

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**INFLUENCIA DEL SUBSTRATO E INÓCULOS MICROBIOS
ANAERÓBICOS FACULTATIVOS Y METANOGENÉTICOS
DE UNA FERMENTACIÓN DISCONTINUA PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN CONDICIONES
NATURALES, TACNA, PERÚ, 2012 - 2015.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Ms. DALADIER MIGUEL CASTILLO COTRINA

Para optar el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

TACNA - PERÚ

2016

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

INFLUENCIA DEL SUBSTRATO E INÓCULOS MICROBIOS ANAERÓBICOS FACULTATIVOS Y METANOGÉNICOS DE UNA FERMENTACIÓN DISCONTINUA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN CONDICIONES NATURALES, TACNA, PERÚ, 2012-2015.

Tesis sustentada y aprobada el 20 de abril del 2016; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE:



Dr. Oscar Octavio Fernández Cutire

SECRETARIO:



Dra. Rosario Elena Zegarra viuda de Chávez

MIEMBRO :



Dra. Liliana Del Carmen Lanchipa Bergamini

ASESOR :



Dr. César Augusto Cevallos Columbus

..

DEDICATORIA

A mis hijos,
Elizabeth, Aníbal y Daladier.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la fuerza y el espíritu para alcanzar las metas y objetivos propuestos.

A mi asesor y doctores docentes de la primera promoción del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales, de la Escuela de Posgrado de la UNJBG, por su apoyo constante e incondicional.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
RESUMEN	xxix
ABSTRACT	xxx
RESUMO	xxxi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	5
1.1.1. Antecedentes del problema	5
1.1.2. Problemática de la investigación	6
1.2. Formulación del problema	7
1.3. Justificación e importancia	7
1.3.1. Justificación	7
1.3.2. Importancia	8

1.4.	Alcances y limitaciones	9
1.4.1.	Alcances	9
1.4.2.	Limitaciones	9
1.5.	Objetivos	10
1.5.1.	Objetivo general	10
1.5.2.	Objetivos específicos	10
1.6.	Hipótesis	11

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del estudio	12
2.1.1.	En el ámbito internacional	12
2.1.2.	En el ámbito nacional	14
2.1.3.	En el ámbito local	14
2.2.	Bases teóricas	16
2.2.1.	Biogás y aplicaciones	16
2.2.2.	Países generadores de tecnología de producción de biogás	17
2.2.3.	Substratos para producción de biogás	17
2.2.4.	Etapas bioquímicas y microbios de la producción de biogás	18

2.2.5.	Biodigestor discontinuo	24
2.2.6.	Fundamento del establecimiento de influencia del substrato e inóculos microbianos sobre la producción de biogás	26
2.2.7.	Biodigestión para la producción de biogás	27
2.2.8.	Parámetros que tienen influencia en la producción de biogás	31
2.3.	Definición de términos	33

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1.	Tipo y diseño de la investigación	36
3.1.1.	Tipo	36
3.1.2.	Diseño	36
3.2.	Población y muestra	38
3.2.1.	Población	38
3.2.2.	Muestra	39
3.3.	Operacionalización de variables	39
3.4.	Técnicas e instrumentos para recolección de datos	41
3.4.1.	Fase de laboratorio	41
3.4.1.1.	Materiales	41
3.4.1.2.	Equipos	43

3.4.1.3.	Obtención y preparación del sustrato fermentativo	43
3.4.1.4.	Caracterización del sustrato fermentativo. Determinación del carbono y nitrógeno del estiércol y grass por separado y en mezcla	44
3.4.1.5.	Prefermentado del sustrato	44
3.4.1.6.	Caracterización de temperatura y humedad ambiental del prefermentado	45
3.4.1.7.	Caracterización química del prefermentado (pH, DBO ₅)	46
3.4.1.8.	Obtención y preparación de los microbios anaeróbicos facultativos para la biodigestión	46
3.4.1.9.	Obtención y preparación de los microbios metanogénicos para la biodigestión	48
3.4.1.10.	Diseño y construcción del biodigestor para la biodigestión	51
3.4.1.11.	Biodigestión para la producción de biogás	51
3.4.1.12.	Caracterización química de la biodigestión (pH y DQO)	52
3.4.1.13.	Caracterización de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión	53
3.4.1.14.	Evaluación de la producción de biogás en la biodigestión	53
3.4.1.15.	Evaluación de la temperatura y humedad ambiental en la biodigestión	54

3.4.1.16.	Determinación de la producción de biogás total de cada tratamiento de la biodigestión	55
3.4.1.17.	Determinación de la productividad de biogás total de cada tratamiento de la biodigestión	55
3.4.1.18.	Determinación del rendimiento de biogás en la biodigestión	55
3.5.	Procesamiento y análisis de datos	56

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1.	Determinación de Carbono y Nitrógeno del substrato fermentativo para prefermentación	57
4.2.	Determinación del pH y del DBO ₅ en prefermentación	58
4.3.	Humedad y temperatura ambiental en prefermentación	59
4.4.	Determinación de DQO y pH en biodigestión	61
4.5.	Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión	62
4.6.	Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en interiores de biodigestores en proceso de biodigestión	63
4.7.	Producciones parciales de biogás en la biodigestión	66
4.8.	Producciones acumuladas de biogás en la biodigestión	79

4.9.	Productividades de biogás en la biodigestión	93
4.10.	Rendimiento de biogás en la biodigestión	98

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1.	Determinación de Carbono y Nitrógeno del sustrato fermentativo para prefermentación	102
5.2.	Determinación del pH y del DBO ₅ en prefermentación	105
5.3.	Humedad y temperatura ambiental en prefermentación	106
5.4.	Determinación de DQO y pH en biodigestión	106
5.5.	Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión	108
5.6.	Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en interiores de biodigestores en proceso de biodigestión	109
5.7.	Producciones parciales de biogás en la biodigestión	110
5.8.	Producciones acumuladas de biogás en la biodigestión	113
5.9.	Productividades de biogás en la biodigestión	116
5.10.	Rendimiento de biogás en la biodigestión	116

CONCLUSIONES		119
---------------------	--	-----

RECOMENDACIONES		121
------------------------	--	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXOS	136

