracterizan por el hecho de que tienen mecanismos para retención de los lodos, independizando el tiempo de retención celular del TRH. Los dos mecanismos más aplicados son a) inmovilización del lodo por adhesión a material sólido - Filtros anaerobios de flujo ascendente y descendente; b) separación líquido-sólido del efluente, con el retorno de los sólidos separados al reactor - UASB, el cual usa un sedimentador interno.

Reactores de tercera generación: para optimizar el contacto entre el sustrato y la biomasa, esta se adhirió con partículas de arena , alúmina o plástico, las cuales se expanden - Reactores de lecho fluidizado o expandido.

4.4.2 Digestión anaerobia de residuos sólidos

Los reactores para la digestión anaerobia de residuos sólidos pueden clasificarse en función de parámetros operacionales. En cuanto al régimen de alimentación se clasifican:

- **Sistema continuo**

La alimentación de la fracción orgánica del residuo se adiciona de forma continuada y constante en el fermentador. Todavía no han sido totalmente dilucidados los efectos de la frecuencia de la alimentación en la eficiencia de la digestión anaerobia. En principio cabe esperar un mejor funcionamiento cuando se opera en continuo, aunque, experiencias a nivel de laboratorio, han obtenido resultados análogos de producción de metano operando en continuo y en semicontinuo.

➤ **Sistema en discontinuo**

En los sistemas discontinuos el volumen del reactor se llena, en una única toma, con la alimentación. La materia orgánica, junto con el inóculo, permanecen en el reactor hasta transcurrir el tiempo necesario para conseguir la degradación requerida. Los vertederos controlados pueden ser considerados como ejemplo de un reactor discontinuo en gran escala.

➤ **Sistema en semi continuo**

Los procesos semicontinuos consisten en introducir la materia orgánica en el reactor periódicamente. En aplicaciones prácticas, esta alimentación suele dosificarse intermitentemente de 1 a 3 veces al día.

No obstante, desde el punto de vista biológico, los sistemas en continuo pueden degradar mayor volumen de sustrato que los semicontinuos, puesto que en estos casos la alimentación se presenta intermitentemente en exceso y en defecto.

4.4.3 Condiciones térmicas

En el proceso de biodigestión se identifican dos rangos de operación de las bacterias metanogénicas. Rango mesofílico (15 – 40) °C y el rango termofílico (55 -65) °C. (Mandujano, 2001)

En el rango mesofílico, la digestión anaeróbica se desenvuelve bien a temperaturas desde 12°C hasta 35°C, siendo la temperatura óptima de operación entre 29°C y 33°C. En el rango termofílico de operación entre los 37°C y 65°C siendo la temperatura óptima de 55°C.

El proceso de digestión se da con mayor velocidad cuando se opera en el rango termofílico, lográndose además una mayor remoción de microorganismos patógenos.

Sin embargo, en este rango las variaciones de temperatura afectan de manera significativamente el proceso dado que las bacterias que se reproducen a estas temperaturas son más susceptibles a dichos cambios. Así mismo los costos de acondicionamiento de temperatura y de operación no compensan la digestión en el rango termofílico por lo que se prefiere la operación en el rango mesofílico.

Existe una estrecha relación entre la temperatura y el volumen del digestor, condicionando también el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH). Para menores temperaturas el tiempo necesario para la digestión se incrementa, lo que a su vez significa un mayor volumen del biodigestor. Para digestores que operan en el rango mesofílico con temperaturas entre 30°C y 33°C se manejan TRH entre 25 y 30 días. En el caso de operar en el rango termofílico con temperaturas entre 50°C y 60°C el tiempo de retención se reduce a valores entre 10 y 15 días. (Mandujano, 2001)

4.4.4 Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se produce a partir de la acción coordinada e interdependiente de un conjunto de poblaciones bacterianas con metabolismos diferentes.

En un principio se estableció el modelo tradicional de la digestión anaerobia en dos etapas que aceptaba la existencia de dos grandes grupos microbianos: bacterias formadoras de ácidos o acidogénicas y archaeas formadoras de metano o metanogénicas. (McCarty, 1964).

Según Breure (1986) se acepta una descripción más detallada que considera hasta cuatro grupos de microorganismos anaerobios. La existencia de cada grupo de microorganismo se relaciona a las cuatro etapas del proceso de digestión anaeróbica, las cuales se describen a continuación. Ver figura 2.

4.4.4.1 Etapa hidrolítica

En esta primera fase las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen, en una transformación controlada por enzimas extracelulares, en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, alcoholes, CO₂ e H₂).

La fase hidrolítica es decisiva para la biodegradación de RSU, convirtiéndose en la etapa limitante para los residuos con gran cantidad de sólidos, donde la hidrólisis previa es necesaria ya que los microorganismos solo son capaces de metabolizar la materia orgánica disuelta y, por tanto, han de generar las exoenzimas necesarias para degradar el residuo. (Forster, 2005, p.18).

4.4.4.2 Etapa de fermentación acidogénica

La segunda etapa consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera fase en compuestos de peso molecular intermedio tales como ácidos grasos volátiles acetato, propionato, butirato, alcoholes, y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, H₂, CO₂, etc.). (Forster, 2005, p.18).

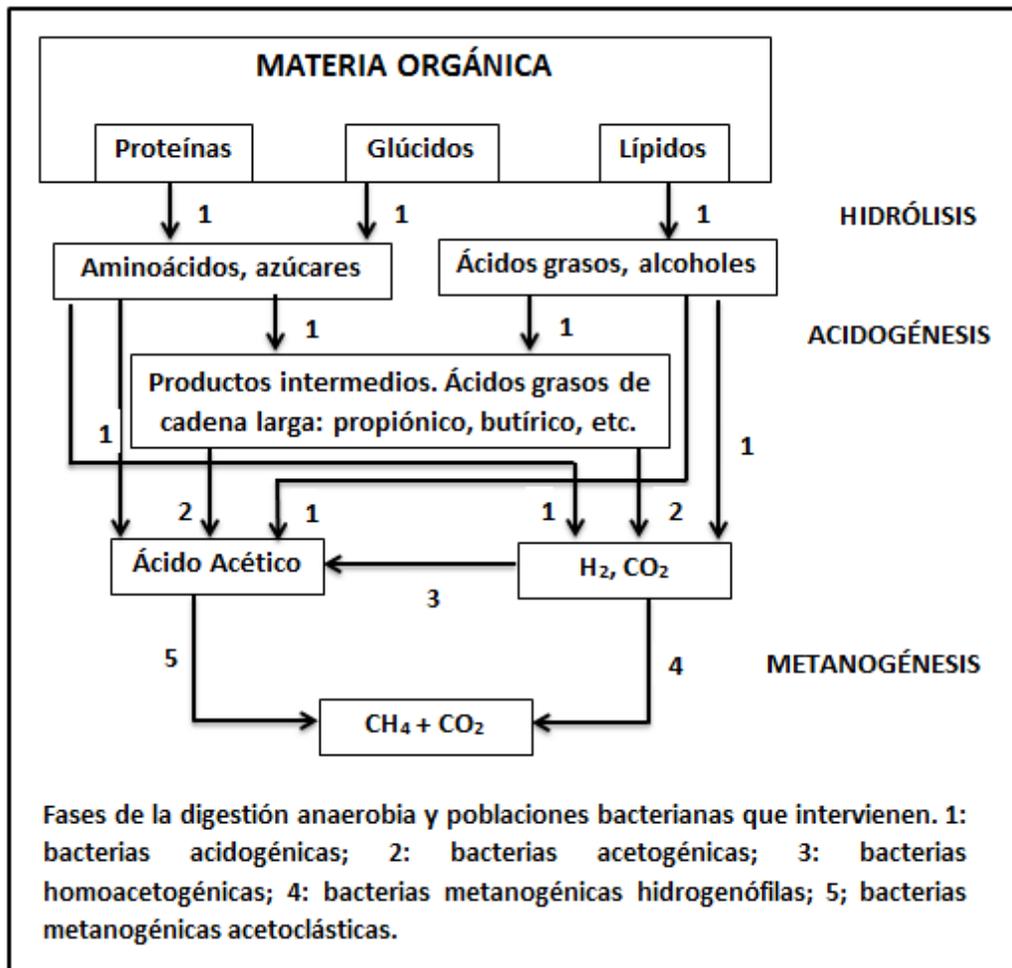
4.4.4.3 Etapa acetogénica

El grupo especializado de bacterias sintróficas denominadas acetogénicas fue descubierto por Mc-Inerney y Bryant (1981) gracias a las limitaciones metabólicas con relación a los otros grupos de bacterias. Son bacterias facultativas que viven en estrecha colaboración con las archaeas metanogénicas. Las bacterias acetogénicas no tienen otras posibilidades metabólicas, dependen necesariamente de reacciones de transferencia de hidrógeno entre distintas especies de microorganismos. (Forster, 2005, p.19).

4.4.4.4 Etapa de fermentación metanogénica

La metanogénesis es el último paso del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica. En esta etapa los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 , CO_2 , formiato, metanol, y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea, y, morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, tanto Gram positivos como Gram negativos. (Madigan y Jhon, 2006).

Figura 2.- Fases de la digestión anaerobia. (Pozuelo, Flotats i Ripoll y Bonmatí i Blasi, s.f.)



4.4.5 Velocidad de Carga Orgánica (VCO)

La Velocidad de Carga Orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la VCO implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida. (IDAE, 2007)

La diferencia básica entre las tecnologías de digestión anaerobia es el nivel de concentración de sólidos en el proceso de digestión. (Tchobanoglous et al, 1994)

4.4.5.1 Digestión anaerobia de baja concentración

La digestión anaerobia de baja concentración se trata de un proceso anaerobio con elevada dilución que se desarrolla en concentraciones de sólidos iguales o menores que el 4-8%. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994)

Entre las desventajas de este proceso está el requerimiento de grandes cantidades de agua y de energía para que la concentración de sólidos se mantenga en el rango requerido. Además se requiere la deshidratación del efluente líquido producido.

4.4.5.2 Digestión anaerobia de alta concentración

La digestión anaerobia de alta concentración se produce con una concentración de sólidos del 22% o más. Tchobanoglous (1994) recomienda concentraciones de sólidos del 22% al 28%.

Las principales ventajas que presenta la digestión anaerobia de alta concentración son los bajos requerimientos de agua para la dilución del residuo, menores requerimientos para la deshidratación del residuo final y mayor producción de biogás por unidad de volumen del digestor.

La concentración de sólidos también puede expresarse en función la cantidad de Sólidos Volátiles (SV) por unidad de volumen del biodigestor. En diferentes estudios realizados se encuentran registros de biodigestores operando con tasas desde 0.5 a 20 kgSV/m³ *día. (Mandujano, 2001)

4.4.6 Energética del proceso de digestión anaerobia

El biogás es el nombre genérico de los gases producidos como consecuencia de la degradación anaerobia de los residuos orgánicos que, por su alto contenido en metano, posee un elevado poder calorífico y puede usarse energéticamente de diversas maneras. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. La producción de metano dependerá de factores tales como la temperatura, pH, tipos de compuestos y microorganismos presentes en el proceso de digestión, etc.

En el Cuadro 3 y 4 se expresa la generación y composición media en volumen del biogás, producido por fermentación anaerobia o biometanización.

Cuadro 3.- Composición del biogás (Carneiro, et al., 2004)

%	Componente
50 – 60	CH ₄
30 – 40	CO ₂
5	H ₂ O, H ₂ , H ₂ S, hidrocarburos, etc.

Cuadro 4.- Referencias de producción de metano de la Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM). (Hartmann, 2003).

Componente	LCH ₄ /kgSVo	Referencia
Residuos de cocina, restaurantes	600-790	Kubler et al, 1999
FORM separada en origen	240-280	Kubler et al, 1999
FORM separada en origen	200-300	Ahring et al, 1992
FORM recogida selectiva	477	Mata et al, 1991
FORM separación mecánica	117-254	Cecchi et al, 1990,1991; citado por Mata (1997)
Papel prensa	84-100	Clarkson, 1999

Según Tchobanoglous, G. et al. (1196) la producción de biogás mediante digestión anaerobia de sólidos en baja concentración varía de 0.5 a 0.75 m³/kg de sólidos volátiles destruidos y mediante la digestión anaerobia de sólidos en alta concentración oscila de 0.625 a 1.0 m³/kg de sólidos volátiles destruidos.

En rellenos sanitarios la producción también se logra la producción de biogás. A diferencia de los biodigestores, en los rellenos la biodigestión no se efectúa de manera controlada.

En el cuadro 5 se muestran valores de producción de metano en rellenos sanitarios de varios países.

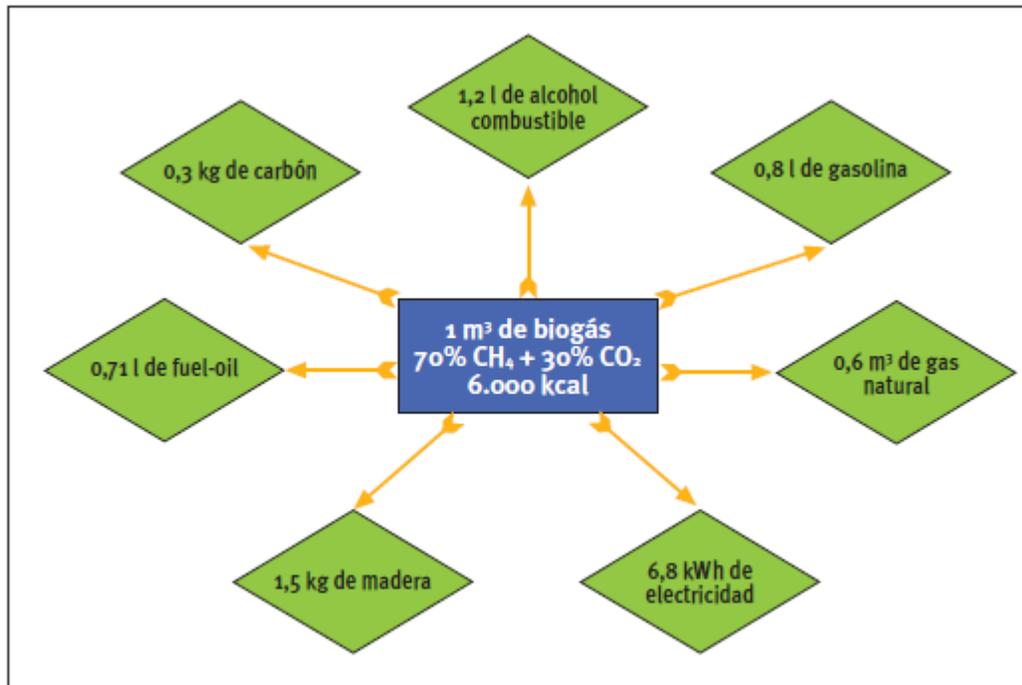
Cuadro 5.- Producción de metano en rellenos sanitarios.

País	Generación RSU (ton/día)	Generación CH ₄ (ton/día)	tonCH ₄ /ton RSU	Referencia
Alemania	107,808	1900	0.018	EPA, 2001
Argentina	25,000	573	0.023	CEPAL, 2000
Brazil	125,281	677	0.005	CEPAL, 2002
Chile	16,265	74	0.005	CEPAL, 2000
USA	607,970	7,280	0.012	EPA, 2001
Japón	136,986	387	0.003	FCCC, 2000
México	86,300	1,981	0.023	CEPAL, 2001
Uruguay	2,520	28.5	0.011	CEPAL, 2002
Colombia	28,900	1,445	0.050	MAVDT

Dado a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/m³ (6,4 kW-hr/m³). Es decir, salvo por el contenido en H₂S, es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en la figura siguiente. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007).

Hernández, et al, reportan valores de PCI en Argentina que oscilan entre 2000 - 2500 kcal/kg para residuos urbanos.

Figura 3.- Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. CIEMAT.



Debido a las diversas posibilidades de aplicación directa del biogás, la tecnología de digestión anaerobia presenta una notable reducción de los costos de operación frente a la digestión aerobia. La opción más difundida, actualmente, y la que más se está empleando es la generación de energía eléctrica y calor a través de motores de cogeneración. El sistema de cogeneración permite aprovechar el calor de la combustión para producir electricidad.

4.4.7 Tamaño de las partículas

El tamaño del material de alimentación en la digestión anaerobia tiene una enorme influencia pues de ello depende el grado de eficiencia en la transformación del sustrato. Los residuos a digerir deben ser triturados hasta un tamaño lo suficientemente pequeño para que no interfiera en el funcionamiento del biodigestor.

Se han operado digestores con diferentes tamaños de partículas con el fin de evaluar su influencia en la producción de biogás. Ver cuadro 6.

Cuadro 6.- Efecto del tamaño de las partículas en la producción de biogás. Hills, D., et al. 1984

Producción	Tamaño de la partícula (mm)				
	1.3	2.4	3.2	12.7	20
Contenido de Metano (%)	59.9	58.2	60.1	62.0	62.3
m ³ /kgST	0.45	0.38	0.25	0.16	0.13
m ³ /kgSV	0.75	0.75	0.72	0.61	0.63
m ³ CH ₄ /kgDQO	0.39	0.38	0.34	0.31	0.32

4.4.8 Inhibidores de la digestión

Existen algunas sustancias que pueden causar una baja considerable en la eficiencia en el proceso de la digestión de los residuos. La principal afectación radica en que su presencia inhibe o ralentiza el crecimiento de las bacterias responsables de la digestión de los residuos.

Estas sustancias pueden aparecer en el proceso ya sea al ser generadas como parte del proceso de digestión, por estar presentes en los sustratos utilizados o al ser vertidas de manera accidental.

Entre las principales sustancias inhibidoras del proceso de digestión puede mencionarse los Ácidos Grasos Volátiles, el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), el Oxígeno y los metales pesados.

4.4.9 Tiempo de Retención Hidráulica

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es uno de los principales parámetros de operación y control de los sistemas anaerobios, ya que afecta al funcionamiento del reactor y al nivel de las distintas poblaciones bacterianas que se establecen en el medio.

El TRH está en estrecha relación con el volumen del biodigestor y la concentración de sólidos a la cual opera. En procesos de digestión anaerobia de residuos en alta concentración, el TRH disminuye permitiendo una reducción del volumen del biodigestor.

Tchobanoglous, Theisen, & Vigil (1994) recomiendan TRH de 20 a 30 días para Digestores de Alta Concentración. Sin embargo, existen registros de digestores operados a nivel piloto con TRH de hasta 3 días.

4.5 Beneficios ambientales del aprovechamiento energético de los RSU

El aprovechamiento energético de los RSU y de la biomasa en general supone enormes beneficios socioeconómicos y ambientales. Según Xercavins, Cayuelas, Cervantes y Sabater (2005, p. 160), entre los principales beneficios ambientales se mencionan:

- Reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, pues el metano generado por la biodegradación de la biomasa no es liberado a la atmósfera, sino que se aprovecha en la generación de energía térmica o eléctrica. Esto se debe a que el metano es transformado en CO₂ durante su utilización como fuente de energía que se suma al que se encuentra formando parte del biogás.
- Se considera que todo el CO₂ emitido en la utilización energética de la biomasa empleada, había sido previamente fijado en el crecimiento de la materia vegetal que la había generado, por lo que no contribuye al incremento de su proporción en la atmósfera y, por tanto, no es responsable del aumento del efecto invernadero.
- El uso del metano como bio carburante en motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas, SO₂ y CO) que cuando se utiliza combustibles fósiles.
- El empleo de la tecnología de digestión anaerobia para tratar los RSU además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos

patógenos del efluente. Los lodos resultantes del proceso de digestión anaerobia pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura.

4.5.1 Biogás y efecto invernadero

Como resultado de las actividades antropogénicas y de los procesos naturales de descomposición de la biomasa se producen diversos gases que al incorporarse a la atmósfera inciden en la generación del llamado Efecto Invernadero.

El metano, que es un producto de la digestión anaerobia, es un potente gas de efecto invernadero, 21 veces más potente que el producido por el CO₂, y a la vez un gas que influye en el calentamiento global del planeta. Por lo tanto evitar que se libere al exterior contribuye de manera positiva al beneficio medioambiental.

El aprovechamiento energético de los RSU mediante la producción de energía eléctrica o térmica a partir del metano, se enmarca dentro de los proyectos de mitigación del cambio climático desarrollados a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio, los cuales buscan la disminución de gases de efecto invernadero.

Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA), el total de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del sector Desechos fue de 27.65 Ggr de metano (CH₄) y 0.23 Ggr de Óxido Nitroso (N₂O). El metano principalmente es generado por los residuos sólidos urbanos localizados en 25 vertederos municipales del país, mientras el óxido nitroso es emitido por las aguas residuales domésticas e industriales. Ambas categorías (desechos sólidos y líquidos) emitieron un total de 651.95 Ggr de CO₂ eq.

4.5.2 Cuantificación de emisiones de GEI's

Existen diversas metodologías para determinar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas a la generación de electricidad y calor a partir de biomasa. Entre ellas se encuentra la Metodología consolidada para la generación de electricidad y calor a partir de biomasa (ACM0006), desarrollada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

Esta metodología es aplicable a las actividades que operan con biomasa. La actividad del proyecto MDL puede incluir las siguientes actividades o, en su caso, combinaciones de estas actividades:

- a. Instalación de nuevas plantas en un sitio no se produce la generación de energía y calor;
- b. La instalación de nuevas plantas en un sitio donde se produce la generación de energía o de calor en la actualidad. En este caso, la nueva planta reemplaza o se opera junto a las plantas existentes (proyectos de ampliación de capacidad);
- c. La mejora de la eficiencia energética de las instalaciones existentes, que también puede conducir a una expansión de la capacidad, por ejemplo, mediante la adaptación de la planta existente;
- d. La sustitución total o parcial de combustibles fósiles por biomasa en las centrales existentes o en nuevas plantas que habrían sido construidas en la ausencia de los proyectos de cambio de combustible, por ejemplo, para aumentar el porcentaje de uso de la biomasa en comparación con la línea de base, mediante la adaptación de una planta existente a utilizar biomasa, etc.

Los escenarios alternativos plausibles para el uso de biomasa residual incluyen:

B1: El biogás se ventea a la atmósfera;

B2: El biogás es capturado y quemado;

B3: El biogás se captura y se utiliza para producir electricidad y / o energía térmica

B4: El biogás es capturado y utilizado como materia prima en productos útiles que no sean producción de gas en una ciudad;

B5: El biogás es capturado y utilizado como combustible para el transporte, y

B6: La actividad del proyecto propuesto a cabo sin estar registrado como proyecto MDL

Los escenarios alternativos plausibles para la producción de gas ciudad incluyeron:

T1: gas ciudad se produce con combustibles fósiles (s) como materia prima y combustible para el proceso de producción;

T2: gas ciudad es producido a partir de biomasa y combustibles fósiles como materia prima y combustible para el proceso de producción;

T3: gas ciudad se produce utilizando biogás, liberado de los sitios no incluidos en la actividad del proyecto, como materia prima y combustible para el proceso de producción;

T4: La actividad del proyecto propuesto a cabo sin estar registrado como actividad de proyecto del MDL.

Los posibles escenarios identificados son los siguientes:

B1-T2: El biogás se ventea a la atmósfera y el gas ciudad es producido a partir de biomasa y combustibles fósiles como materia prima y combustible para el proceso de producción.

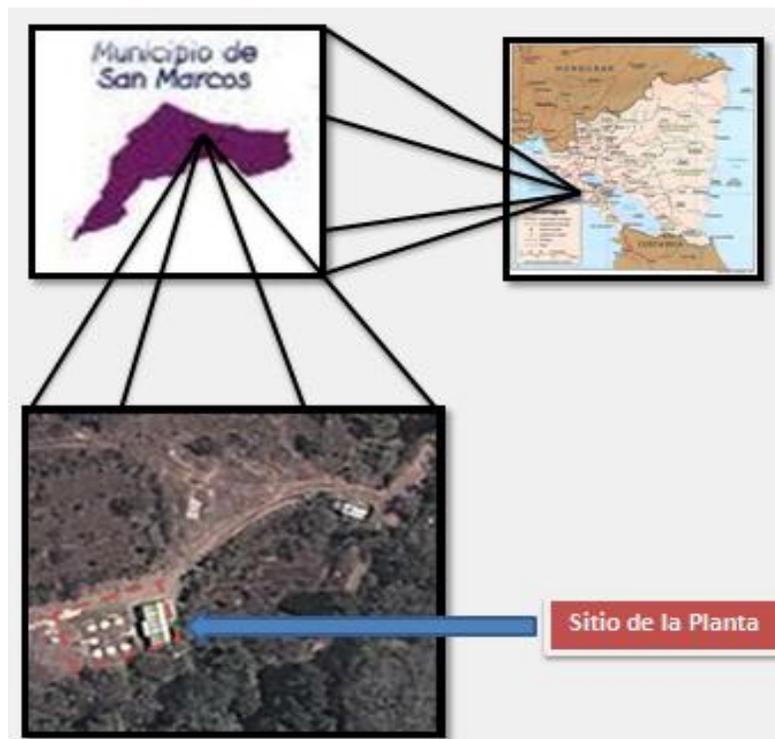
B3 – T2: El biogás se captura y se utiliza para producir electricidad y / o energía térmica y el gas ciudad es producido a partir de biomasa y combustibles fósiles como materia prima y combustible para el proceso de producción.

V. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE BIOGÁS

5.1 Localización

La planta de biogás objeto de este estudio está ubicada en el municipio de San Marcos, departamento de Carazo, en la zona sur occidental de Nicaragua. Ver Figura 4.

Figura 4.- Macro y micro localización de Planta de Biogás. Elaboración propia.

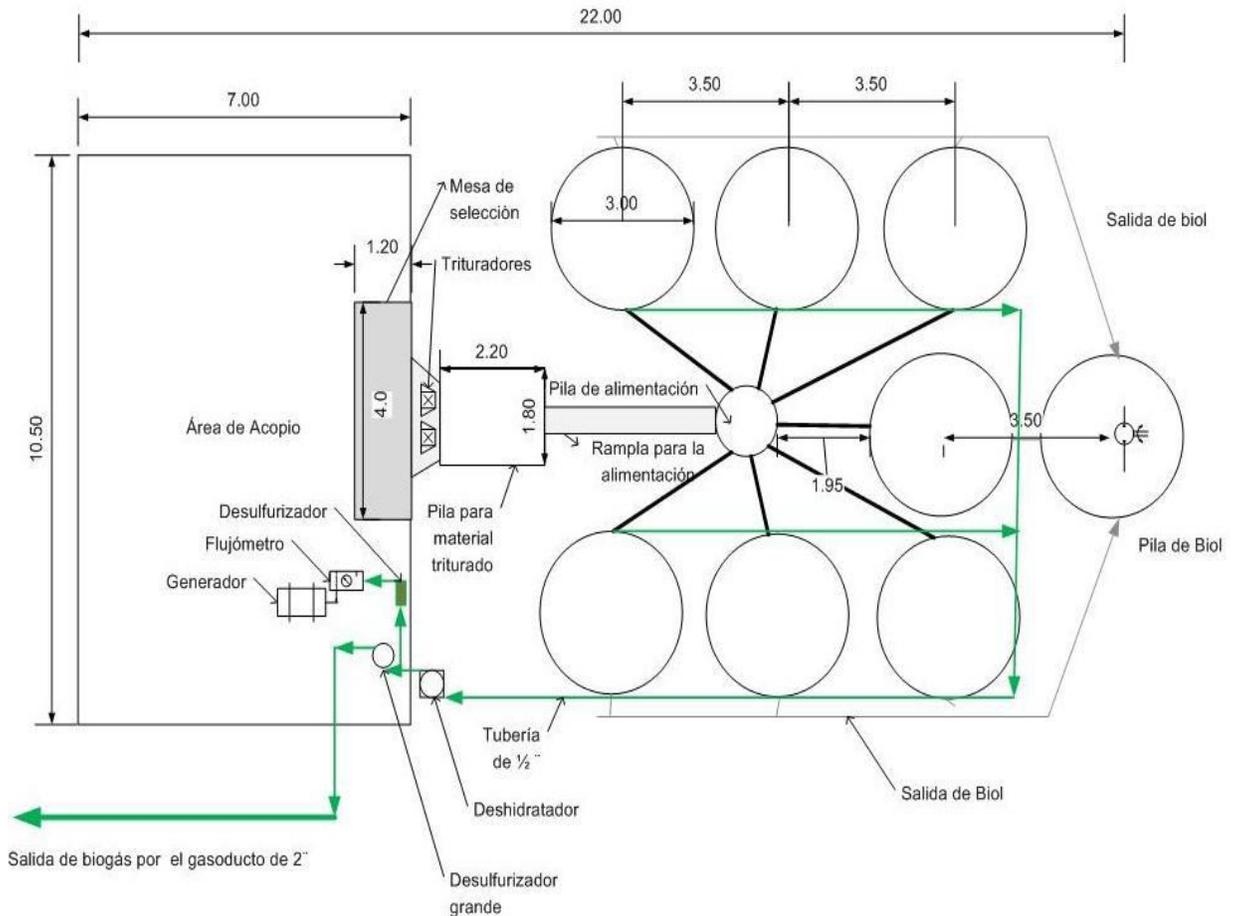


5.2 Datos generales de la planta

La Planta de Biogás de San Marcos fue construida en el año 2012 como parte del Proyecto piloto: Tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos con Aprovechamiento Energético Integral en la Ciudad de San Marcos. Ver Figura 5.

La planta fue gestionada a través de la Alcaldía Municipal y la Asociación Para el Desarrollo Integral de los Municipios (APRODIM) y fue diseñada por el Centro de Estudios Biotecnológicos (CEBiot) de la Universidad Politécnica de Nicaragua (UPOLI).

Figura 5.- Esquema general de Planta de Biogás San Marcos. (González, 2012)



La planta cuenta con 7 Biodigestores de Presión Hidráulica (DPH) con un una pila de alimentación común. Además de los digestores, la planta cuenta con una Pila de Dosificación para los Digestores, la Meseta de Separación Final de Productos, la Pila de Residuos y la Rampa para los Residuos Triturados, la Pila de Biol y Bomba de Recirculación de Biol, dos Trituradores de FORSU y un Generador de 3.0 kw, un Desulfurador, un Deshidratador, Medidores de flujo para el Gasoducto y para el Generador y el Sistema de Tuberías de Biol y de Biogás y una Bomba de Mecate alternativa para la recirculación de Biol.

5.3 Funcionamiento de la planta

Según su diseño, cada DPH tiene la capacidad para procesar aproximadamente 125 kg/día de RSO, con un contenido de materia orgánica fermentable de cómo

mínimo 30%, lo que significa una capacidad total de 875 kg/día con una capacidad de almacenamiento de biogás de 7 m³. (González, 2013)

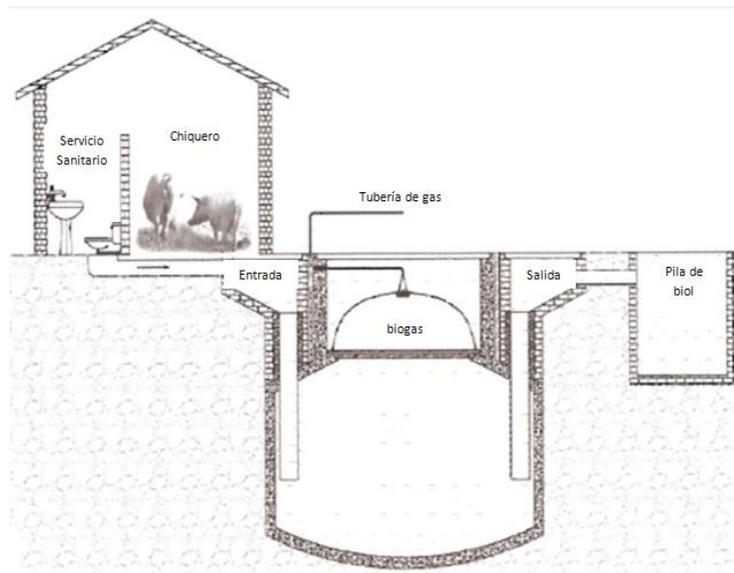
La Planta fue diseñada para ser alimentada con residuos sólidos orgánicos seleccionados de los RSU recolectados por la Alcaldía Municipal, seleccionando de los mismos los restos de comida, complementados con los denominados residuos de mercado, o sea cáscaras y restos de frutas y verduras.

El biogás generado en la planta es utilizado como combustible doméstico para la cocción de alimentos de 15 familias asentadas en los alrededores de la planta. El biogás es conducido a través de un gasoducto de 1.6 km de longitud.

5.3.1 Tipos de digestores

La tecnología existente es la de Digestores de Presión Hidráulica (DPH), la cual es una combinación de Digestores de Cúpula Fija y Digestores de Campana Flotante, resultando un Biodigestor de Campana Fija y Presión constante. Ver Figura 6.

Figura 6.- Esquema general de un DPH de 10 m³ de capacidad efectiva.
(González, 2013)



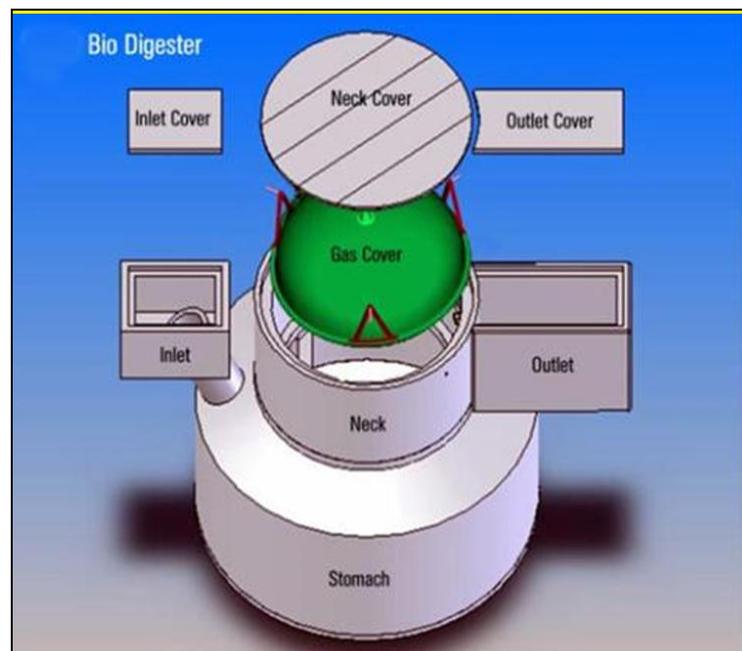
Tal como se muestra en la figura 6 el cuerpo de los digestores está compuesto del estómago, que constituye la mayor parte del digestor, la semi-cúpula, que

sirve de unión entre el estómago y el cuello; y este último que contiene el gasómetro hidráulico, que es uno de los componentes claves de la tecnología DPH.