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores del substrato, microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos de cada uno de los tratamientos dados en la experimentación de producción de biogás	38
Tabla 2. Operacionalización de las variables independiente y dependiente para la producción de biogás	40
Tabla 3. Datos de porcentaje de carbono, nitrógeno, relación de carbono nitrógeno y cenizas de los componentes y mezcla (grass y estiércol de cuy) del substrato fermentativo para la producción de biogás	57
Tabla 4. Datos de caracterización química (pH y DBO ₅) del proceso de prefermentado en los tratamientos T- , T _o y T+ para la producción de biogás	58
Tabla 5. Datos diarios de humedad y temperatura ambiental del prefermentado en sus tratamientos T. , T _o ,T ₊ para la producción de biogás	59
Tabla 6. Datos de caracterización química (DQO y pH) del	

	proceso de biodigestión en los tratamientos T- , T ₀ y T+ para la producción de biogás	61
Tabla 7.	Datos de sólidos totales (mg/l), cenizas (%) y sólidos volátiles (mg/l) en los tratamientos T- , T ₀ y T+ al inicio y al término de la biodigestión para la producción de biogás	62
Tabla 8.	Datos de Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en biodigestores de los tratamientos T-, T ₀ y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	63
Tabla 9.	Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	66
Tabla 10.	Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T ₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	68
Tabla 11.	Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T ₊ en el proceso de biodigestión para la	

	producción de biogás	71
Tabla 12.	Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T-, T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	75
Tabla 13.	Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	79
Tabla 14.	Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T _o en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	81
Tabla 15.	Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	83
Tabla 16.	Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	86

Tabla 17.	Producción de biogás (cm ³) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	90
Tabla 18.	Análisis de variancia para producciones de biogás en tratamientos T-, To y T+	91
Tabla 19.	Prueba de DMS al 99% para las producciones de biogás en tratamientos T-, To y T+	91
Tabla 20.	Productividad de biogás en función de la producción total y el tiempo de fermentación obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	93
Tabla 21.	Productividad de biogás (cm ³ /día) obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	94
Tabla 22.	Análisis de varianza para productividades de biogás en tratamientos T-, To y T+	95
Tabla 23.	Prueba de DMS al 99% para las productividades de biogás en los tratamientos T-, To y T+	96

Tabla 24.	Rendimiento de biogás (Rdmto) (cm^3/g) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás considerando como peso de sólidos totales (ST) presentes en una carga del biodigestor de 2 398, 32 g	98
Tabla 25.	Análisis de variancia para rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+	99
Tabla 26.	Prueba de DMS al 99% para los rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+	100
Tabla 27.	Datos de humedad relativa y temperatura ambiental según fecha, día, hora en que se evaluó el proceso de prefermentado desde su inicio hasta el final para los tres tratamientos T-, To y T+	154
Tabla 28.	Datos de tratamientos T-, T _o T ₊ y sus repeticiones (1-4) de presión manométrica (cm de c.a.) y volumen de biogás (cm^3) según el número de evaluación, fecha, número de días de fermentación acumulado y lapso parcial de días dados en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	156
Tabla 29.	Datos en tratamiento T- y sus repeticiones (T-1, T-2,	

	T-3, T-4) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso simple, lapso acumulado en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	170
Tabla 30.	Datos de tratamiento T_0 y sus repeticiones (T_0 1, T_0 2, T_0 3, T_0 4) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso parcial, lapso acumulado en el proceso de biodigestión	172
Tabla 31.	Datos de tratamientos $T+$ y sus repeticiones ($T+1$, $T+2$, $T+3$, $T+4$) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso simple, lapso acumulado del proceso de biodigestión para la producción de biogás	175
Tabla 32.	Datos de humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en los biodigestores de los tratamientos $T-$, T_0 y $T+$ según el número de evaluación, mes, fecha y hora en que se tomó los datos del proceso de biodigestión para la producción de biogás	185
Tabla 33.	Datos de presión y volumen de biogás en los tratamientos $T-$, T_0 y $T+$ según número de evaluación,	

	fecha, lapso simple y lapso acumulado dados en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	204
Tabla 34.	Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación de un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento T- para la producción de biogás	207
Tabla 35.	Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento To para la producción de biogás	209
Tabla 36.	Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento T+ para la producción de biogás	211
Tabla 37.	Datos de presión manométrica de biogás obtenida en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás.	215
Tabla 38.	Coeficiente de correlación entre curvas de presión manométrica de biogás en los tratamientos T-, To y T+ del proceso de biodigestión.	218

Tabla 39. Datos de volumen biogás obtenida en cada evaluación en un determinado tiempo en el proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás	220
Tabla 40. Coeficiente de correlación de curvas de volumen parciales de biogás de los tratamientos T-, To y T+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	223

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas del proceso de producción de biogás	19
Figura 2. Curva de valores diarios de humedad relativa(H) y temperatura de ambiente(TA) del prefermentado para los tratamientos T- , To y T+ para la producción de biogás	60
Figura 3. Curvas de Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en biodigestores de los tratamientos T-, To y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	65
Figura 4. Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	67
Figura 5. Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T ₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	70

- Figura 6. Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás 74
- Figura 7. Curvas de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_- , T_0 y T_+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás 78
- Figura 8. Curva de datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás 80
- Figura 9. Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_0 en el proceso de biodigestión para la producción de biogás 82
- Figura 10. Curva de datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás 85
- Figura 11. Curva de datos de producciones acumuladas de biogás

	(Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- , T _o y T ₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás	89
Figura 12.	Producciones de biogás en los tratamientos T-, To y T+.	92
Figura 13.	Productividades de biogás en los tratamientos T-, To y T+	97
Figura 14.	Rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+	101
Figura 15.	Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en el tratamiento T- para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en T-	208
Figura 16.	Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación en el proceso de biodigestión en el tratamiento To para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en To	210
Figura 17.	Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en el tratamiento T+ para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en el tratamiento	

	T+	214
Figura 18.	Curvas de datos de presión manométrica de producciones parciales de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás	219
Figura 19.	Curvas de datos de volumen parciales de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás	224
Figura 20.	Corral de crianza de cuyes de donde se obtuvo el substrato estiércol de cuy	225
Figura 21.	Césped de jardín de donde se obtuvo el grass	225
Figura 22.	Substrato grama americana seca amontonada después de haber sido expuesta al sol	226
Figura 23.	Fermentadores discontinuos cilíndricos con sus respectivos tamizadores con los que se obtendrían las longitudes del substrato que en ellos fermentarían	226
Figura 24.	Vista superior del interior del fermentador discontinuo del substrato de 0,2 cm	227
Figura 25.	Vista superior del interior del fermentador discontinuo para el substrato de 0,4 cm	227

Figura 26.	Vista superior del interior del fermentador discontinuo para el substrato de 0,6 cm	228
Figura 27.	Biodigestores listos para ser cargados y funcionar	228
Figura 28.	Componentes del biodigestor: cilindro, cincho y tapa	229
Figura 29.	Cilindro del biodigestor con un caño en su parte inferior lateral para toma de muestra	229
Figura 30.	Biodigestor sin tapa vista desde arriba	230
Figura 31.	Cincho del biodigestor para el ajuste hermético	230
Figura 32.	Tapa del biodigestor en su parte externa con el termómetro y la llave de paso de descarga de biogás en el instalado	231
Figura 33.	Tapa del biodigestor en su parte interna con el termómetro y la llave de paso de descarga de biogás en el instalado	231
Figura 34.	Biodigestores contruídos para la experimentación	232
Figura 35.	Grass, procedente del césped cortado, reducido a un tamaño más pequeño con ayuda de tijera podadora	232
Figura 36.	Grass reducido en tamaño es colocado en tamizador de 0,6 cm	233
Figura 37.	Grass reducido en tamaño es tamizado en tamizador de 0,6 cm	233

Figura 38.	Grass no tamizado en el tamizador de 0,6 cm es colocada en un primer montículo	234
Figura 39.	Grass tamizado en tamizador de 0,6 cm es colocada en tamizador de 0,4 cm	234
Figura 40.	Grass tamizado en tamizador de 0,6 cm es tamizada en tamizador de 0,4 cm	235
Figura 41.	Grass no tamizada de 0,4 cm es colocada en un segundo montículo que constituyó el grass con longitud de 0,6 cm	235
Figura 42.	Grass tamizada en tamizador de 0,4 cm es colocada en tamizador de 0,2 cm	236
Figura 43.	Grass tamizada en tamizador de 0,4 cm es tamizado en tamizador de 0,2 cm dando origen al tercer montículo que constituyó el grass con longitud de 0,2 cm	236
Figura 44.	Grass no tamizada en tamizador de 0,4 cm es colocado en un cuarto montículo que constituyó el grass con longitud de 0,4 cm	237
Figura 45.	Grass de 0,6 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	237
Figura 46.	Grass de 0,4 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	238

Figura 47.	Grass de 0,2 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	238
Figura 48.	Grass de 0,2; 0,4 y 0,6 cm, de izquierda a derecha, con sus respectivos tamizadores listos para ser utilizado en la carga para la prefermentación	239
Figura 49.	Estiércol de cuy seco procedente de un corral de cuyes	239
Figura 50.	Estiércol de cuy no tamizado con tamizador de 0,6 cm colocado en un primer montículo	240
Figura 51.	Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm colocado en un segundo montículo	240
Figura 52.	Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm es colocado en tamizador de 0,4 cm	241
Figura 53.	Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm es tamizado en tamizador de 0,4 cm originando un tercer montículo	241
Figura 54.	Estiércol de cuy no tamizado en tamizador de 0,4 cm es colocado en un cuarto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0,6 cm	242
Figura 55.	Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,4 cm es colocado en tamizador de 0,2 cm	242
Figura 56.	Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,4 cm es	

	tamizado en tamizador de 0,2 cm originando un quinto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0,2 cm	243
Figura 57.	Estiércol de cuy no tamizado en tamizador de 0,2 cm es colocado en un sexto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0,4 cm	243
Figura 58.	Estiércol de cuy con longitud de 0,6 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	244
Figura 59.	Estiércol de cuy con longitud de 0,4 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	244
Figura 60.	Estiércol de cuy con longitud de 0,2 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso	245
Figura 61.	Estiércol de cuy con longitud de 0,2; 0,4 y 0,6 cm, de izquierda a derecho, listo para ser utilizado en la carga para la prefermentación	245
Figura 62	Balde con capacidad de 5 litros utilizado para medir los volúmenes tanto de estiércol como de grass necesarios hasta completar la carga en el fermentador cilíndrico como así mismo en el biodigestor	246
Figura 63.	Fermentadores cilíndricos discontinuos listos para ser utilizados en la prefermentación	246

Figura 64.	Fermentadores cilíndricos discontinuos cargados con el substrato para la prefermentación	247
Figura 65.	Biogás conducido desde el biodigestor al mechero Bunsen listo para ser quemado	247
Figura 66.	Biogás proveniente del biodigestor está siendo prendido en el mechero Bunsen	248
Figura 67.	Biogás proveniente del biodigestor encendido en el mechero Bunsen originando una llama de buena calidad	249
Figura 68.	Llama azul característica del biogás obtenido de buena calidad dentro de un ambiente totalmente oscuro	250

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la influencia del sustrato (mezcla de estiércol de cuy más residuo de grass) e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos de una fermentación discontinua en diferentes niveles para la producción de biogás en condiciones naturales en Tacna, Perú. El sustrato tuvo tres longitudes 2, 4 y 6 mm. Los microbios anaeróbicos facultativos y los metanogénicos tuvieron tres concentraciones 10^4 , 10^6 y 10^8 microb./ml. El sustrato antes de la biodigestión fue prefermentado en un fermentador aeróbico cilíndrico. La biodigestión empezó en el biodigestor cuando estuvieron presentes el sustrato prefermentado y los inóculos microbianos. Se determinó que el sustrato e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos sobre la producción de biogás tuvieron su mayor influencia cuando estuvieron en su mayor nivel que fue respectivamente de 6 mm; 10^8 microb./ ml; y 10^8 microb./ ml.

Palabras clave: *biodigestion, producción de biogás, microbios metanogénicos.*

ABSTRACT

The objective of the investigation was to determine the influence of the substrate (mixture of guinea pig manure more grass residue) and inocula methanogenic and facultative anaerobic microbes from a batch fermentation at different levels for the production of biogas in natural conditions in Tacna, Peru. The substrate had three lengths 2, 4 and 6 mm. Facultative anaerobic microbes and methanogenic had three concentrations 10^4 , 10^6 y 10^8 microb./ml. The substrate before biodigestion preferment was in a cylindrical aerobic fermenter. Biodigestion began in the digester were present when the preferment substrate and microbial inoculum. It was determined that the substrate and inoculum methanogenic and facultative anaerobic microbes on biogas production had its greatest influence when they were at their highest level that was 6 mm; 10^8 microb./ ml; y 10^8 microb./ ml respectively.