Aunque los digestores fueron concebidos para funcionar con alimentación continua, en la práctica operan con flujo tipo *batch* alimentado o semicontinuo.

Cada digestor es alimentado una vez al día, forzando v por desplazamiento horizontal, la circulación de los materiales ya existentes en el interior del digestor.

Figura 7.- Componentes de un DPH. (González, 2012)



5.3.1 Pre tratamiento y mezcla de los RSU

La biomasa con que se alimenta la planta es llevada a pequeñas partículas a través de Trituradoras de Materia Orgánica y luego transportados hasta una pila para la mezcla y homogenización del material triturado y el agua. Ver Fotografías 1 y 2.

Fotografía 1.- Trituradoras de Materia Orgánica



Fotografía 2.- Pila de mezcla de residuos triturados.



5.3.2 Tiempo de retención hidráulica

Los digestores existentes fueron diseñados para alcanzar un TRH de 33 días.
(González, 2013)

5.3.3 Velocidad de carga orgánica

Los 7 biodigestores que componen la planta fueron calculados para operar con una dilución 1:1 y con una concentración alta. En este caso el volumen de alimentación debe estar en función del sustrato a utilizar y de la capacidad de almacenamiento y consumo del biogás generado.

5.3.4 Almacenamiento y uso del biogás

La planta cuenta con dos bolsas para el almacenamiento del biogás. Cada bolsa tiene una capacidad de almacenamiento de 10 m³ tal como se muestra en la Fotografía 3. Este es utilizado como combustible para la cocción de alimentos en 15 viviendas ubicadas en el barrio.

Fotografía 3.- Bolsas para almacenamiento de biogás.



5.3.5 Disposición de biol o efluente líquido

En la concepción de la planta se consideró que el efluente líquido o biol proveniente de todos los biodigestores sería recirculado haciendo uso de un generador eléctrico que utilizaría el mismo biogás producido en la planta. Sin embargo, en la práctica la recirculación no se da debido a que el biogás producido no es suficiente para operar el generador eléctrico. Como alternativa se instaló una bomba de mecate para extraer el efluente líquido de la pila.

Actualmente el excedente de Biol es vertido directamente sobre la superficie del suelo en áreas aledañas a la Planta. Ver fotografía 4.

Fotografía 4.- Vertido de efluente líquido.



VI. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 Tipo de investigación

La investigación desarrollada es del tipo aplicada.

6.2 Universo de estudio

El trabajo de investigación evaluó el potencial energético de los Residuos Sólidos Municipales Orgánicos, en los que se incluyen los residuos sólidos domésticos de la ciudad de San Marcos y los residuos generados en las plantas agroindustriales aledañas.

6.3 Caracterización físico química de los sustratos

6.3.1 Muestra

A. Sustrato 1: Cáscara de Pitahaya (Residuos de plantas agroindustriales)

El muestreo de los RSO de plantas agroindustriales se hizo por conveniencia, es decir, seleccionando el sitio de recolección de más fácil acceso. Para ello se identificaron todas las plantas agroindustriales generadoras de Residuos Sólidos que están ubicadas en sectores aledaños a la Planta de Biogás y que son de fácil acceso.

En este caso el sustrato utilizado fue la cáscara de Pitahaya, una fruta tropical, cosechada ampliamente en las zonas aledañas y que actualmente es procesada industrialmente. La selección de este sustrato se justifica en que al momento de realizar el estudio ya la planta se encontraba operando con este sustrato, esto debido a que era el principal residuo generado en la planta agroindustrial seleccionada.

B. Sustrato 2: RSU separados en el vertedero

Se realizó un muestreo de los RSU para todo el municipio a fin de determinar la Producción Per Cápita (PPC), Densidad y Composición Física. Esta información

fue muy útil para poder proyectar la cantidad y composición física de los RSU; y luego estimar el total del potencial energético de los mismos.

Para la determinación de la muestra se utilizó el Método de Muestreo en la Fuente, considerando el siguiente proceso:

- El programa de muestreo cubrió ocho días consecutivos, descartando la muestra tomada el primer día de recolección, ya que se desconoce la duración del almacenamiento para esa muestra.
- La duración de ocho días de muestra se definió en función de estudiar las posibles variaciones en la producción durante toda la semana y obtener la mayor precisión de los datos en los parámetros definidos.
- El número de muestras para la determinación de la Producción Per Cápita (PPC) en el casco urbano se obtuvo aplicando el Método de Muestreo Simple Aleatorio, es un método de selección de unidades tomadas de un total de viviendas N, de tal forma que cada una de las muestras tengan la misma posibilidad de ser escogida.
- Según dicho método, se puede determinar el tamaño necesario de la muestra (n) por la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$n = \frac{V^2}{\left(\frac{E}{1.96}\right)^2 + \frac{V^2}{N}}$$

Donde,

n = número de viviendas a muestrear aleatoriamente

V = desviación estándar de variables xi (xi = PPC de la vivienda i) (gr/hab/día)

E = error permisible en la estimación de PPC (gr/hab/día)

N = número total de viviendas del estrato en cuestión

- La muestra se calculó en base a los siguientes parámetros estadísticos: porcentaje de confiabilidad igual al 95%, un error permisible de 50 gr./hab./día y una desviación estándar de 200 gr/hab/día.
- Dos días antes al inicio de la recolección se realizó la distribución de las viviendas de forma aleatoria procurando la mayor representatividad posible. Para tal fin, se llevó a cabo un recorrido sobre las vías orientadas Oeste – Este y luego Norte – Sur de manera tal que sobre cada cuadra se seleccionó una vivienda, quedando al final cuatro viviendas por cada manzana, una en cada cuadra.
- Después de la selección de viviendas se hizo una visita explicativa a cada una de ellas, explicando la dinámica del método de muestreo y de los objetivos del estudio en general. A cada unidad se le hizo entrega de una bolsa plástica para la recolección de los residuos y se le asignó un número o código de identificación, el cual consistió en las primeras tres letras del nombre de cada barrio seguido del número de vivienda seleccionada en orden consecutivo.
- Cada día de muestreo, los recolectores entregaron una bolsa plástica a cada vivienda a cambio de la bolsa llena de basura, marcándola para su identificación.

6.3.2 Caracterización de sustratos

Se realizó la caracterización físico - química de los diferentes sustratos con que fueron alimentados los biodigestores. Los análisis para la obtención de estos parámetros se realizaron en los Laboratorios Ambientales del Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA) utilizando el Standard Methods 21st edition, 2000.

Para los dos sustratos utilizados se determinaron los siguientes parámetros:

A. Densidad

La densidad suelta de los sustratos se obtuvo dividiendo su peso total en kilogramos entre su volumen total en metros cúbicos.

Para el cálculo de la densidad se utilizó un recipiente con un volumen de 0.022 m³. Para evitar que hubiese espacios vacíos se realizaron movimientos fuertes de manera circular para que la basura se asentara.

El cálculo de la densidad se realizó mediante el uso de la siguiente expresión matemática:

$$\text{Ecuación 2} \quad \text{Densidad}(\text{Kg} / \text{m}^3) = \frac{\text{Peso}(\text{kg})}{\text{Volumen}(\text{m}^3)}$$

B. Humedad

Método Analítico 2540 – A. Standard Methods 21st edition, 2000.

C. pH

Se determinó por el Método Potenciométrico (4500-H+) establecido en el Standard Methods 21st edition, 2000.

D. Alcalinidad Total

Método Analítico 2320 – B. Standard Methods 21st edition, 2000.

E. Materia Seca

Método Analítico 2540 – A. Standard Methods 21st edition, 2000.

F. Materia Volátil y Cenizas

Método Analítico 2540 – E. Standard Methods 21st edition, 2000.

G. Nitrógeno Total Kjeldahl

Método Indirecto. Obtenido de la sustracción entre Nitrógeno total y Nitrato más Nitrito.

H. Carbono Total y Materia Orgánica

Método Analítico 5220 – C. Standard Methods 21st edition, 2000.

I. Fósforo Total

Método Analítico 4500 - C. Standard Methods 21st edition, 2000.

6.4 Arranque y operación de la planta

Al inicio del estudio, la planta ya estaba operando de manera estable. Para el arranque de la planta los biodigestores fueron inoculados con lodos provenientes de una planta demostrativa ubicada en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Nicaragua (UPOLI) en la ciudad de Managua.

6.4.1 Recolección de RSU

Los RSU de las plantas agroindustriales fueron recolectados y transportados hasta el sitio de la Planta de Biogás por el personal de dichas empresas.

Los RSUO domésticos fueron recolectados en los distintos barrios de la ciudad a través del Sistema de Recolección Municipal para luego ser transportados hasta un predio aledaño a la Planta de Biogás y posteriormente separar manualmente la fracción orgánica.

6.4.2 Almacenamiento

Para el almacenamiento de los distintos sustratos se utilizaron depósitos de 0.2 m³ y fosas recubiertas con plástico de polietileno color oscuro. Ver Fotografía 5.

Fotografía 5.- Almacenamiento temporal de RSU



6.4.3 Selección y pesaje

Del volumen de residuos almacenados se procedió a la separación de la fracción orgánica. Posteriormente se realizó el pesaje según la carga a alimentar para cada sustrato. Ver Fotografía 6.

Fotografía 6.- Pesaje de residuos sólidos orgánicos.



6.4.4 Triturado y mezcla de RSU

A pesar de que la planta cuenta con Trituradoras de Materia Orgánica, estas no pudieron ser operadas a causa de no existir una conexión a la red de energía eléctrica.

Desde su construcción, la planta cuenta con un generador de energía eléctrica utilizando biogás, el cual debería estar siendo utilizado para operar las trituradoras. Sin embargo, el biogás producido actualmente en la planta, está siendo suministrado a viviendas aledañas para su uso como fuente de calor, limitando la disponibilidad de biogás para la operación del generador.

Ante la inutilización del generador, cada sustrato utilizado en la alimentación de la planta fue picado manualmente utilizando palas metálicas y machetes. La biomasa fue picada hasta alcanzar una masa homogénea con partículas de aproximadamente 3 cm en promedio. Ver Fotografía 7.

Fotografía 7.- Triturado de RSU



Posteriormente fue llevada hasta la pila de mezcla agregándose un volumen de agua de agua equivalente al volumen de sustrato para obtener una relación 1:1.

La mezcla fue agitada hasta lograr su homogenización para luego ser descargada a cada biodigestor. Ver fotografía 8.

Fotografía 8.- Homogenización de mezcla de alimentación.



6.4.5 Alimentación

Los biodigestores fueron alimentados diariamente con un peso de biomasa variable según el sustrato a utilizar. Para el Sustrato 1 (cáscara de Pitahaya) se alimentó con 250 lbs y para el Sustrato 2 (RSU domésticos) se utilizó 120 lbs diarias.

6.5 Monitoreo de parámetros de operación

Durante la medición de los parámetros de operación no fue posible obtener valores para cada uno de los 7 biodigestores, debido a que la planta no presta las condiciones necesarias para ello. Por tanto para las mediciones se consideró que todos los biodigestores trabajan en las mismas condiciones de temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica y Velocidad de Carga Orgánica.

6.5.1 Temperatura

La temperatura fue medida en la muestra obtenida directamente de la descarga en el pozo de biol. Se utilizó un Termómetro marca TEL – TRU *Germanow*.

6.5.2 pH

En la muestra recogida en la descarga de la pila de biol se midió el valor de pH a fin de tener un valor aproximado del valor de pH con que operan los biodigestores. Se utilizó un pH metro marca PH Meter, modelo PH- 009 (I). Ver Fotografía 9.

Fotografía 9.- Medición de pH



6.5.3 Velocidad De Carga Orgánica

Conocido el volumen de sustratos con que se alimentó cada digestor y la concentración del sustrato se calculó la Velocidad de Carga Orgánica (VCO).

$$\text{Ecuación 3} \quad VCO(Kg / m^3 * dia) = \frac{Q * S}{V}$$

Donde, Q = caudal de alimentación del sustrato (m³/día)

S = concentración de sustrato en la alimentación (kg/m³)

V = volumen del biodigestor (m³)

6.5.4 Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

El TRH se calculó como la relación entre el biodigestor y el caudal de alimentación del sustrato.

$$\text{Ecuación 4} \quad TRH(\text{días}) = \frac{V}{Q}$$

Donde, Q = caudal de alimentación del sustrato (m³/día)

V = volumen del biodigestor (m³)

6.6 Producción de biogás

6.6.1 Medición de biogás producido

El volumen de biogás producido se obtuvo mediante el registro de las lecturas de un medidor de flujo de gases instalado en la Planta de Biogás. Para ello se llevó un registro diario de las lecturas del medidor. Ver Fotografía 10.

Fotografía 10.- Medidor de flujo de gas.



6.6.2 Toma de muestras

Las muestras de biogás fueron tomadas directamente en el gasoducto antes de llegar al tanque de eliminación de vapor de agua. Para la toma de muestras se

utilizaron bolsas SKC *Quality Sample Bag* Catalog Number: 231- 20 de 40 litros de capacidad.

Fotografía 11. Toma de muestras de biogás.



6.6.3 Producción de metano

Se realizó análisis de laboratorio para determinar la producción de metano como porcentaje del biogás generado. Dichos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Aguas Residuales del Programa BIOMASA de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

El método de análisis utilizado fue el de Desplazamiento de Líquidos utilizando Hidróxido de Sodio (NaOH).

El procedimiento consistió en utilizar una solución concentrada de NaOH de 15 gr/lit. A medida que el biogás pasaba a través de esta solución de pH alto, el CO₂ del biogás se convirtió en carbonato y fue absorbido dentro del líquido.

Únicamente el gas metano pasó a través de la solución y un volumen equivalente fue impulsado afuera de la botella de *Mariotte*. El líquido desplazado se midió en un cilindro graduado y se pesó. Posteriormente se determinó su densidad y se calculó el volumen.

6.7 Eficiencia de estabilización de RSU

6.7.1 Calidad de lixiviado

Para la obtención de las muestras de lixiviado se tomó una cantidad de aproximadamente 10 kg de cada sustrato en la alimentación de los digestores.

Luego dicha muestra fue depositada en un recipiente y dejada en reposo durante 12 días, tiempo en que se considera se ha agotado todo el oxígeno presente. El recipiente fue perforado en el fondo a fin de permitir el paso del lixiviado hasta un recipiente más pequeño que permitió la recolección de la muestra.

Fotografía 12.- Proceso de lixiviación de sustratos.



Una vez obtenida la muestra, ésta fue llevada hasta los Laboratorios Ambientales del PIENSA donde se analizaron los siguientes parámetros:

A. Potencial Hidrógeno (pH)

Se determinó por el Método Potenciométrico (4500-H+) establecido en el *Standard Methods 21st edition, 2000*.

B. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Método Analítico 5210 – B. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

C. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Método Analítico 5220 – C. *Standard Methods 21st edition*, 2000.

D. Nitrógeno Total Kjeldahl

Método Indirecto. Obtenido de la sustracción entre Nitrógeno total y Nitrato más Nitrito.

E. Fósforo Total

Método Analítico 4500 - C. *Standard Methods 21st edition*, 2000.

F. Potasio

Método Analítico 3500 - C. *Standard Methods 21st edition*, 2000.

6.7.2 Calidad del biol

La muestra de Biol fue recolectada directamente de la descarga de los biodigestores en la pila de biol. Las muestras fueron analizadas en los Laboratorios Ambientales del PIENSA donde se examinaron diferentes parámetros de calidad tanto para el efluente líquido como para los lodos.

Fotografía 13.- Recolección de muestra de biol



➤ **Efluente líquido**

A. Potencial Hidrógeno (pH)

Se determinó por el Método Potenciométrico (4500-H+) establecido en el *Standard Methods 21st edition, 2000*.

B. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Método Analítico 5210 – B. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

C. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Método Analítico 5220 – C. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

➤ **Lodos**

A. Nitrógeno Total Kjeldahl

Método Indirecto. Obtenido de la sustracción entre Nitrógeno total y Nitrato más Nitrito.

B. Fósforo Total

Método Analítico 4500 - C. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

C. Potasio

Método Analítico 3500 - C. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

D. Alcalinidad

Método Analítico 2320 - B. *Standard Methods 21st edition, 2000*.

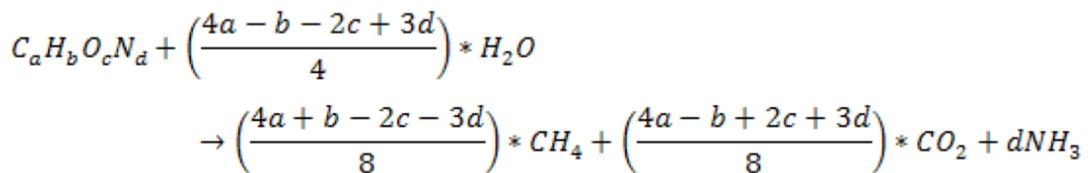
6.8 Poder energético de los RSU

Para estimar el potencial energético de los Residuos sólidos Urbanos se utilizó un modelo matemático es el desarrollado por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC.