Keywords: *biodigestion, production of biogás, methanogenic microbes.*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência do substrato (mistura de esterco e resíduos de grama) e com os inóculos anaeróbios micróbios mesófilos e metanogênicos uma fermentação em batelada em diferentes níveis para a produção de biogás em condições naturais em Tacna, Peru. O substrato tinha três comprimentos de 2, 4 e 6 mm. micróbios anaeróbios facultativos e metanogênicos três concentrações foram 10^4 , 10^6 e 10^8 microb./ml. O substrato antes de biodigestão foi prefermentado em um fermentador aeróbico cilíndrico. Biodigestão começou no digestor estavam presentes quando o substrato prefermentado e inóculos microbianos. Determinou-se que o substrato e inóculos facultativos micróbios anaeróbios e metanogênicos na produção de biogás teve sua maior influência quando eles estavam em seu nível mais elevado que foi respectivamente de 6 mm; 10^8 microb./ ml; e 10^8 microb./ ml

Palavras chave: *biodigestão, biogás, micróbios metanogênicos.*

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica presente en el mundo es tan grande y diversa y producida constantemente; se la tiene en cuenta como una gran fuente de substratos para la generación de una serie de productos por acción microbiana benéficos para el hombre. Como materia orgánica, entre otros, encontramos al estiércol de animales y restos de vegetales. El estiércol de animales puede ser utilizado de varias formas, algunos países lo emplean, por su alto contenido en nitrógeno, como abono para las plantas o para mejorar el suelo; asimismo para producir biogás. El estiércol del ganado vacuno y del cuy es usado para la generación de biogás. Los restos de vegetales también son abundantes, diversos y producidos constantemente, estos son aprovechados bajo formas diferentes como substratos para la producción de compost, substratos mejoradores de la estructura del suelo, substratos de fermentación para producción de metabolitos de interés industrial; así mismo, considerando el alto porcentaje de carbono en su composición, se los aprovecha como complemento para la producción de biogás. Los restos vegetales resultado de la poda del grass que cubre los suelos de los jardines,

sobre todo en las ciudades, son materia orgánica que puede emplearse para diferentes fines útiles.

En nuestro país se genera en abundancia el estiércol de cuy, así como de grass. En muchos lugares se cría al cuy en granjas, por lo que la generación del estiércol de este animal es significativo, muy poco se lo usa para la generación de biogás. En las ciudades y pueblos del país es común ver la generación de residuos de la poda periódica de grass que están en parques, jardines, estadios, etc.; que por lo general es quemado o desechado como basura.

En Tacna, tanto el estiércol de cuy como los residuos de grass no son utilizados para generar biogás, por lo general el estiércol es utilizado como mejorador del suelo en los campos de cultivo; mientras que los residuos de grass son quemados o recolectados para ser depositados en el botadero municipal.

Existen muchas zonas rurales en las cuales podría aprovecharse el estiércol de cuy junto a los residuos de grass para la generación de

biogás, que por ser un recurso energético, renovable y transformable a diferentes formas de energía sería importante en el desarrollo sobre de los pobladores de zonas rurales.

La producción de biogás requiere de la actividad microbiana en condiciones anaeróbicas para que la materia orgánica a partir del cual se origina el biogás se transforme; es decir, la participación microbiana es importante y fundamental en este proceso. Los microorganismos que intervienen son microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos. La acción conjunta de estos sobre la materia orgánica también llamado substrato, contenida en un recipiente llamado biodigestor, bajo determinadas características de los componentes microbios, substratos y condiciones ambientales en que se desarrolle la fermentación también llamado biodigestión se establece un determinado grado de producción y calidad de biogás.

Este trabajo se plantea como objetivo de investigación determinar la influencia del substrato (mezcla de estiércol de cuy más residuo de grass) e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos de una

fermentación discontinua en diferentes niveles de aplicación para la producción de biogás en condiciones naturales en Tacna, Perú.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

Se han realizado trabajos de investigación fuera del país donde se ha demostrado que es posible obtener biogás a partir de una serie de materiales biológicos bajo determinadas condiciones (Bouallagui et al, 2005; Bozym et al, 2015); asimismo, el biogás es una forma de energía económicamente rentable, renovable y amigable con el ambiente (Castillo & Tito, 2010).

En el Perú principalmente en Tacna existen pocos trabajos sobre producción de biogás, y en menor cantidad sobre la influencia del substrato y los inóculos microbianos en producción de biogás. Sin embargo , se tiene, a nivel nacional diversos materiales biológicos que muy bien podrían ser aprovechados para la producción de biogás.

1.1.2. Problemática de la investigación

Es imperiosa la necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía o potenciar el aprovechamiento de las existentes que muy poca son utilizadas. El biogás en varios países, sobre todo europeos, constituye la energía principal para realizar diversas actividades, por lo que tienen éxito en su manejo, a pesar que podrían utilizar otras formas de energía como la eléctrica o la de hidrocarburos. En estos países la tecnología desarrollada es tal que pueden producir las cantidades suficientes de biogás para satisfacer sus necesidades energéticas añadiendo el beneficio adicional de contribuir con tecnología limpia para la preservación del medio ambiente, ya que los materiales orgánicos generalmente son residuos orgánicos contaminantes del medio ambiente, y el biogás que de ellos se obtiene no es contaminante cuando este es quemado o transformado a otra forma de energía; adicionalmente, la obtención de este es económico.

En nuestra región y país son muy pocos los reportes de investigaciones que se tienen sobre producción de biogás. Existen pueblos y áreas rurales que necesitan de fuentes energéticas, estos pueblos y áreas rurales cuentan con la materia prima (residuos orgánicos) como para que

en ellos se pueda producir biogás; pero se necesita la tecnología desarrollada para la producción de este.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la influencia del substrato (mezcla de estiércol de cuy "*Cavia porcellus*" más residuo de grass "*Stenotaphrum secundatum*") e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos de una fermentación discontinua en diferentes niveles para la producción de biogás en condiciones naturales en Tacna, Perú?

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

El biogás es un tipo de energía renovable, cuyo uso genera una menor contaminación ambiental comparada a la que originan las energías fósiles que son las mayormente utilizadas a nivel mundial y que están en agotamiento por ser no renovables. En nuestro país existen muy pocos trabajos de investigación sobre producción de biogás. Los materiales orgánicos empleados en este trabajo se producen en forma significativa y permanente en nuestro medio y diversos países del mundo, pero

muchas veces no les dan utilidad haciendo que se constituyan en contaminantes del ambiente, cuando muy bien se les podría dar valor agregado utilizándolos para la producción de biogás.

1.3.2. Importancia

El llegar a conocer la influencia del sustrato, concentración de los inóculos microbios facultativos y metanogénicos en la producción de biogás, considerando que esta varía con los parámetros a los que está sometido, permite que estos datos estén disponibles para ser utilizados en producciones eficientes de biogás para satisfacer la demanda de energía de la población entre otros beneficios. En nuestro medio tenemos insuficientes conocimientos sobre la producción de biogás.

Los resultados de este trabajo coadyuvarán a precisar los conocimientos necesarios para la obtención de la tecnología limpia que necesitamos para la producción de biogás, considerando que en nuestro medio carecemos de la tecnología que sí lo tienen otros países y que son muy eficientes para sus realidades.

Si se establece en nuestro medio la tecnología para la producción de biogás a partir de los materiales orgánicos que actualmente constituyen residuos sin valor y que son contaminantes del medio ambiente, comenzarían a tener, estos residuos, un valor agregado y por ende una contribución a la conservación del medio ambiente al ser utilizados como substratos para la producción de biogás.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

- Se determinó la influencia del substrato, inóculos microbios anaerobios facultativos e inóculos microbios metanogénicos sobre la producción, productividad y rendimiento de biogás.
- Se obtuvo un tratamiento en el que se generó una mayor influencia en la producción, productividad y rendimiento de biogás cuando se utilizó el substrato con mayor longitud y los inóculos microbianos anaeróbicos facultativos y metanogénicos con mayor concentración.

1.4.2. Limitaciones

- Aislamiento de los microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos puros.
- Inoculación de los inóculos microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos puros.
- Disponibilidad de un ambiente con temperatura ambiental regulable.
- Disponibilidad de equipos y medios para evaluación de la composición de gases del biogás.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar la influencia del substrato (mezcla de estiércol de cuy "*Cavia porcellus*" más residuo de grass "*Stenotaphrum secundatum*") e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos de una fermentación discontinua en diferentes niveles para la producción de biogás en condiciones naturales en Tacna, Perú.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Establecer la influencia del sustrato e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos a diferentes niveles en la producción de biogás.
- b) Determinar la longitud del sustrato de mayor influencia.
- c) Determinar la concentración de inóculo microbios anaeróbicos facultativos que tuvo más influencia.
- d) Determinar la concentración de inóculo microbios metanogénicos de mayor influencia.
- e) Determinar la mayor producción, productividad y rendimiento de biogás.

1.6. Hipótesis

El sustrato (mezcla de estiércol de cuy "*Cavia porcellus*" más residuo de grass "*Stenotaphrum secundatum*") e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos de una fermentación discontinua en diferentes niveles tienen influencia en la producción de biogás en condiciones naturales en Tacna, Perú.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. En el ámbito internacional

Las primeras menciones sobre biogás se remontan a los años 1600, identificado por varios científicos como un gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica. En 1890 se construye el primer biodigestor a escala real, en la India. En 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad. Tras las guerras mundiales comienza a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época. En todo el mundo se difunden los denominados tanques Imhoff para el tratamiento de aguas cloacales colectivas. El gas producido se lo utilizó para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se llegó a inyectarlo en la red de gas comunal. Durante los años de la segunda guerra mundial comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa

como en China e India que se transforman en líderes en la materia. Esta difusión se ve interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles y recién en la crisis energética de la década del 70 se reinicia con gran ímpetu la investigación y extensión en todo el mundo incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos. Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al nuevo material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos intervinientes en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno). Estos progresos en la comprensión del proceso microbiológico han estado acompañados por importantes logros de la investigación aplicada obteniéndose grandes avances en el campo tecnológico (Hilbert, 2010).

Para identificar la materia orgánica (*Eichhornia crassipes* “bora” y estiércol de ganado) que generó mayor cantidad de biogás y comparar el rendimiento de las mezclas realizadas a través del método de desplazamiento del agua y el tiempo de quemado se prepararon tres réplicas (para obtener promedio) de tres mezclas diferentes (3 kg de bora; bora-estiércol 3:1 y 3 kg de estiércol) con un 90% de humedad e inoculadas con aguas servidas en digestores de vidrio con capacidad de 18 litros para que en ellos se diera la fermentación anaeróbica que duró

44 días. Los resultados obtenidos muestran que a los 32 días de fermentación los digestores cargados con estiércol evidenciaron un incremento lineal significativo de producción de biogás, acumulando un volumen de 11 litros, para luego descender armónicamente en los días posteriores; que los digestores cargados con bora-estiércol y con bora solo la producción de biogás se ajustó a una curva exponencial con un incremento brusco después de los 32 días, acumulándose un volumen de biogás de 25 y 16 litros respectivamente (Rodríguez & cols, 1997).

2.1.2. En el ámbito nacional y local

Para producir biogás a partir de dos mezclas de substratos orgánicos se realizó dos fermentaciones discontinuas en condiciones naturales. Una mezcla de substratos estuvo formada por excremento de cuy, rastrojo del alimento vegetal de cuy y agua; y la otra por excremento de cuy, rastrojo del alimento vegetal del cuy, residuo de grass y agua. Las mezclas de substratos fueron prefermentados por separado en condiciones aeróbicas en un prefermentador cilíndrico, luego sometidos a la fermentación discontinua anaeróbica, no agitada, en fermentadores cilíndricos de 227 litros de capacidad, uno para cada mezcla de substratos, en los cuales los substratos prefermentados ocuparon

alrededor de las dos terceras partes del volumen total de los fermentadores y fueron mezclados con inóculo de rumen de vacuno añadido a cada fermentador. El volumen total de biogás producido a partir de la mezcla de substrato uno fue de 104 litros en un tiempo de fermentación de 7 meses y 6 días; y a partir de la mezcla de substratos dos 452 litros, en un tiempo de fermentación de 7 meses y 19 días (Castillo & Tito, 2010).

Para producir biogás, por fermentación discontinua, en un digestor cilíndrico de 268,6 litros se agregó 10 kilogramos de estiércol de cuy, previamente humedecido por dos días para activar a las bacterias, más 10 litros de agua, y se dejó fermentar anaeróbicamente lo cargado por 22 días dando como resultado, a una temperatura de 28°C y a una presión manométrica de 2 kilogramos de presión, un gas no inflamable. En este mismo digestor con la misma carga fermentativa, después de expulsarse todo el gas producido y quedar cerrado herméticamente, se dejó que continuara la fermentación durante 28 días, tiempo en el cual a una temperatura de 23°C y a una presión manométrica de 2,5 kilogramos de presión se obtuvo un gas que fue nuevamente no inflamable. El digestor fue descargado totalmente y se volvió a cargar con 7 kilogramos de estiércol de cuy, un kilogramo de rumen de vacuno como inóculo más

20 litros de agua y se dejó que fermentara anaeróbicamente lo agregado durante 20 días, tiempo en el cual cuando la fermentación estuvo a 30°C y a una presión manométrica de 2 kilogramos de presión se obtuvo el biogás, un gas inflamable, cuya combustión en un mechero Bunsen duró 10 minutos (Delgado, 2006).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Biogás y aplicaciones

La descomposición anaeróbica por bacterias de la materia orgánica produce un gas que contiene más de un 60% de CH₄. Este gas se designa usualmente como biogás, se puede aprovechar para producir y vender electricidad, emplearlo como biocarburante de automoción, utilizarlo para generar calor e introducirlo en la red de distribución de gas natural. Es una de las energías renovables más accesible, dada la facilidad de su obtención. Asimismo, su uso genera una menor contaminación ambiental y constituye una alternativa viable al agotamiento de energías fósiles, como el gas natural y el petróleo, en los cuales se viene observando un incremento de los precios durante los últimos años (Soube, 1994; Cuesta & cols, 2008).