Mediante este modelo se estimó el potencial energético de la biomasa como una función del metano generado a partir del carbono en la descomposición anaerobia y del Poder Calorífico Inferior (PCI).

La reacción global de descomposición del carbono orgánico se determinó mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 5



En el modelo se consideró que el metano se colecta sin pérdidas y el amoníaco es muy bajo, por tanto, su aporte al potencial energético es mínimo. La estructura del modelo se define como:

Ecuación 6

$$PE_{RSOU} = M_{RSOU} * FO * FCB * FCM * \frac{16}{12} * PCI_{CH_4}$$

Donde,

PE_{RSOU} = Potencial energético de biomasa de RSOU (TJ/año)

M_{RSOU} = Masa de RSOU generados (ton/año)

FO = Fracción orgánica de los residuos de rápida biodegradación, expresado como ton Materia Orgánica / ton Materia Total

FCB = Fracción de carbono de los residuos de rápida biodegradación, expresado como ton carbono biodegradable/ ton materia orgánica de rápida biodegradación.

FCM = Fracción de carbono biodegradado a metano, expresado como t carbono degradado a CH₄/ton materia biodegradable.

PCI_{CH₄} = Poder calorífico inferior del metano (TJ/ton masa seca)

6.9 Reducción de Emisiones de GEI's

Para estimar las reducciones de GEI's mediante el aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Orgánicos se monitoreó la producción diaria de biogás y se caracterizó calculando el volumen de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) para cada uno de los sustratos de alimentación.

La reducción de las emisiones de GEI's fue determinada por la cantidad de energía generada aprovechando el biogás y por el desplazamiento de combustibles fósiles.

Considerando los objetivos del estudio se seleccionó el escenario B3 – T2.

El cálculo de las reducciones de ton CO₂ se hizo utilizando la siguiente expresión matemática:

Ecuación 7

$$EB_{CH_4,y} = PCG_{CH_4} * D_{CH_4} * FCM * B_0 * VS_{LT,y} * M_{RSOU}$$

Donde

EB_{CH₄,y}: Emisiones de línea base en el año y

PCG_{CH₄}: Potencial del Calentamiento Global (PCG) del metano

D_{CH₄}: Densidad del metano (ton/m³)

FCM: Fracción de carbono biodegradado a metano, expresado como ton carbono degradado a CH₄/ton materia biodegradable.

B₀: Producción máxima potencial de metano de los sólidos volátiles generados (m³CH₄/kgSV)

M_{RSOU} = Masa de RSOU generados (ton/año)

V_{SLT,y}: Fracción de sólidos volátiles (kgSV/ton masa seca)

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Residuos Sólidos Municipales en San Marcos

7.1.1 Muestra

De la aplicación del método descrito en la metodología se obtuvo un tamaño de muestra de 58 viviendas para el casco urbano del municipio de San Marcos. Ver Anexo 1.

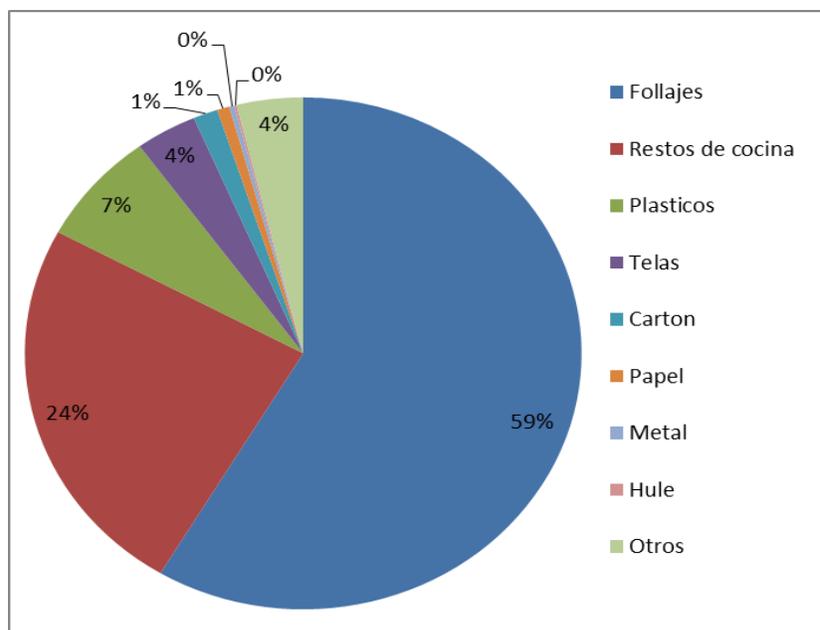
7.1.2 Producción

Según estudio de Caracterización de los Residuos Sólidos Municipales de San Marcos, la Producción Per Cápita (PPC) en el casco urbano del municipio de San Marcos es de 0.55 kg/hab/día, con un volumen total de generación de 79.70 m³/día.

7.1.3 Caracterización física

En el municipio de San Marcos el 88% del volumen de residuos sólidos corresponden a la Fracción Orgánica, compuesta mayormente por follajes o residuos de jardín, y restos de comida. Ver Gráfico 1.

Gráfico 1.- Clasificación de Residuos Sólidos Urbanos.



7.2 Caracterización físico química de sustratos

De medición de campo y de los análisis de laboratorio se obtuvieron los parámetros que definen la composición física química de los sustratos utilizados. Ver Análisis de Laboratorios en Anexo 2 y 3.

Cuadro 7.- Características físico química de sustratos

Parámetro	Unidad	Sustrato	
		FORSU	Cáscara de Pitahaya
Densidad Suelta	Kg/m ³	650.99	367.43
Potencial Hidrógeno	pH	3.89	5.27
Humedad	%	90.10	43.21
Alcalinidad	g/Kg	<0.0002	8.62
Materia Seca	%	19.53	90.61
Materia Volátil	%	90.43	42.59
Cenizas	%	9.57	48.02
Nitrógeno Total	g/Kg	0.0012	1.78
Carbono Total	g/Kg	0.17	30.56
Fósforo Total	gP ₂ O ₅ / %MS	0.00017	4.28
Materia Orgánica	g/Kg	0.32	57.67

7.3 Parámetros de operación de la planta

A continuación se presentan los valores de Temperatura y pH a los cuales operaron los digestores durante el periodo de monitoreo. Ver Cuadros 8 y 9.

Cuadro 8.- Valores de Temperatura y pH. Sustrato 1

Sustrato 1: Cáscara de Pitahaya			
N°	Fecha	T°C	pH
1	10/09/2013	26	-
2	11/09/2013	24	-
3	12/09/2013	24	-
4	13/09/2013	24	-
5	14/09/2013	24	-
6	16/09/2013	24	-
7	17/09/2013	25	-
8	18/09/2013	24	-
9	19/09/2013	24	-
10	20/09/2013	24	7.1
11	21/09/2013	26	7.3
12	23/09/2013	25	7.4
13	24/09/2013	24	7.2
14	25/09/2013	24	7.3
15	26/09/2013	24	7
16	27/09/2013	25	7
17	28/09/2013	25	7.3
18	30/09/2013	25	7.3
19	01/10/2013	25	7.4
20	02/10/2013	25	7.7
21	03/10/2013	24	7.4
22	04/10/2013	25	7.4
23	05/10/2013	26	7.4
	PROMEDIO	25	7.3

Cuadro 9.- Valores de Temperatura y pH. Sustrato 2

Sustrato 2: RSU separados			
N°	Fecha	T°C	pH
1	08/10/2013	21	7.5
2	09/10/2013	26	7.5
3	10/10/2013	27	7.4
4	11/10/2013	27	7.5
5	12/10/2013	25	7.4
6	14/10/2013	26	7.5
7	15/10/2013	25	7.4
8	16/10/2013	25	7.5
9	17/10/2013	25	7.4
10	18/10/2013	25	7.6
11	19/10/2013	26	7.5
12	21/10/2013	25	7.4
13	22/10/2013	25	7.5
14	23/10/2013	25	7.5
15	24/10/2013	24	7.6
16	25/10/2013	25	7.5
17	26/10/2013	25	7.6
18	28/10/2013	24	7.5
19	29/10/2013	25	8.4
20	30/10/2013	25	8.5
21	31/10/2013	24	7.6
22	01/11/2013	25	7.7
23	02/11/2013	25	7.7
24	04/11/2013	26	7.7
25	05/11/2013	25	7.6
26	06/11/2013	25	7.7
27	07/11/2013	24	7.8
28	09/11/2013	24	7.7
	Promedio	25	7.6

Los valores de temperatura a la cual operaron los digestores durante el periodo de estudio varían entre los 24 y 26 grados, lo que corresponde a un rango mesofílico. Sin embargo este valor se considera bajo dado que el biodigestor se encuentra bajo tierra, de lo cual se infiere que no existen variaciones de

temperatura significativas que pudieran atribuirse a la estructura de concreto de la cual están construidos ni a su ubicación subterránea.

El pH promedio para el sustrato 1 fue de 7.3 y 7.6 para el sustrato 2. Este parámetro se encuentra dentro del rango normal según la literatura consultada. La homogeneidad del pH a lo largo del tiempo de muestreo puede deberse a que se mantuvo constante el tipo y concentración del sustrato.

- **Velocidad de Carga Orgánica**

El valor de VCO durante el monitoreo fue la misma para cada sustrato dado que el caudal y la concentración de alimentación se mantuvo constante para cada uno de ellos.

Sustrato 1

$$VCO = \frac{(0.32m^3 / día)(2.01kgSV / m^3)}{10m^3} = 0.06kgSV / m^3 * día$$

Sustrato 2

$$VCO = \frac{(0.30m^3 / día)(2.10gSV / m^3)}{10m^3} = 0.07kgSV / m^3 * día$$

A pesar que el peso de la muestra del Sustrato 1 fue el doble que para el sustrato 2 (250 lbs y 120 lbs respectivamente), la Velocidad de Carga Orgánica es similar entre ellos, debido a que esta diferencia se ve compensada por la variación entre las densidades de las muestras.

Además el Sustrato 1 contiene casi el doble de Sólidos Volátiles por Kg de peso que el Sustrato 2. (90.10 % SV y 42.59% SV respectivamente).

- **Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)**

Sustrato 1

$$TRH(días) = \frac{10m^3}{0.31m^3 / día} = 32.26días$$

Sustrato 2
$$TRH(días) = \frac{10m^3}{0.30m^3 / día} = 33.33días$$

El TRH fue el mismo durante el periodo de monitoreo para cada sustrato. Esto se debió a que se mantuvo constante el caudal de alimentación de los digestores, además que aunque el peso de alimentación del sustrato es significativamente variable, también lo es la densidad de los mismos.

Los valores de TRH para ambos sustratos se encuentran bastante aproximados al estimado en el diseño de la planta.

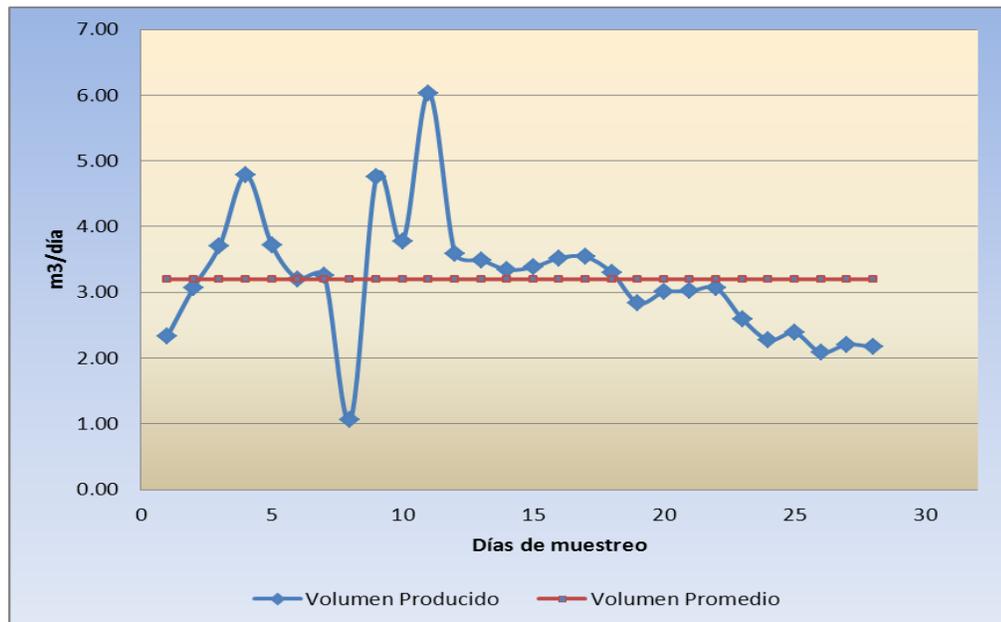
7.4 Producción de biogás

Para cada sustrato se registró el volumen diario de biogás generado por cada digestor. Ver gráficos 2 y 3. Ver registro de producción en Anexos 3 y 4.

Gráfico 2.- Producción de biogás por digestor. Sustrato 1



Gráfico 3.- Producción de biogás por digestor. Sustrato 2



Para el sustrato 1 se obtuvo una producción promedio de 3.47 m³/día para el sustrato 1 y de 3.20 m³/día para el sustrato 2. Esto equivale a una generación de 0.34 m³CH₄/kgSV y 0.24 m³CH₄/kgSV respectivamente. Expresada en función de la Materia Seca de alimentación se obtiene una producción de 0.31 m³CH₄/kgMS y 0.10 m³CH₄/kgMS para el Sustrato 1 y 2 respectivamente.

A pesar que la cáscara de Pitahaya tiene una humedad mayor al 90%, el potencial de generación de metano se ve ampliado considerablemente por su alto contenido de Sólidos Volátiles (90.43%) en comparación con los RSU (42.59%).

Se utilizó el método del Balance de Masas para estimar el potencial de generación de metano de los sustratos utilizados y luego contrastarlos con los volúmenes de biogás registrados en la operación de la planta obteniéndose que el potencial de generación para ambos sustratos sea de 0.48 m³CH₄/kgMS. Ver Anexo 6 y 7.

De lo anterior se deduce que en la operación de la planta solo se está obteniendo un 64.58% y 21.5% para los Sustratos 1 y 2 respectivamente, del total de biogás que podría generarse en condiciones óptimas de operación.

7.4.1 Caracterización de biogás

Se realizó el análisis para obtener el porcentaje de metano contenido en el biogás producido según el sustrato de alimentación obteniéndose los resultados mostrados en los gráficos Gráfico 4 y 5 para el sustrato 1 y 2 respectivamente.