2.2.2. Países generadores de tecnología de producción de biogás

Los países generadores de tecnología más importantes en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania (Hilbert, 2010). En nuestro país existen muy pocos trabajos de investigación sobre producción de biogás.

2.2.3. Substratos para producción de biogás

Para producir biogás se pueden emplear diversos materiales orgánicos tales como residuos vegetales, estiércol, basura doméstica, camalotes, algas, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, pulpado y papel, y químicas (Wheatley, 1990). En nuestro medio, el estiércol de cuy, que proviene de la crianza del cuy a lo largo y ancho del país, y los restos vegetales de la poda de la grama americana, presente como césped en muchos jardines y parques de Tacna y otras ciudades del país, constituyen materiales orgánicos que pueden aprovecharse para la producción de biogás (Delgado, 2006; Castillo & Tito, 2010); sin embargo, no se tiene información sobre la influencia de la longitud de estos materiales orgánicos, como substratos, para la producción de biogás.

2.2.4. Etapas bioquímicas y microbios de la producción de biogás

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica consta de cuatro etapas en las que intervienen diferentes tipos de bacterias: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Verma, 2002; Carrillo, 2003; González & Sandoval, 2005). Las metanobacterias solo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los substratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus* spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto (Jagnow, 1991); por lo cual en este proceso anaeróbico se suceden dos grupos generales de bacterias o microbios que son los microbios facultativos y luego los microbios metanogénicos. Se sabe, para este proceso, es crítico el uso de un inóculo de microorganismos para comenzar el proceso de fermentación (Yadvika et al., 2004).

En el proceso de producción de biogás se suceden cuatro etapas (Fig. 1); en la primera etapa, participan las bacterias hidrolíticas, encargadas de romper los polímeros orgánicos (polisacáridos, proteínas, y lípidos) para convertirlos a monómeros tales como; los ácidos grasos volátiles de cadena larga, los alcoholes, el H₂ y CO₂; posteriormente, en

una segunda etapa, intervienen las bacterias fermentativas o acidogénicas que transforman los productos formados durante la hidrólisis en ácido acético y compuestos intermedios como el etanol, el ácido láctico, el ácido propiónico, el ácido fórmico y el ácido butírico, además de H_2 y CO_2 , estos productos, en una tercera etapa, son convertidos en acetato, H_2 y CO_2 por bacterias acetogénicas. Finalmente, en una cuarta etapa el CH_4 es producido por bacterias metanogénicas a partir del acetato, el H_2 y del CO_2 (Bouallagui et al, 2005; Díaz y Molina, 2002; Hedrick et al, 1992).



Figura 1: Etapas del proceso de producción de biogás.

Fuente: Bouallagui et al, 2005; Díaz y Molina, 2002; Hedrick et al, 1992

En la primera etapa, etapa de hidrólisis, se da el primer paso necesario para la degradación de la materia orgánica compleja. En esta etapa, las bacterias hidrolíticas actúan sobre las macromoléculas orgánicas despolimerizándolas enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. Así, los lípidos son degradados por enzimas hidrolíticas (lipasas) a ácidos grasos de cadena larga y glicerina. Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosas, péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos.

En la segunda etapa, etapa acidogénica, los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior son transformados por las bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), alcoholes, amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos grasos volátiles son principalmente ácido acético, propiónico, butírico y valérico. En esta etapa se debe controlar la cantidad de hidrógeno, porque el metabolismo de las bacterias acidogénicas depende de él.

En la tercera etapa, etapa acetogénica, mientras que algunos productos de la fermentación (hidrógeno y ácido acético) pueden ser metabolizados

directamente por los organismos metanogénicos, los productos intermedios (ácido propiónico, butírico, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas. Las bacterias acetogénicas también necesitan un control exhaustivo de la concentración de hidrógeno, ya que con una elevada presión de hidrógeno se reduce la formación de acetato, produciendo preferentemente ácido propiónico, butírico o etanol en vez de metano.

En la cuarta etapa, etapa metanogénica, etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).





La principal vía de producción de metano es la metanogénica acetoclásica, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica (Marchaim, 1992; Jarvis, 2004; Measa, 2010).

Durante la bioconversión de materiales orgánicos a metano las distintas etapas tienen distinta velocidad: la degradación de la celulosa ocurre en semanas, la de las hemicelulosas y proteínas en días y la de las moléculas pequeñas, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, en horas, pero la lignina no es degradada en la mayoría de los sistemas de digestión anaeróbica (Bjorndal, 1988).

De modo que la degradación de la materia orgánica para producir metano depende de la interacción de varios grupos de diferentes bacterias. Una operación estable del digestor requiere que estos grupos de bacterias se encuentren en un equilibrio dinámico y armónico. Los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar este equilibrio, y resultar en un aumento de microorganismos intermediarios que pueden

inhibir todo el proceso. Esto tiene una importancia extrema para comprender hacia que direcciones se mueven los procesos microbiológicos y bioquímicos y poder dirigir el sistema de digestión para producir biogás (Marchaim, 1992).

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H_2 y el CO_2 que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariotas (Madigan et als, 2003). Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2 . Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si este se halla en alta concentración. Además el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos (Schlegel, 1993).

Los organismos clave en la conversión de compuestos orgánicos complejos a metano son los fermentadores secundarios, especialmente

las bacterias oxidantes de ácidos grasos o alcoholes que producen H_2 , pues utilizan estos compuestos como fuente de energía en cultivos mixtos con un consumidor de H_2 a través de una relación sintrófica (sintrofia = comiendo juntos). La energía libre asociada a las conversiones de los ácidos grasos es positiva, pero si la concentración de H_2 se mantiene muy baja debido al consumo constante por los metanógenos pasa a tener signo negativo lo que determina su factibilidad. En la mayoría de los ecosistemas anóxicos, la acetogénesis limita el proceso global porque la velocidad de crecimiento de los microorganismos intervinientes es generalmente muy lenta (Madigan et al, 2003).

2.2.5. Biodigestor discontinuo

La producción de biogás puede operar en diferentes formas, en una de ellas es por fermentación discontinua; el cual se realiza en un biodigestor que puede ser rectangular o cilíndrico que opera en régimen discontinuo. Los digestores discontinuos se utilizan frecuentemente para la fermentación seca de la FORSU (Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos) con concentración entre el 20% y 40% de ST, así como en el tratamiento de residuos ganaderos con una alta fracción de partículas sólidas suspendidas (De Mes et al., 2003). En este trabajo se utilizó una

alta fracción de partículas sólidas suspendidas y de allí, entre otras razones, la decisión que se tuvo para trabajar en una fermentación discontinua.

Los digestores discontinuos se utilizan principalmente en el tratamiento de los residuos orgánicos con elevada concentración en sólidos, ya que estos dificultan la utilización de los sistemas de bombeo necesarios en los sistemas continuos. Por ello, se utilizan en el tratamiento de determinados residuos ganaderos con una alta fracción de partículas sólidas suspendidas y, en menor medida, en el tratamiento de la FORSU (Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos) en fermentaciones secas con concentraciones entre el 20% y 40% de ST(sólidos totales) (De Mes et al., 2003; Elías, 2005).

Los digestores pueden combinarse para conseguir sistemas de degradación anaeróbica más eficientes en función del tipo de residuo. Esta combinación lleva al establecimiento de los sistemas de dos o más fases para la producción de biogás basada en el hecho que los distintos grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica requieren diferentes condiciones de pH y tiempo de

retención para su crecimiento óptimo; por lo tanto, pueden realizarse las fases que constituyen el proceso de digestión en diferentes reactores; de tal modo, por ejemplo, que en un primer reactor ocurra la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica, mientras que en un segundo reactor se lleve a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. En el primer reactor, la velocidad de reacción viene determinada por la velocidad de hidrólisis de la celulosa y en el segundo, por la velocidad de crecimiento microbiano. Este tipo de sistemas ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos y fangos complejos cuyo limitante es la etapa de hidrólisis (Elías, 2005).

2.2.6. Fundamento del establecimiento de influencia del substrato e inóculos microbianos sobre la producción de biogás

En un experimento de caracterización, normalmente interesa determinar cuáles variables de un proceso influyen en la respuesta para luego pasar a un proceso de optimización (Montgomery, 1991). En este trabajo las variables substrato e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos a diferentes niveles son los que se han estudiado para establecer si tienen influencia en la producción de biogás.

2.2.7. Biodigestión para la producción de biogás

La biodigestión anaerobia puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas que van desde los 5°C hasta los 60°C. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlingmaie, 2006; Ciro & González, 2007).

Los sustratos ideales para la digestión anaerobia en biodigestores son los desechos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial, doméstico y municipal, así como las excretas de origen humano y animal. Los residuos de la industria alimentaria y de las actividades agrícolas en particular, son excelentes como sustratos para la digestión anaerobia, ya que no contienen contaminantes, patógenos, ni metales pesados. La presencia

de nutrientes como carbono, nitrógeno y azufre, así como algunos elementos traza, es necesaria para el desarrollo de las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás. La relación carbono-nitrógeno debe estar en una proporción de entre 20 y 30 partes del primer elemento por cada parte del segundo. Si la proporción de nitrógeno aumenta, la producción de biogás puede disminuir debido a la formación de amonio, el cual se genera durante la degradación anaeróbica de úrea o proteínas. El amonio libre puede ser inhibitorio para la fermentación anaeróbica y tóxico para las bacterias metanogénicas (Guevara, 1996; Gallert & Winter, 1997; Cui & Jahng, 2006).

En este sentido no se recomienda utilizar un solo tipo de sustrato. Lo ideal es por el contrario, combinar materiales ricos en nitrógeno con materiales abundantes en carbono para obtener un buen balance de nutrientes que promueva el adecuado crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del biodigestor y, de esta manera, aumentan la productividad del mismo (Guevara, 1996).

El rendimiento de un sistema de digestión anaeróbica está ligado, principalmente, a la estructura de la comunidad microbiana presente en el

digestor. Los parámetros ambientales y de operación del proceso afectan el comportamiento, rendimiento y, eventualmente, el destino de la comunidad microbiana en los digestores anaeróbicos. La naturaleza de los lodos usados para la inoculación afectan el sistema de digestión anaeróbico (Demirel & Scherer, 2008). La adición de una pequeña cantidad de bacterias termofílicas aeróbicas (TA) tiene un gran potencial como tratamiento rentable para acelerar la digestión anaeróbica de desechos biológicos. La adición de 5% (v/v) de lodos TA al lodo metanogénico aumentó la producción de biogás con una concentración de metano de 50%-67%. Esto se debe a que, durante la solubilización de lodos, las enzimas de bacterias TA excretadas influenciaron la hidrólisis de los lodos durante la digestión anaeróbica (Rivas & cols., 2010).

El proceso en un digestor difiere de otros tipos de fermentaciones en que no es necesario utilizar cultivos puros de microorganismos. Las diversas bacterias capaces de descomponer las sustancias orgánicas y producir biogás están ampliamente distribuidas en la naturaleza. Se encuentran, por ejemplo en los excrementos animales y humanos. Estas bacterias pueden activarse y mantenerse indefinidamente con un manejo adecuado (Van et al, 1995). En el inicio de un proceso anaeróbico es crítico el uso

de un inóculo de microorganismos para comenzar el proceso de fermentación. Los materiales comunes de siembra, inóculo, incluyen lodo digerido de una planta de biogás en proceso de producción, rumen o estiércol de vaca (Yadvika et al, 2004).

Para promover un aumento en la productividad de los biodigestores es posible inocularlos con fuentes conocidas de microorganismos metanógenos como el rumen de vaca, lo cual representa una alternativa eficiente y de bajo costo (Rivas & cols., 2010).

Las metanobacterias solo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los substratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus* spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto, de manera que el potencial redox haya alcanzado en un valor menor que -200 mV. Además, el pH no debe bajar demasiado, debido a los ácidos producidos por los *Clostridium*, para no inhibir el crecimiento de los metanógenos (Jagnow, 1991).

2.2.8. Parámetros que tienen influencia en la producción de biogás

Para que las bacterias aseguren su ciclo biológico en el proceso de digestión anaerobia es necesario que se presenten en condiciones óptimas los siguientes factores:

Temperatura: Las bacterias mesófilas completan su ciclo biológico en el ámbito de 15°C a 40°C con una temperatura óptima de 35°C. Las bacterias termofílicas cumplen sus funciones en el ámbito de 35°C a 60°C con una temperatura óptima de 55°C.

Hermetismo: Para que el proceso de digestión se lleve a cabo en forma eficiente, el tanque de fermentación debe estar herméticamente cerrado.

Presión: La presión subatmosférica de 6 cm de agua dentro del biodigestor se considera la presión óptima (Kennedy & Berg, 1982).