Gráfico 4.- Producción de metano. Sustrato 1

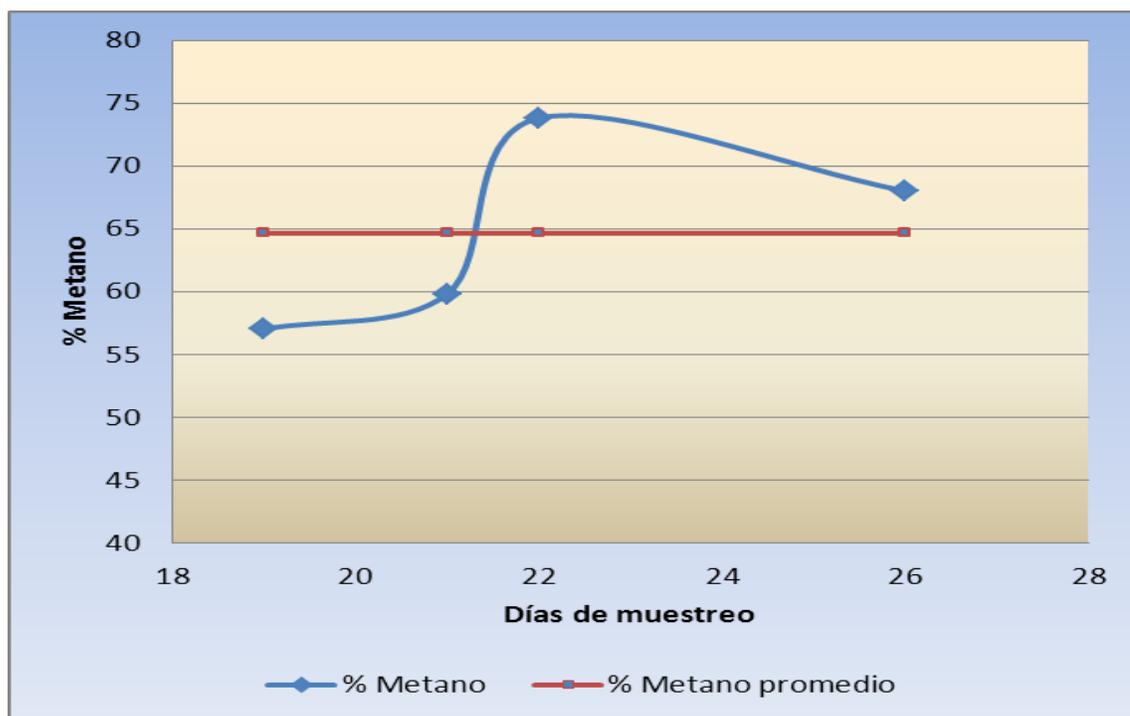
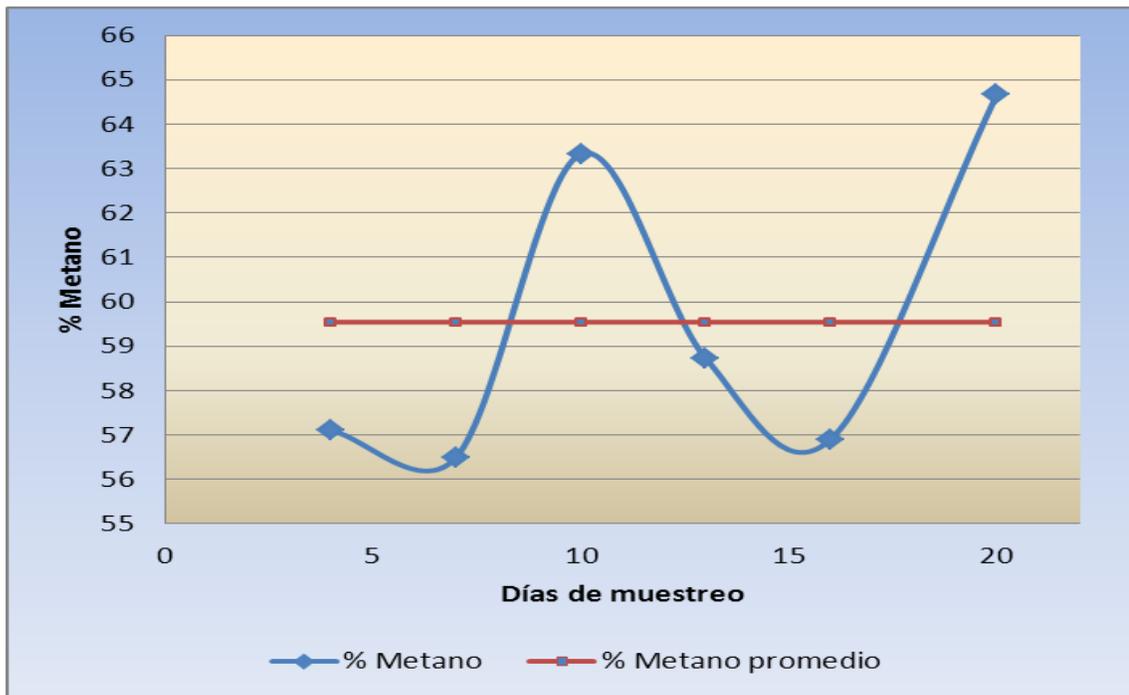


Gráfico 5.- Producción de metano. Sustrato 2



En promedio el porcentaje de metano para el sustrato 1 es de 64.6 % y de 59.5 % para el sustrato 2.

Cuadro 10.- Porcentaje de metano en biogás generado.

Sustrato 1		Sustrato 2	
Días	% metano	Días	% metano
19	57.0	4	57.1
21	59.8	7	56.5
22	73.8	10	63.3
26	68.0	13	58.7
Promedio	64.6	16	56.9
		20	64.7
		Promedio	59.5

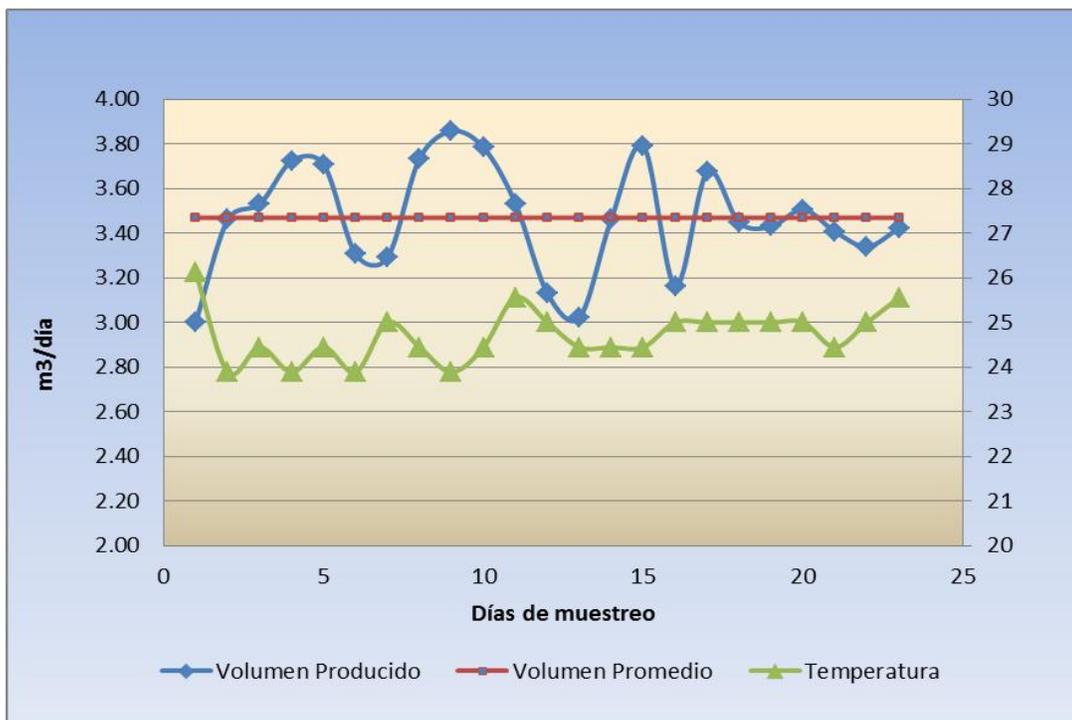
Este valor es similar a lo reportado en la bibliografía y comparado con los resultados del Balance de Masas, el porcentaje de metano del biogás medido se encuentra por encima del estimado que fue de 52.83% y 53.42% para el sustrato 1 y 2 respectivamente.

Esto se explica en el hecho de que los porcentajes de los elementos contenidos en los sustratos utilizados fueron obtenidos de los registros bibliográficos y no directamente de análisis de laboratorios, precisamente a falta de de equipos e insumos adecuados.

7.4.2 Relación entre producción de Biogás y temperatura

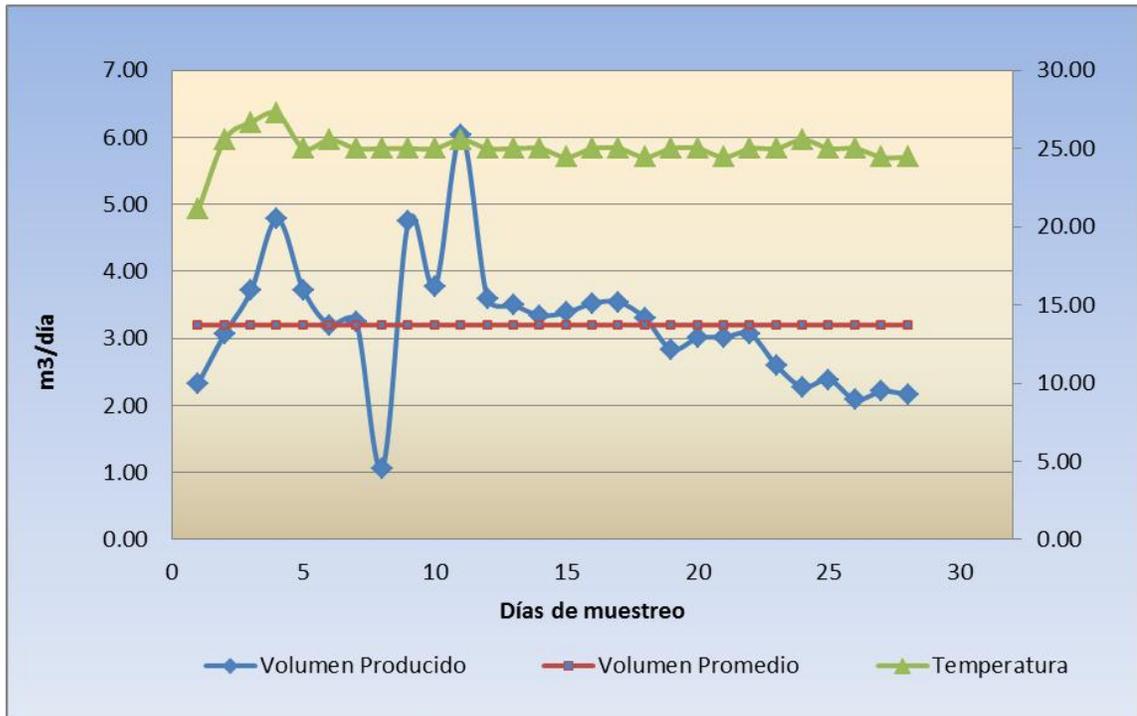
En los gráficos 6 y 7 se muestra la relación entre la producción de metano y el valor de temperatura de los digestores para ambos sustratos.

Gráfico 6.- Producción de metano vs temperatura. Sustrato 1



Para ambos sustratos de valores similares de temperatura. Sin embargo, dado la baja cantidad de datos registrados no se pudo establecer una correlación entre la producción de biogás y las variaciones de temperatura.

Gráfico 7.- Producción de metano vs temperatura. Sustrato 2



7.4.3 Relación entre producción de Biogás y temperatura

Así mismo se hizo la relación entre el volumen de metano generado y pH de operación de los digestores. Sin embargo, al igual que con la temperatura no fue posible establecer una correlación entre estos dos parámetros.

En los gráficos 8 y 9 se muestra la relación para los dos sustratos utilizados.

Gráfico 8.- Producción de metano vs pH. Sustrato 1

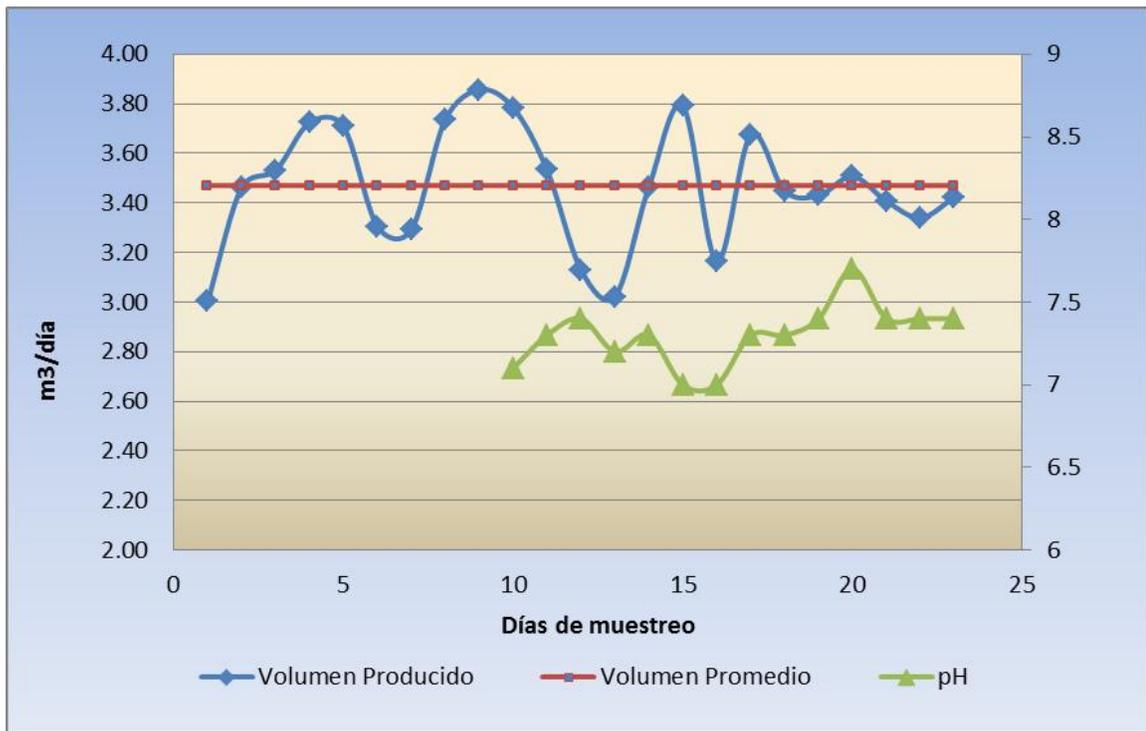
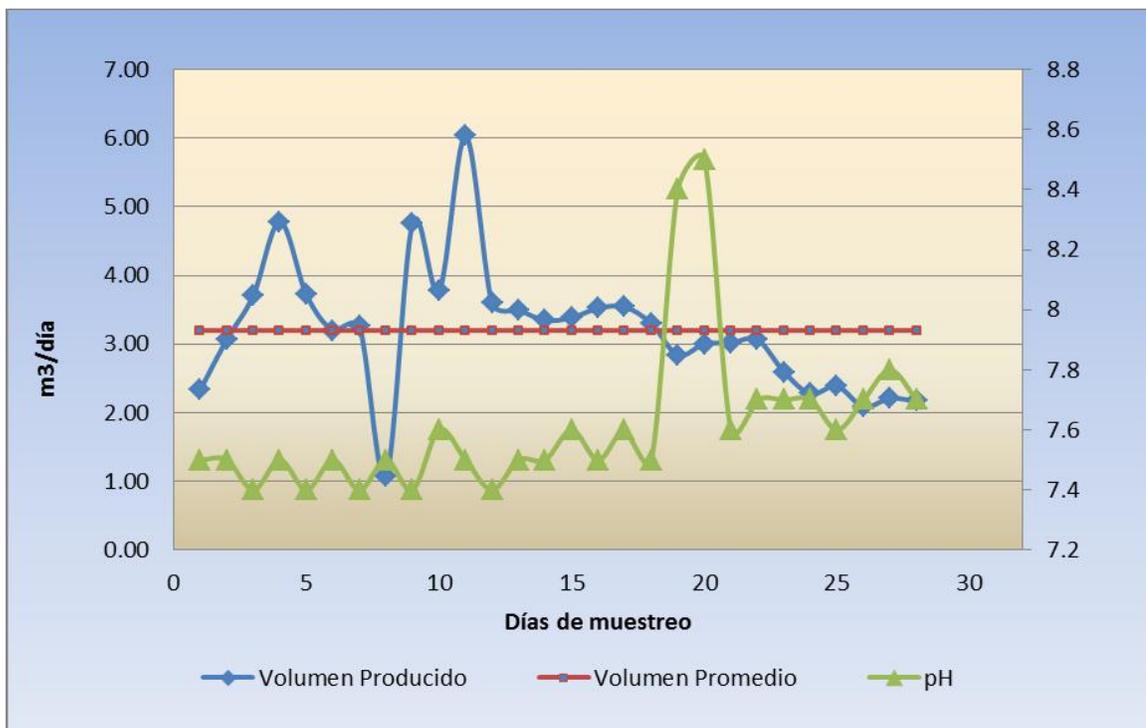


Gráfico 9.- Producción de metano vs pH. Sustrato 2



7.1 Estabilización de RSU

Se monitoreó la eficiencia en la estabilización de los RSU tratados en los bio digestores. Para ello se determinó la calidad de los lixiviados producidos por los sustratos y la calidad del efluente líquido proveniente de los reactores.

Los parámetros estudiados fueron DQO y DBO_5 ya que se consideran como parámetros representativos que indican la calidad del efluente y que condiciona su reutilización o vertido.

7.1.1 Efluente líquido

➤ Demanda Química de Oxígeno

Para el sustrato 1 se obtuvo una DQO de entrada de 21,792 mg/lit y de 7,692 mg/lit en el efluente, lo que significa una eficiencia de remoción promedio de 65%. Ver Gráficos 10 y 11.

Gráfico 10.- Concentración de DQO salida y entrada. Sustrato 1



Gráfico 11.- Remoción de DQO. Sustrato 1

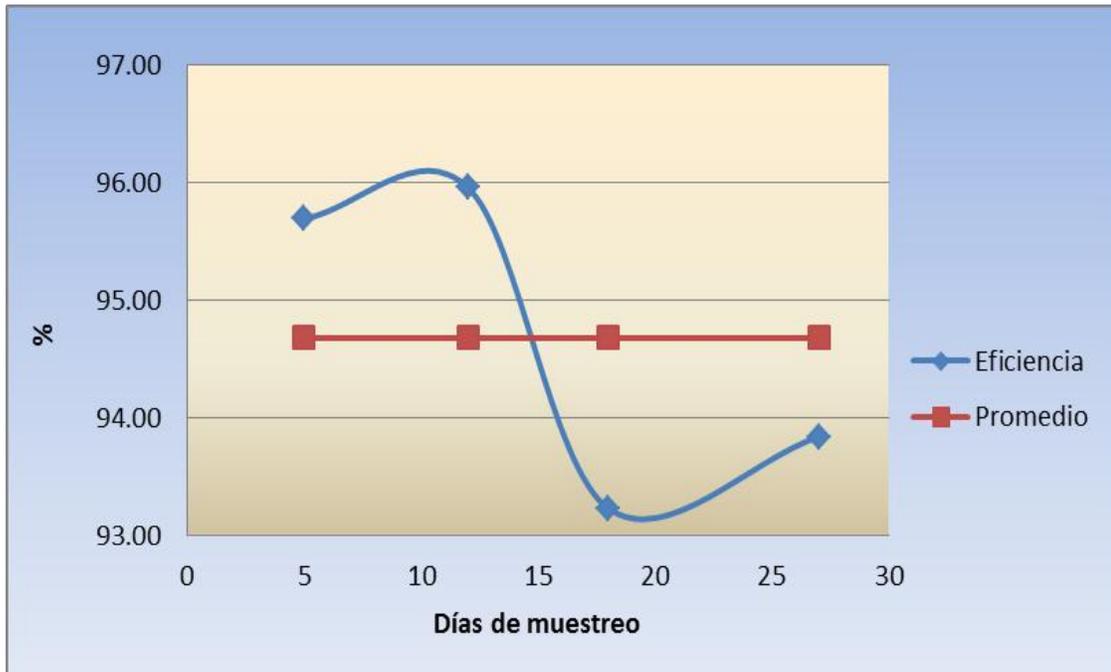


De igual forma, para el sustrato 2 se obtuvo una DQO de entrada de 140,344 mg/lit y de 7,462 mg/lit en el el efluente, lo que significa una eficiencia de remoción promedio de 95%. Ver Gráfico 12 y 13.

Gráfico 12.- Concentración de DQO salida y entrada. Sustrato 2



Gráfico 13.- Remoción de DQO. Sustrato 2



Las variaciones de este parámetro según sustrato se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 11.- Cuadro comparativo de concentraciones y eficiencia de remoción de DQO.

Parámetro: DQO					
Afluente (mg/lit)	Sustrato 1		Afluente (mg/lit)	Sustrato 2	
	Efluente (mg/lit)	Eficiencia (%)		Efluente (mg/lit)	Eficiencia (%)
21792	12442	43	140344	6042	96
	4740	78		5671	96
	7682	65		9496	93
	5903	73		8640	94
Promedio	7692	65	Promedio	7462	95

Las concentraciones de DQO en los lixiviados o afluente de los digestores varían ampliamente para ambos sustratos lo cual se justifica básicamente en la composición física de los sustratos. Sin embargo el valor del efluente es bastante similar lo que significa una mayor eficiencia de remoción de DQO para el sustrato 2.

A pesar de que las concentraciones de DQO para ambos sustratos se reducen significativamente, estas no cumplen con el Decreto 33 – 95 sobre Calidad de Vertidos de Efluentes provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, lo cual significa que debe aplicarse un tratamiento posterior para mejorar la calidad del efluente.

➤ **Demanda Bioquímica de Oxígeno**

En la DBO_5 las concentraciones en el afluente fueron de 10,175 mg/lt para el sustrato 1 y de 65144 mg/lt para el sustrato 2, manteniéndose siempre una diferencia considerable tal como se muestran en los gráficos 14 y 15.

Gráfico 14.- Concentración de DBO_5 salida y entrada. Sustrato 1

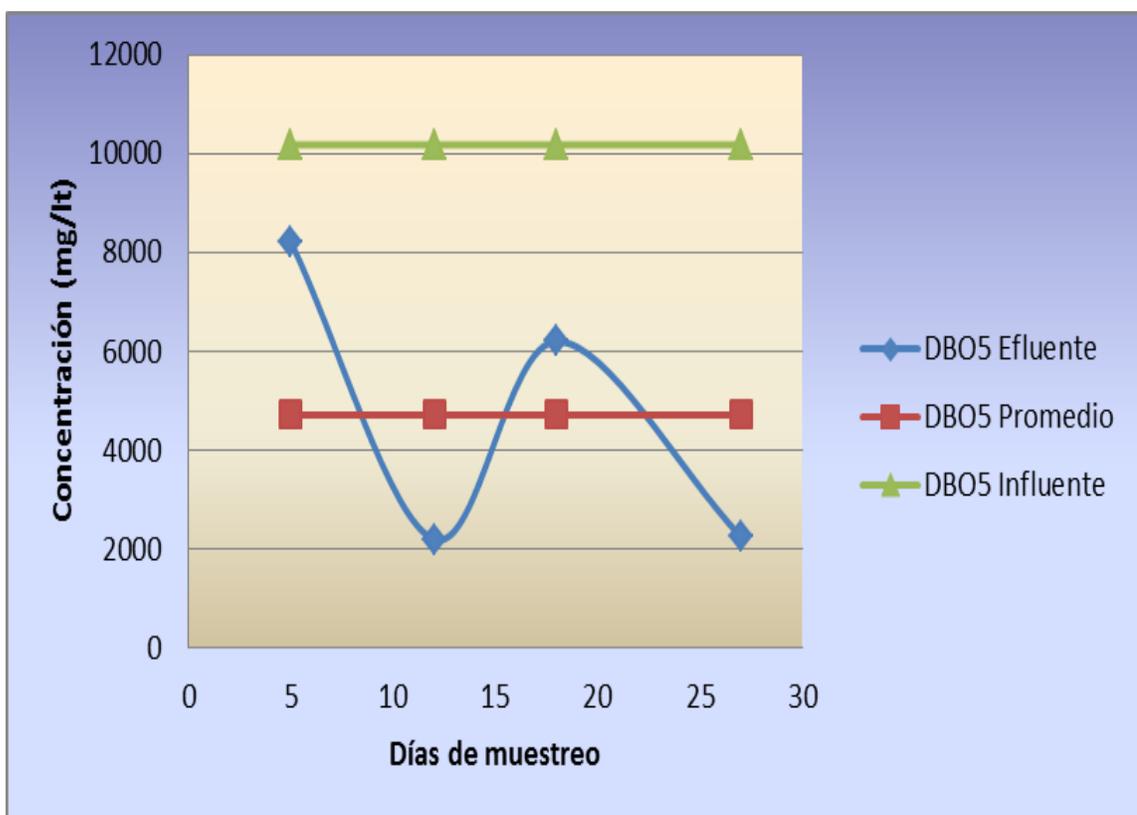
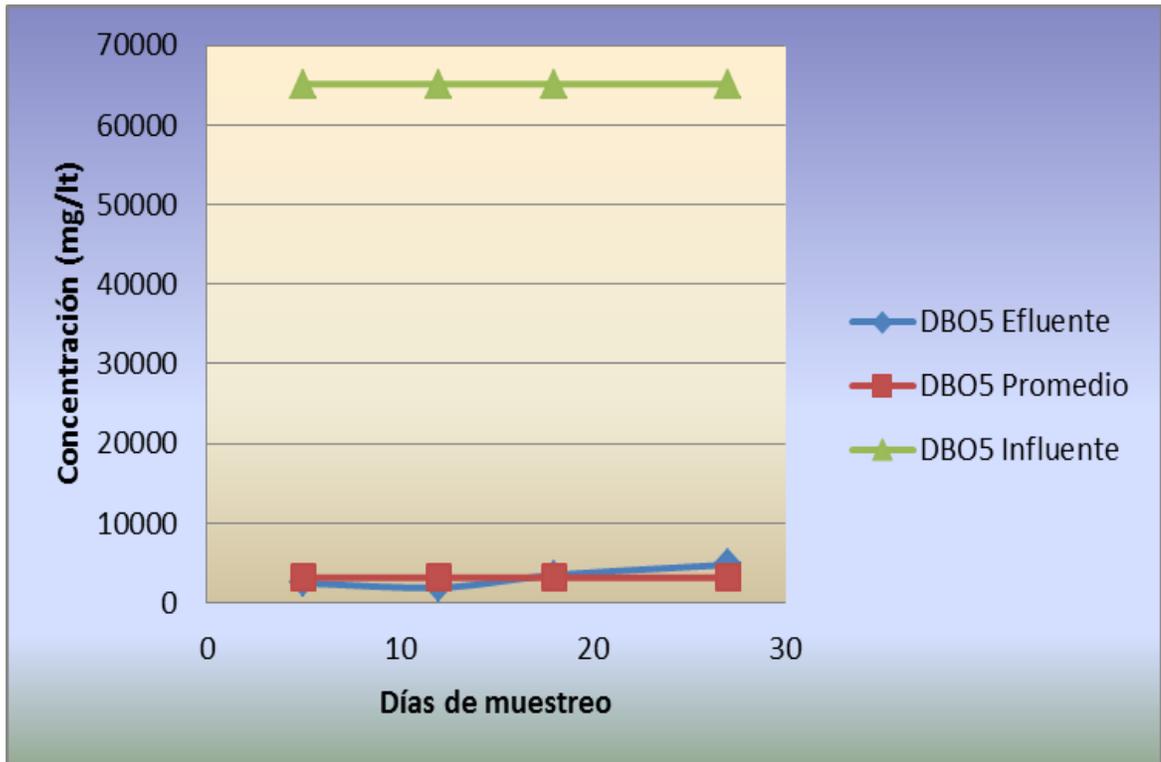


Gráfico 15.- Concentración de DBO₅ salida y entrada. Sustrato 2



Así mismo las concentraciones del efluente son similares lo cual significa una mayor eficiencia en la remoción de la DBO₅ para el sustrato 2 alcanzando un 95%, muy por encima del 54% de eficiencia demostrado para el sustrato 1. Ver Gráficos 16 y 17.

Gráfico 16.- Remoción de DBO₅. Sustrato 1

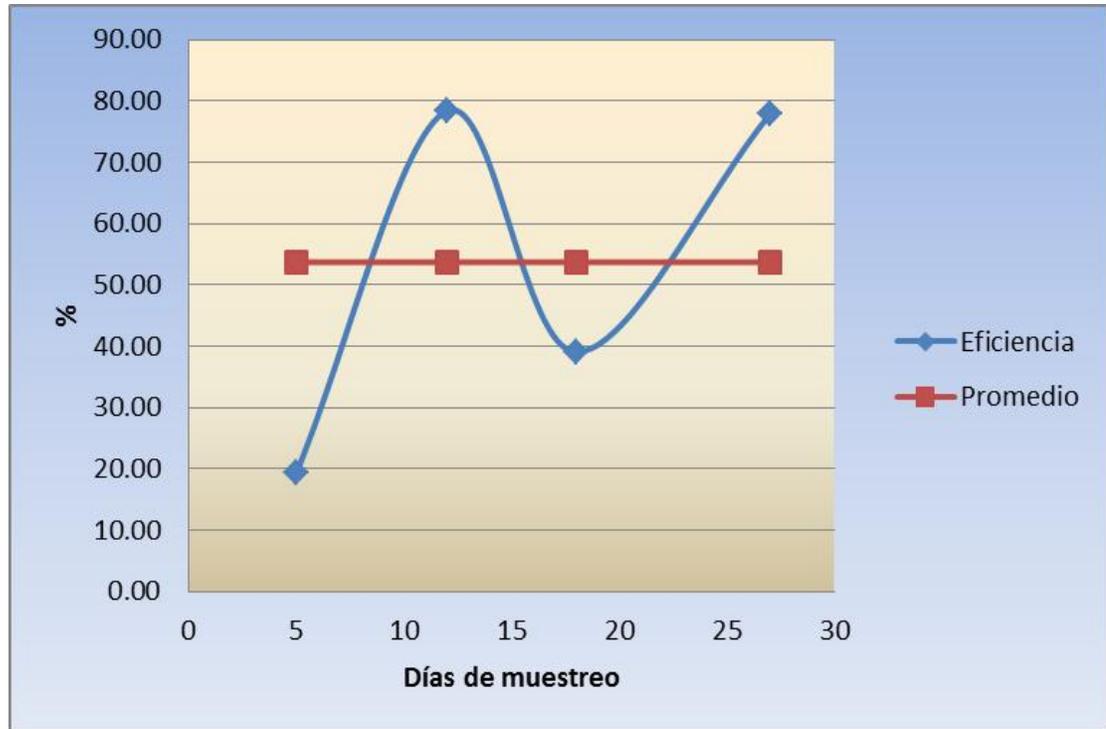


Gráfico 17.- Remoción de DBO₅. Sustrato 2



Cuadro 12.- Cuadro comparativo de concentraciones y eficiencia de remoción de DBO₅.

Parámetro: DBO ₅					
Sustrato 1			Sustrato 2		
Afluente (mg/lit)	Efluente (mg/lit)	Eficiencia (%)	Afluente (mg/lit)	Efluente (mg/lit)	Eficiencia (%)
10175	8200	19	65144	2500	96
	2200	78		1933	97
	6200	39		3495	95
	2250	78		4800	93
Promedio	4713	54	Promedio	3182	95

7.1.2 Lodos

Se realizaron análisis de laboratorios para determinar el contenido de nutrientes de los lodos producidos en el proceso de digestión anaerobia para ambos sustratos y en función de ellos hacer propuestas sobre el reuso o la correcta disposición final de los lodos. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 13. Contenido de nutrientes en lodos del biol.

	Nitrógeno Total (mg/lit)	Fósforo Total (mg/lit)	Potasio (mg/lit)
Sustrato 1	379.82	15.01	1460.00
	403.20	28.68	1245.00
	417.20	28.04	1130.00
Promedio	400.07	23.91	1278.33
Sustrato 2	525.00	64.54	1647.00
	441.90	82.60	2595.00
	425.80	24.08	1892.00
Promedio	464.23	57.07	2044.67

Según el análisis de los resultados, los lodos resultantes tienen un alto contenido nutricional que los convierten en una excelente alternativa para su uso como mejorador de los suelos en fincas aledañas a la planta o en los viveros de árboles frutales y maderables.

7.2 Poder energético de los RSU según sustrato

Se determinó el potencial energético para la cantidad de biomasa utilizada en la alimentación de los biodigestores para los dos sustratos analizados.

Sustrato 1

$$PE_{RSOU} = 41.48 \text{ton} / \text{año} * 1 * 0.48 * 0.52 * 16 / 12 * 0.01046 \text{TJ} / \text{ton sec a} = 0.144 \text{TJ} / \text{año}$$

$$PE_{RSOU} = 40.11 \text{MW} - \text{hr} / \text{año}$$

Sustrato 2

$$PE_{RSOU} = 19.91 \text{ton} / \text{año} * 1 * 0.48 * 0.53 * 16 / 12 * 0.125 \text{TJ} / \text{ton sec a} = 0.071 \text{TJ} / \text{año}$$

$$PE_{RSOU} = 19.62 \text{MW} - \text{hr} / \text{año}$$

Con la planta operando en óptimas condiciones podrían generarse 40.11 MW-hr/año a partir de la cáscara de Pitahaya y 19.62 MW-hr/año de energía utilizando residuos domésticos orgánicos.

Si se proyectara utilizar el total de los restos de comida generados en el casco urbano del municipio se trataría un 24% del total generado, equivalente a 1601 toneladas por año. Para esta cantidad de sustrato el potencial energético sería de 1548.14 MW-hr/año.

7.3 Reducción de Emisiones de GEI's según sustratos

Para cada sustrato se calculó el potencial de reducción de emisiones de GEI's, resultando lo siguiente:

Sustrato 1

$$EB_{CH_4} = 21 * 0.718 \text{kg} / \text{m}^3 * 0.52 * 0.34 \text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{kgSV} * 41.48 \text{ton} / \text{año} * 0.901 * 1000 \text{kgSV} / \text{tonmasa sec a}$$

$$EB_{CH_4} = 99,630 \text{ ton } CH_4 / \text{ año}$$

Sustrato 2

$$EB_{CH_4} = 21 * 0.718 \text{ kg} / \text{ m}^3 * 0.53 * 0.24 \text{ m}^3 CH_4 / \text{ kgSV} * 19.91 \text{ ton} / \text{ año} * 0.426 * 1000 \text{ kgSV} / \text{ tonmasa sec a}$$

$$EB_{CH_4} = 16,267 \text{ ton } CH_4 / \text{ año}$$

También se hizo la estimación considerando la posibilidad el tratamiento del total de residuos de comida producidos en la ciudad de San Marcos, para lo cual resulta:

$$EB_{CH_4} = 21 * 0.718 \text{ kg} / \text{ m}^3 * 0.53 * 0.24 \text{ m}^3 CH_4 / \text{ kgSV} * 9121 \text{ ton} / \text{ año} * 0.426 * 1000 \text{ kgSV} / \text{ tonmasa sec a}$$

$$EB_{CH_4} = 745,135.56 \text{ ton } CH_4 / \text{ año}$$

VIII. CONCLUSIONES

a. Caracterización físico – química

La producción per cápita de RSU en el municipio de San Marcos es de 0.55 kg/hab/día, para una producción anual de 1601 ton/año. Del total generado el 24.3% corresponde a restos de comida y cáscaras, los cuales por ser fácilmente biodegradables tienen un alto potencial para ser tratados mediante digestión anaerobia.

De los dos sustratos utilizados durante el monitoreo, la Pitahaya posee una humedad del 90%, lo cual es consecuente dado su alta densidad de 650.99 kg/m^3 . En el caso de los RSUO la humedad es del 43.21% con una densidad de 367.43 kg/m^3 , Así mismo el porcentaje de Materia Volátil de la cáscara de Pitahaya es de 90.1% y la de los RSUO es de 42.59%.

De los dos sustratos utilizados, el que presenta mayor potencial energético es la cáscara de Pitahaya, pues posee un alto valor de material volátil, es decir, de materia que puede ser estabilizada mediante el proceso de biodigestión.

b. Parámetros de operación y estabilización de RSU

Las unidades de biodigestión operan con valores de temperatura en un rango de 24-27 °C, que corresponde a un rango mesofílico. Los valores de pH de operación variaron de 7.0 – 8.5, manteniéndose sin variaciones significativas. Para ninguno de estos parámetros fue posible obtener una correlación directa con la eficiencia en la calidad y cantidad de biogás generado en el proceso de digestión anaerobia.

La Velocidad de Carga Orgánica tiene valores similares para ambos dos sustratos es similar, teniendo un valor de $0.06 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{día}$ para la cáscara de Pitahaya y de $0.07 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{día}$ para los RSUO.

Con Tiempos de Retención Hidráulica de 32 días para el Sustrato 1 se obtuvieron valores de remoción de DQO y DBO₅ de 65 y 54% respectivamente. En el caso de los RSUO con un TRH de 33 días la remoción tanto de DQO como de DBO₅ fue del 95%.

El biol producido en los digestores tiene un alto valor nutritivo lo que lo vuelve un producto de enorme potencial para ser utilizado como bio fertilizante y para la recuperación y/o enriquecimiento nutricional de suelos dedicados a los cultivos agrícolas.

c. Generación de biogás y contenido de metano.

A pesar de las diferencias en las características físicas de los sustratos utilizados, la producción de metano en ambos casos tiene valores cercanos, logrando generarse 0.34 m³CH₄/kgSV a partir de la digestión de cáscara de Pitahaya y 0.24 m³CH₄/kgSV. Sin embargo esto significa un bajo aprovechamiento del potencial de generación de metano de ambos sustratos, ya que solo se aprovecha el 65% y 22% del potencial calculado. Esto se debe fundamental a las deficientes condiciones de operación de la planta, fundamentalmente en el triturado y mezcla de los sustratos.

De lo anterior se infiere que la digestión de cáscara de Pitahaya es más eficiente en cuanto a la generación de metano, alcanzando una producción superior al de los RSU, en un 43%.

Para los dos sustratos el porcentaje de metano contenido el biogás producido es considerablemente mayor al estimado teóricamente, obteniéndose valores de 65% y 59%, siendo el valor estimado del 53%.

d. Potencial energético

El uso de la cáscara de Pitahaya como sustrato en la alimentación de los bio digestores representa un potencial de 0.114 TJ/año, que de ser aprovechado para la

co generación de energía eléctrica representa un potencial de 40.11 MW-hr/año. En cambio para los RSU el potencial energético es de 0.07 TJ/año, significando una capacidad de generar 19.62 MW-hr/año.

Estos resultados son consecuentes con las características físico – químicas de los sustratos, especialmente con el contenido de materia volátil y humedad.

e. Beneficios ambientales

Las reducciones en las emisiones de GEI's son bastante considerables alcanzando las 817 tonCH₄/ton Materia Seca, lo cual permite validar el beneficio ambiental de la digestión anaerobia como una tecnología limpia para el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos.

La digestión anaerobia es una alternativa viable desde el punto de vista ambiental, puesto que permite aprovechar energéticamente la biomasa de los RSU, constituyéndola en una fuente de energía renovable que reduzca y/o evite las emisiones de GEI's responsables del calentamiento global.

IX. RECOMENDACIONES

- Para optimizar el uso de los DPH para la estabilización y aprovechamiento energético de los RSUO es necesario garantizar las condiciones mínimas de operación, principalmente en cuanto a la trituración y mezcla de los sustratos. Para ello es necesario garantizar el servicio de energía eléctrica, cualquiera que sea su fuente, para poner en funcionamiento las trituradoras existentes.
- Debe ponerse especial atención en considerar los requerimientos en cuanto a la cantidad de materia orgánica necesaria para la alimentación de los biodigestores, según el sustrato suministrado. Esto significa realizar los cálculos debidos del Volumen de Carga Orgánica preciso para mantener operando los biodigestores a su máxima eficiencia.
- En caso de que la alimentación sea con RSOU, es de vital importancia garantizar la separación en origen que permita contar con un sustrato de mejor calidad que garantice su aprovechamiento óptimo en la generación del biogás. Esto implica afianzar más las intervenciones de las instituciones involucradas tanto en el Servicio de Recolección como en la operación de la Planta de Biogás.
- A pesar de la eficiencia de los DPH en la estabilización de los RSU, se debe valorar a profundidad la viabilidad técnico - financiera del uso del agua limpia para la mezcla de la alimentación, pues eso significa la generación de aguas residuales que para ser vertidas deben cumplir a cabalidad con las normas existentes.
- Tanto el efluente líquido como los lodos presentes en el biol pueden ser reutilizados en la agricultura. Sin embargo, deben tomarse las medidas adecuadas para su uso considerando la necesidad de reducir al mínimo el potencial de contaminación que estos poseen sobretodo de las aguas subterráneas.

- En caso de que el aprovechamiento del biol no pueda llevarse a cabo debe construirse un sistema de tratamiento que permita reducir los valores de DBO₅, DQO y nutrientes a niveles aceptables según lo estipulado en la legislación correspondiente.
- Es necesario ampliar el estudio considerando la optimización de la Carga Orgánica alimentada para obtener la mayor cantidad de metano posible; utilizando como referencia los valores de VCO calculados para los sustratos objetos de este estudio. Incluso puede estudiarse la posibilidad de utilizar una combinación de ambos sustratos en la alimentación de los digestores.
- En caso de ampliarse el estudio, se recomienda ampliar el número de registros de los parámetros de operación de los biodigestores (pH, temperatura y producción de biogás), a fin de poder establecer un criterio de correlación entre estas variables.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Badami, M., Mittica, A., y Poggio, A. (2008). *MSM Incineration Capacity Evaluations for the province of Turín (Northern Italy)*. 16th Annual North American Waste to Energy Conference, Pennsylvania.
- Breure, A. M. (1986). *Hydrolysis and acidogenesis fermentation of protein and carbohydrates in anaerobic ewaste waster treatments*. Alblasserdam.
- BUN-CA, U. N. (2002). *Manuales de Energías Renovables: BIOMASA*. San José, Costa Rica.
- Carneiro, T. F. (2005). *Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudios de las variables en el proceso de arranque y estabilización del bio-reactor*. Universidad de Cádiz, Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos Y Tecnologías del Medio Ambiente, Cádiz.
- Carneiro, T. F., Fernández, L., Pérez García, M., Romero García, L., Álvarea Gallego, C., y Sales, D. (2004). *Biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos: proceso SEBAC*. Recuperado el 15 de Abril de 2013, de Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissertacoes/8_foster_fernandez_perez_romero_sales.pdf
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (s.f.). *Potencial de Recursos Energéticos de Nicaragua*. Recuperado el 24 de Mayo de 2013, de Instituto Nicaraguense de Energía: http://www.ine.gob.ni/DGE/mercado/CNE_energias_renovables.pdf
- González, R. (2013). *Informe Final Proyecto Piloto: Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos con Aprovechamiento Energético Integral en la Ciudad de San Marcos*. San Marcos.

- Hernández, H. E., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H., Cardona Ruiz, M., & Duarte Ortega, M. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Bogotá.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2010). *Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos*. Buenos Aires.
- Madigan, M. T., y Jhon M. Martinko. (2006). *Brock Biology of Microorganisms* (11 ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Martínez, G. L. (2003). *Biodigestión Anaerobia de Residuos Sólidos Urbanos*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas (F.J.C.).
- McCarty, P. L. (1964). Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. *Public Works*, 107-111.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2012). *Balance Energético Nacional 2011*. Managua.
- Pozuelo, E. C., Flotats i Ripoll, X., & Bonmatí i Blasi, A. (s.f.). *Biogás y aprovechamiento de la Biomasa*. Universidad de Lleida.
- Rossin, A., Teixeira, P., Zepeda, F., y Acurio, G. (1997). *Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. (A. G. Brage, Ed.) Madrid: McGraw - Hill/Interamericana de España S.A.
- Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E., Verstrae, W., y Lissencs, G. (Noviembre de 2001). Solid waste digesters: Process Performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water Sciences Technology*, 91-102.

Xercavins, J., Cayuela, D., Cervantes, G., y Sabater, A. (2005). *Desarrollo Sostenible*. Catalunya: Ediciones Gráficas Rey.

XI. ANEXOS

Anexo 1.- Registro de peso y cálculo de PPC San Marcos.

No	Código	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	PPC
1	01LS	7.5	1.1	3.0	1.2	2.2	1.5	0.298
2	02DP	5.5	1.7	2.5	3.2	1.4	2.3	0.247
3	03AU	4.9	4.2	3.2	2.1	2.0	2.4	0.695
4	04RG	5.2	3.9	4.7	4.4	6.6	3.2	0.760
5	05LS	5.0	1.6	4.7	16.0	3.3	0.8	0.880
6	06AC	3.6	3.0	6.1	1.5	4.8	0.0	0.616
7	07LM	5.8	1.4	0.0	3.3	3.0	0.7	0.153
8	08WG	5.3	0.7	1.6	1.3	0.9	0.5	0.333
9	09VR	6.2	1.5	1.5	1.4	0.0	3.7	0.540
10	10AM	5.4	5.0	4.0	2.7	6.4	4.1	0.740
11	11IR	3.9	1.1	2.4	0.3	1.2	0.4	0.360
12	12DR	1.5	1.3	0.4	1.0	0.0	3.1	0.193
13	13MF	5.4	1.3	1.7	0.6	2.3	0.2	0.305
14	14OM	5.2	2.0	1.6	2.2	4.0	1.1	0.436
15	15CZ	5.1	2.6	2.1	1.2	3.6	1.8	0.377
16	16AR	3.9	0.5	3.5	0.0	5.1	0.2	0.372
17	17FB	2.1	1.6	6.3	7.5	0.8	2.1	0.610
18	18MH	5.5	2.3	2.1	5.4	2.4	3.0	0.608
19	19LL	4.1	0.8	21.9	3.2	9.9	0.8	1.046
20	20RA	6.9	1.2	1.5	0.6	1.7	0.9	0.169
21	21JP	3.8	1.6	2.4	0.6	2.4	2.2	0.263
22	22MM	2.5	0.4	0.5	2.3	0.8	1.2	0.104
23	23AG	2.1	1.1	1.9	0.0	3.6	2.4	0.360
24	24AJ	4.3	5.2	1.8	2.9	2.8	3.3	1.600
25	25BP	3.7	1.0	1.2	1.0	1.3	1.6	0.305
26	26EM	1.4	1.5	1.2	1.2	3.0	2.7	0.384
27	27JG	4.3	3.2	4.4	4.4	7.4	1.8	0.606
28	28JH	1.5	0.7	1.7	1.1	3.3	0.0	0.170
29	29RM	4.2	3.4	3.1	1.8	0.0	3.1	0.570
30	30AL	4.0	6.8	6.3	4.5	4.6	5.3	0.550
31	31LG	3.4	2.8	3.9	2.1	1.8	1.7	0.615
32	SM1	3.4	1.1	1.4	0.5	0.9	1.6	0.183
33	SM2	2.6	0.9	0.9	1.8	0.5	7.0	0.555
34	SM3	9.6	1.5	4.0	3.7	5.2	3.4	0.712
35	SM4	4.2	0.2	0.5	1.3	0.6	1.8	0.088
36	SM5	1.1	0.7	1.0	0.9	1.0	1.0	0.184

N°	Código	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	PPC
37	SM6	1.5	0.9	1.3	0.7	1.5	1.7	0.244
38	SM7	1.2	4.8	9.2	2.5	4.5	6.0	1.350
39	SM8	2.1	6.9	0.0	0.0	6.5	6.8	0.673
40	SM9	5.7	2.1	1.1	0.8	1.3	0.0	0.265
41	SM10	6.9	3.8	0.9	4.6	0.3	0.0	0.320
42	SM11	6.5	4.8	2.5	3.6	7.5	0.0	0.612
43	SM12	4.3	0.8	1.6	3.6	3.0	3.7	0.423
44	SM13	1.5	4.5	6.3	5.6	5.0	4.1	1.700
45	SM15	1.4	0.2	0.4	1.4	3.1	0.6	0.163
46	SM16	24.0	7.3	3.5	5.1	4.5	4.5	2.490
47	SM18	4.0	1.3	2.4	1.5	1.5	2.1	0.194
48	SM19	2.9	1.3	2.0	3.4	2.7	2.0	0.326
49	SM20	12.8	1.3	1.6	7.6	2.8	2.7	0.458
50	SM21	4.5	3.2	7.8	6.2	4.6	4.1	0.740
51	SM22	1.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.9	0.110
52	SM24	3.3	1.4	2.0	1.1	1.3	1.7	0.250
53	SM25	4.8	0.0	3.9	0.0	2.4	3.4	0.485
54	SM26	4.2	1.5	0.3	5.0	1.7	0.5	0.600
55	SM27	5.1	5.7	4.5	4.0	5.1	4.5	1.587
56	SM28	7.9	10.3	5.5	5.0	4.0	5.9	0.682
57	SM29	5.0	2.3	2.7	2.5	3.5	1.4	0.620
58	SM30	5.0	8.3	5.2	2.2	2.6	9.1	0.783
PPC (kg/hab/día)								0.55

Anexo 2.- Análisis de Laboratorio. Sustrato 1.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales



Laboratorio Ambiental

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-0101

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO		
Mario Fco. Castellón Zelaya		Dto. Hidraulica y Medio Ambiente		87463759		
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular		
Arlen Daniela González		Estudiante	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759		
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS *
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:				
17/10/2013	18/10/2013	28/10/2012	18/11/2013	1639	Dos (2)	
Fecha y Hora de Muestreo			17/10/2013; 10:45 am			
Muestreado por			Arlen Daniela González			
Supervisor de Muestreo en Campo			NR			
Fuente			Residuos Solidos			
Tipo de Muestra			Lixiviado de Residuos Solidos			
Observaciones de Ubicación			Planta Biogás de San Marcos Carazo			
Coordenadas			NR			
Codificación PIENSA			LA-1310-0716			
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *	
			Lixiviado de Residuos Solidos			
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	3.89		NE	
2540-A	Humedad	%	90.10		NE	
2320-B	Alcalinidad	g/kg	<0.0002		NE	
2540-B	Materia Seca	%	19.53		NE	
2540-E	Materia Volatil	%	90.43		NE	
2540-E	Cenizas	%	9.57		NE	
4500-B	Nitrogeno Total	g/kg	0.0012		NE	
5220-C	Carbono Total	g/kg	0.17		NE	
4500-C	Fosforo Total	g/%MS	0.00017		NE	
5220-C	Materia Organica	g/kg	0.32		NE	

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva, s al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.

SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


COORDINACION TÉCNICA
Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0301100

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0086

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad, Departamento		TELÉFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya			Dto. Hidráulica y Medio Ambiente		87463759
ATENCIÓN:			CARGO	EMAIL	CÉLULAR
Mario Fco. Castellón Zelaya			Estudiante	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS	
11/09/2013	12/09/2013	27/09/2013	03/10/2013	1608	Dos (2)
Fecha y Hora de Muestreo			11/09/2013; 10:50 am		
Muestreado por			Arlen Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluente Líquido		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			NR		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1309-0663		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluente Líquido		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.07		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno (5)	mg/l	8,200.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	12,441.64		NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	379.82		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	15.01		NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,460.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0087

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya		Planta Biogás. San Marcos Carazo		87463759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular
Arlen Daniela González		Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA
18/09/2013	19/09/2013	30/09/2013	03/10/2013	1613
Fecha y Hora de Muestreo			18/09/2013; 7:59 am	
Muestreado por			Arlen Daniela González	
Supervisor de Muestreo en Campo			NR	
Fuente			Efluente Líquido	
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual	
Observaciones de Ubicación			NR	
Coordenadas			NR	
Codificación PIENSA			LA-1309-0668	
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	Art. No. *
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.42	NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno (5)	mg/l	2,200.00	NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	4,740.15	NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	403.20	NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	28.68	NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,245.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta. SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency.

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0096

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya			Departamento Hidráulica y Medio Ambiente RUPAP		8746-3759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL		Celular
Erick Martínez		Estudiante	erickmarthdo@hotmail.com		8542-8870
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
24/09/2013	25/09/2013	05/10/2013	29/10/2013	1618	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			24/09/2013; 12:15 p.m		
Muestreado por			Erick Martínez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluente Líquido		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			NR		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1309-0681		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluente Líquido		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.11		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	6,200.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	7,682.39		NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	417.20		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	28.04		NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,130.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Límite de Detección que se especifica por parámetro. **NE**= No especificada en la Norma **NR**= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 **EPA** = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Paramo Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.



CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0098

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA Mario Fco. Castellón Zelaya			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento Departamento Hidráulica y Medio Ambiente RUPAP		TELÉFONO 87463759
ATENCIÓN: Arlen Daniela González			CARGO Tesisista	EMAIL mcastellonzelaya@yahoo.com	CÉLULAR 87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANÁLISIS	CADENA DE CUSTODIA
INGRESO: 03/10/2013	INICIO DE ANÁLISIS: 04/10/2013	FINAL DE ANÁLISIS: 16/10/2013	29/10/2013		1625
Fecha y Hora de Muestreo			03/10/2013, 8:00 am		
Muestreado por			Arlen Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluente Líquido		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			NR		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1310-0688		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluente Líquido		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.32		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	2,260.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5,902.91		NE
4500-B	Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/l	61.01		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	52.88		NE
3500-C	Potasio	mg/l	3,930.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta. SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Parame Aguilar
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI



Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente. el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0097

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya			Departamento Hidráulica y Medio Ambiente RUPAP		87463759
ATENCIÓN:			CARGO	EMAIL	Célular
Arlen Daniela González			Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					NUMERO DE MUESTRAS
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	
01/10/2013	02/10/2013	11/10/2013	29/10/2013	1623	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			01/10/2013; 9:30 am		
Muestreado por			Arlen Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluente Líquido		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			NR		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1310-0687		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluente Líquido		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	4.65		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	8,750.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	22,718.44		NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	420.00		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	96.05		NE
3500-C	Potasio	mg/l	3,400.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva, si al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95. EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0087

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya			Planta Biogás. San Marcos Carazo		87463759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL		Célular
Arlén Daniela González		Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com		87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS	
18/09/2013	19/09/2013	30/09/2013	03/10/2013	1613	Dos (2)
Fecha y Hora de Muestreo			18/09/2013; 7:55 am		
Muestreado por			Arlén Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Lixiviado		
Tipo de Muestra			Lixiviado		
Observaciones de Ubicación			NR		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1309-0669		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Lixiviado		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	4.26		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno (5)	mg/l	11,600.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	20,866.10		NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	219.22		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	87.80		NE
3500-C	Potasio	mg/l	3,110.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva s al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
 SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Páramo Aguilar
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

Telefax: (505) 2278-1462 • Teléfono: (505) 2270-5613 / 2270-1517 • Celular: 8866-6702 / 8866-6705
 Email: piensa@uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

00000123

Anexo 3.- Análisis de Laboratorio. Sustrato 2.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales



CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1310-0099

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento			TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya		Departamento Hidráulica y Medio Ambiente RUPAP			87463759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL		Célular
Arlen Daniela González		Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com		87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
10/10/2013	11/10/2013	23/10/2013	29/10/2013	1631	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			10/10/2013; 10:30 am		
Muestreado por			Arlen Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluente Líquido		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			Planta de Biogás de San Marcos		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1310-0705		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluente Líquido		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.14		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	2,500.00		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	6,041.70		NE
4500-B	Nitrogeno Total Kjeldahl	mg/l	71.13		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	11.62		NE
3500-C	Potasio	mg/l	2,460.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. * al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma. NR= No Reporta. SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95. EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


Ph.D. Leandro Parro Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-0101

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya			Dto. Hidraulica y Medio Ambiente		87463759
ATENCIÓN:			CARGO	EMAIL	Celular
Arlen Daniela González			Estudiante	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:			NUMERO DE MUESTRAS
17/10/2013	18/10/2013	28/10/2012	18/11/2013	1639	Dos (2)
Fecha y Hora de Muestreo			17/10/2013; 10:50 am		
Muestreado por			Arlen Daniela González		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Efluentes Líquidos		
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación			Planta Biogás de San Marcos Carazo		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1310-0717		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Efluentes Líquidos		
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.33		NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	1,933.30		NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5,671.01		NE
4500-B	Nitrogeno Total	mg/l	406.00		NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	22.12		NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,077.00		NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Limite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.

SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

COORDINACION

PhD. Leandro Páramo Aguilera

Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA - UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-00103

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya		Planta Biogás. San Marcos Carazo		87463759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular
Arlen Daniela González		Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA
24/10/2013	25/10/2013	06/11/2013	18/11/2013	1645
Fecha y Hora de Muestreo			24/10/2013; 12:50 md	
Muestreado por			Arlen Daniela González	
Supervisor de Muestreo en Campo			NR	
Fuente			Efluente Líquido	
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual	
Observaciones de Ubicación			NR	
Coordenadas			NR	
Codificación PIENSA			LA-1310-0723	
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	Rango o valor máximo permisible
			Efluente Líquido	Art. No. *
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	6.93	NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	3,495.00	NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	9,496.23	NE
4500-B	Nitrogeno Total	mg/l	33.13	NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	16.52	NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,227.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s. al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma. NR= No Reporta.
 SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente.

PHD. Leandro Páramo Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-00104

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Mario Fco. Castellón Zelaya		Planta Biogás, San Marcos Carazo		87463759
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Celular
Erick Martínez		Estudiante	mcastellonzelaya@yahoo.com	87463759
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA
31/10/2013	31/10/2013	12/11/2013	18/11/2013	1651
Fecha y Hora de Muestreo		31/10/2013; 1:30 pm		
Muestreado por		Erick Martínez		
Supervisor de Muestreo en Campo		NR		
Fuente		Efluente Líquido		
Tipo de Muestra		Agua Residual Puntual		
Observaciones de Ubicación		NR		
Coordenadas		NR		
Codificación PIENSA		LA-1310-0757		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	Art. No. *
			Efluente Líquido	
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	7.10	NE
5210-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	4,800.00	NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	8,640.00	NE
4500-B	Nitrogeno Total	mg/l	425.80	NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l	24.08	NE
3500-C	Potasio	mg/l	1,892.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva y al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

LABORATORIOS AMBIENTALES
COORDINACION TECNICA
Ph.D. Leandro Paramb Aquilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-00105

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Comunidad, Departamento		TELEFONO	
Mario Fco. Castellón Zelaya		Planta Biogás. San Marcos Carazo		8722-4370	
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL		
Arlen Daniela González		Estudiante	mcastellonzelaya@yahoo.com		
8722-4370					
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
04/11/2013	05/11/2013	15/11/2013	18/11/2013	1654	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo		04/11/2013; 7:50 am			Rango o valor máximo permisible
Muestreado por		Arlen Daniela González			
Supervisor de Muestreo en Campo		NR			
Fuente		Efluente Líquido			
Tipo de Muestra		Agua Residual Puntual			
Observaciones de Ubicación		NR			
Coordenadas		NR			
Codificación PIENSA		LA-1311-0760			Art. No. *
METODO SM // EPA		ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	
				Efluente Líquido	
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH		3.71	NE
5210-B	Oxígeno	mg/l		76,800.00	NE
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l		188,467.68	NE
4500-B	Nitrogeno Total	mg/l		441.90	NE
4500-C	Fosforo Total	mg/l		82.60	NE
3500-C	Potasio	mg/l		2,596.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva s al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los métodos solicitados por el cliente

LABORATORIOS AMBIENTALES
 COORDINACION TECNICA
 Ph.D. Leandro Parro Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1311-00102

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO		
Mario Fco. Castellón Zelaya		Planta Biogás. San Marcos Carazo		87463759		
ATENCIÓN:	CARGO	EMAIL		Celular		
Arlen Daniela González	Tesista	mcastellonzelaya@yahoo.com		87463759		
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO						
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS	
21/10/2013	22/10/2013	01/11/2013	18/11/2013	1642	Una (1)	
Fecha y Hora de Muestreo			21/10/2013; 7:20 am		Rango o valor máximo permisible	
Muestreado por			Arlen Daniela González			
Supervisor de Muestreo en Campo			NR			
Fuente			Efluente Líquido			
Tipo de Muestra			Agua Residual Puntual			
Observaciones de Ubicación			NR			
Coordenadas			NR			
Codificación PIENSA			LA-1310-0720			
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION			Art. No. *
			Efluente Líquido			
4500-H+	Potencial de Hidrógeno	pH	3.70		NE	
5210-B	Oxígeno	mg/l	53,488.54		NE	
5220-C	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	92,221.63		NE	
4500-B	Nitrogeno Total	mg/l	525.00		NE	
4500-C	Fosforo Total	mg/l	64.54		NE	
3500-C	Potasio	mg/l	1,647.00		NE	

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva, ≤ al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma. NR= No Reporta. SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Parajón Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000256

Anexo 4.- Registro de producción de biogás. Sustrato 1: Cáscara de Pitahaya

N°	Días/Fecha	Producción de biogás					
		Horas de Lectura	Lectura inicial	Lectura anterior	Diferencia (m ³)	m ³ /día TOTAL	m ³ / día Unidad
1	10/09/2013	24	4040.96	4061.98	21.02	21.02	3.00
2	11/09/2013	24	4061.98	4086.21	24.23	24.23	3.46
3	12/09/2013	24	4086.21	4110.92	24.71	24.71	3.53
4	13/09/2013	24	4110.92	4136.99	26.07	26.07	3.72
5	14/09/2013	24	4136.99	4162.95	25.96	25.96	3.71
6	16/09/2013	48	4162.95	4209.23	46.28	23.14	3.31
7	17/09/2013	24	4209.23	4232.27	23.04	23.04	3.29
8	18/09/2013	24	4232.27	4258.42	26.15	26.15	3.74
9	19/09/2013	24	4258.42	4285.42	27.00	27.00	3.86
10	20/09/2013	24	4285.42	4311.91	26.49	26.49	3.78
11	21/09/2013	24	4311.91	4336.64	24.73	24.73	3.53
12	23/09/2013	48	4336.64	4380.46	43.82	21.91	3.13
13	24/09/2013	24	4380.46	4401.61	21.15	21.15	3.02
14	25/09/2013	24	4401.61	4425.86	24.25	24.25	3.46
15	26/09/2013	24	4425.86	4452.40	26.54	26.54	3.79
16	27/09/2013	24	4452.40	4474.55	22.15	22.15	3.16
17	28/09/2013	24	4474.55	4500.27	25.72	25.72	3.67
18	30/09/2013	48	4500.27	4548.54	48.27	24.13	3.45
19	01/10/2013	24	4548.54	4572.55	24.01	24.01	3.43
20	02/10/2013	24	4572.55	4597.10	24.55	24.55	3.51
21	03/10/2013	24	4597.10	4620.95	23.85	23.85	3.41
22	04/10/2013	24	4620.95	4644.33	23.38	23.38	3.34
23	05/10/2013	24	4644.33	4668.29	23.96	23.96	3.42
					PROMEDIO	24.27	3.47

Anexo 5.- Registro de producción de biogás. Sustrato 2: RSU

N°	Días/Fecha	Producción de Biogás					
		Horas de Lectura	Lectura inicial	Lectura anterior	Diferencia (m ³)	m ³ /día TOTAL	m ³ / día Unidad
1	08/10/2013	24	4717.11	4733.44	16.33	16.33	2.33
2	09/10/2013	24	4733.44	4754.92	21.48	21.48	3.07
3	10/10/2013	24	4754.92	4780.89	25.97	25.97	3.71
4	11/10/2013	24	4780.89	4814.37	33.48	33.48	4.78
5	12/10/2013	24	4814.37	4840.40	26.03	26.03	3.72
6	14/10/2013	48	4840.40	4885.20	44.80	22.40	3.20
7	15/10/2013	24	4885.20	4907.98	22.78	22.78	3.25
8	16/10/2013	24	4907.98	4915.44	7.46	7.46	1.07
9	17/10/2013	24	4915.44	4948.72	33.28	33.28	4.75
10	18/10/2013	24	4948.72	4975.15	26.43	26.43	3.78
11	19/10/2013	24	4975.15	5017.39	42.24	42.24	6.03
12	21/10/2013	48	5017.39	5067.73	50.34	25.17	3.60
13	22/10/2013	24	5067.73	5092.18	24.45	24.45	3.49
14	23/10/2013	24	5092.18	5115.60	23.42	23.42	3.35
15	24/10/2013	24	5115.60	5139.30	23.70	23.70	3.39
16	25/10/2013	24	5139.30	5163.96	24.66	24.66	3.52
17	26/10/2013	24	5163.96	5188.75	24.79	24.79	3.54
18	28/10/2013	48	5188.75	5234.96	46.21	23.11	3.30
19	29/10/2013	24	5234.96	5254.83	19.87	19.87	2.84
20	30/10/2013	24	5254.83	5275.86	21.03	21.03	3.00
21	31/10/2013	24	5275.86	5296.99	21.13	21.13	3.02
22	01/11/2013	24	5296.99	5318.43	21.44	21.44	3.06
23	02/11/2013	24	5318.43	5336.59	18.16	18.16	2.59
24	04/11/2013	48	5336.59	5368.46	31.87	15.94	2.28
25	05/11/2013	24	5368.46	5385.16	16.70	16.70	2.39
26	06/11/2013	24	5385.16	5399.77	14.61	14.61	2.09
27	07/11/2013	24	5399.77	5415.23	15.46	15.46	2.21
28	09/11/2013	48	5415.23	5445.60	30.37	15.185	2.17
					PROMEDIO	22.38	3.20

Anexo 6.- Balance de masa. Sustrato 1

6.1 Tipos y componentes de Residuos Sólidos

Tipo de componente	Porcentaje	Kg húmedos	% Humedad	Kg seco
Residuos de comida	100.00	113.64	90.1	11.25

6.2 Pesos atómicos de los elementos de los Residuos Sólidos

Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
12	1	16	14	32

6.3 Porcentaje de los elementos de los Residuos Sólidos

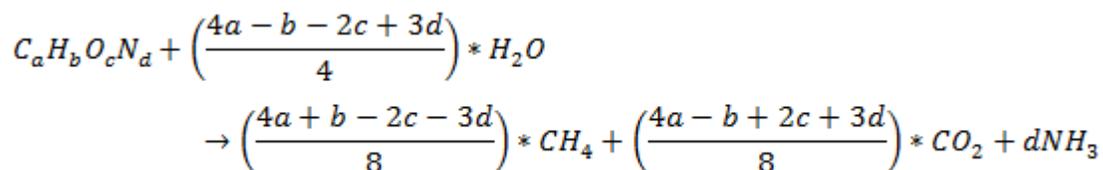
Tipos de Componentes RS	C	H	O	N	S	Cenizas	Total (%)
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2	100

Fuente: Tchobanougous, 1994

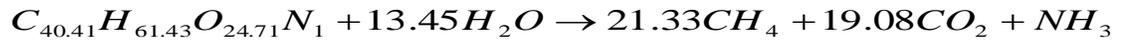
6.4 Cantidad de los elementos de los Residuos Sólidos

	Peso seco Kg	C	H	O	N	S	Ceniza
Residuos de comida	11.25	5.46	0.70	4.44	0.16	0.02	0.47
Átomos de cada elemento		0.45	0.69	0.28	0.01	0.00	
Átomos de cada elemento dividido entre el menor número de átomos sin y con azufre		40.41	61.43	24.71	1.00		
		647.34	984.02	395.74	16.02	1	

6.5 La reacción global de descomposición del carbono orgánico



A	b	c	d
40.41	61.43	24.71	1.00



$$956.68 + 242.40 \rightarrow 341.33 + 839.45 + 17$$

6.6 Generación de biogás

m³/Kg Residuos secos	m³ / Kg Residuos húmedos
0.48	0.05

6.7 Composición del biogás

Componente	Peso(kg)	Volumen (m³)	%
CH ₄	3.85	5.36	52.83
CO ₂	9.46	4.78	47.17

Anexo 7.- Balance de masa. Sustrato 2.

7.1 Tipos y componentes de Residuos Sólidos

Tipo de componente	Porcentaje	Kg húmedos	% Humedad	Kg seco
Residuos de comida	100.00	54.55	43.21	27.27

7.2 Pesos atómicos de los elementos de los Residuos Sólidos

Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
12	1	16	14	32

7.3 Porcentaje de los elementos de los Residuos Sólidos

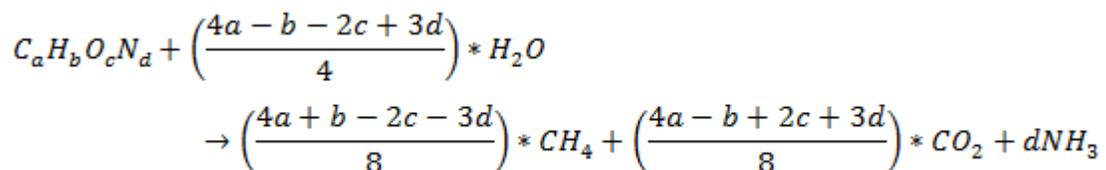
Tipos de Componentes RS	C	H	O	N	S	Cenizas	Total (%)
Residuos de comida	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5	100

Fuente: Tchobanougous, 1994

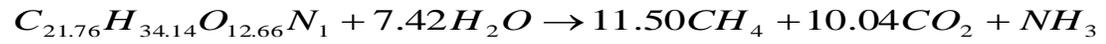
7.4 Cantidad de los elementos de los Residuos Sólidos

	Peso seco Kg	C	H	O	N	S	Ceniza
Residuos de comida	27.27	13.09	1.75	10.25	0.71	0.11	1.36
Átomos de cada elemento		1.09	1.73	0.64	0.05	0.00	
Átomos de cada elemento dividido entre el menor número de átomos sin y con azufre		21.54	34.14	12.66	1.00		
		320.33	507.88	188.35	14.87	1	

7.5 La reacción global de descomposición del carbono orgánico



a	B	c	d
21.54	34.14	12.66	1.00



$$509.75 + 133.68 \rightarrow 183.93 + 441.79 + 17$$

7.6 Generación de biogás

m³/Kg Residuos secos	m³ / Kg Residuos húmedos
0.48	0.24

7.7 Composición del biogás

Componente	Peso(kg)	Volumen (m³)	%
CH ₄	9.35	13.02	53.42
CO ₂	22.45	11.35	46.58