Tiempo de retención: Es el tiempo promedio en que la materia orgánica es degradada por los microorganismos. Se ha observado que a un tiempo corto de retención se produce mayor cantidad de biogás, pero un residuo de baja calidad fertilizante por haber sido parcialmente digerido. Pero para tiempos largos de retención se obtendrá un rendimiento bajo de biogás,

pero con un efluente (residuo) más degradado y con excelentes características como fuente de nutrimentos.

Relación C/N: La relación óptima de C/N es de 30:1, cuando la relación es muy estrecha (10:1) hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno.

Porcentaje de sólidos: El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir es de 7 a 9 y se consigue al diluir el material orgánico con agua.

pH: En digestores operados con estiércol de bovino, los valores óptimos de operación oscilan entre 6,7 y 7,5 con límites de 6,5 a 8,0 (Hayes et al., 1979).

Agitación: Esta práctica es importante para establecer un mejor contacto de las bacterias con el substrato (Soria & Col., 2001).

2.3. Definición de términos

- **Influencia**

Algo que determina en otro una respuesta.

- **Substrato**

Material que posee nutrientes, biológicamente transformable.

- **Inóculo**

Cantidad determinada de microorganismos a agregar.

- **Microbio**

Ser vivo microscópico que a simple vista no es observable.

- **Anaeróbico**

Condición de ausencia de oxígeno.

- **Anaeróbico facultativo**

Organismo que normalmente crece en presencia de oxígeno pero podría crecer también en ausencia de oxígeno.

- **Metanogénico**

Organismo que produce metano.

- **Fermentación**

Proceso que a partir de materiales biológicos se obtiene productos para beneficio del hombre.

- **Fermentación discontinua**

Fermentación que desde el punto de vista operacional se inicia con una sola carga del fermentador y después de un tiempo termina con la descarga del producto.

- **Biodigestión**

Es la digestión, hidrólisis y transformación de sustancias complejas a sustancias simples, de materiales biológicos por organismos.

- **Producción**

Proceso que origina o incrementa algo.

- **Productividad**

Es la relación de la producción con el tiempo en el cual se ha efectuado la producción.

- **Rendimiento**

Es la relación de la producción con la cantidad o concentración del substrato a partir del cual se ha obtenido el producto.

- **Biogás**

Es una mezcla de gases, combustible, que tiene como componente principal al metano en una concentración de 50% a más.

- **Condición natural**

Situación en la que se presenta algo sujeta a los factores naturales.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo

La investigación se clasificó como:

- Aplicada, porque aporta conocimientos de aplicación inmediata a la solución de problemas prácticos.
- Experimental, porque en la investigación se manipula una o más variables para ver sus consecuencias sobre una o más variables, asignación aleatoria a los grupos.
- Prospectiva, el investigador comienza con la observación de supuestas causas y después observa las consecuencias.
- Cuantitativa, porque se cuantifican o miden numéricamente las variables o aspectos estudiados.

3.1.2. Diseño

Se aplicó un diseño en bloques completamente aleatorizado, con tres tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones que hicieron un total de 12 unidades experimentales.

Los tratamientos fueron los siguientes:

T1: substrato fermentativo (2 mm) con microbios anaeróbicos facultativos (1×10^4 microb /ml) y metanogénicos (1×10^4 microb /ml)

T2: substrato fermentativo (4 mm) con microbios anaeróbicos facultativos (1×10^6 microb /ml) y metanogénicos (1×10^6 microb /ml)

T3: substrato fermentativo (6 mm) con microbios anaeróbicos facultativos (1×10^8 microb /ml) y metanogénicos (1×10^8 microb /ml)

Tabla 1.

Valores del sustrato, microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos de cada uno de los tratamientos dados en la experimentación de producción de biogás

Tratamientos con repetición	Subst. (mm)	Microb. Anaerob. Facultativo (microb./ml)	Microb. Metanogénico (microb./ml)
T-R1	2	1×10^4	1×10^4
T-R2	2	1×10^4	1×10^4
T-R3	2	1×10^4	1×10^4
T-R4	2	1×10^4	1×10^4
ToR1	4	1×10^6	1×10^6
ToR2	4	1×10^6	1×10^6
ToR3	4	1×10^6	1×10^6
ToR4	4	1×10^6	1×10^6
T+R1	6	1×10^8	1×10^8
T+R2	6	1×10^8	1×10^8
T+R3	6	1×10^8	1×10^8
T+R4	6	1×10^8	1×10^8

Fuente: Elaboración propia, agosto 2015.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población: La población fue sustrato fermentativo con inóculo microbiano.

3.2.2. Muestra: 28,16 L de mezcla del sustrato fermentativo (estiércol de cuy, grass y agua) con inóculo microbiano (microbios anaeróbicos facultativos y microbios metanogénicos).

3.3. Operacionalización de variables

Variable independiente: sustrato fermentativo.

Definición conceptual: suspensión de materia orgánica, formada por grass más estiércol de cuy ambos con una misma longitud, que sirve para ser transformado en biogás.

Definición operacional: aplicación de diferentes longitudes del sustrato fermentativo.

Variable independiente: Inóculo microbiano anaeróbico facultativo.

Definición conceptual: cantidad determinada de microbios anaeróbicos facultativos que tienen la facultad de vivir en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Definición operacional: aplicación de diferentes concentraciones del inóculo microbiano anaeróbico facultativo.

Variable independiente: Microbios metanogénicos

Definición conceptual: Cantidad determinada de microbios metanogénicos que tienen la facultad de vivir en condiciones estrictamente anaeróbicas.

Definición operacional: Aplicación de diferentes concentraciones del inóculo microbios metanogénicos.

Variable dependiente: Producción de biogás

Definición conceptual: Biogás que se genera por transformación del substrato fermentativo por la actividad microbiana.

Definición operacional: Cantidad de biogás generado a partir del substrato fermentativo.

Variable dependiente: Productividad de biogás

Definición conceptual: Biogás que se genera durante un tiempo determinado de actividad fermentativa.

Definición operacional: Cantidad de biogás generado durante un tiempo determinado de actividad fermentativa.

Variable dependiente: Rendimiento de biogás

Definición conceptual: Relación de biogás producido a partir del substrato.

Definición operacional: Relación de cantidad de biogás generado a partir de una cantidad del substrato.

Tabla 2.

Operacionalización de las variables independiente y dependiente para la producción de biogás

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA/ CATEGORÍA	TIPO DE VARIABLE	NIVEL DE MEDICIÓN
Variable independiente:					
Substrato	Materia orgánica	mm	Longitud	Cuantitativa	Continua
Inoculo microbiano anaeróbico facultativo	Microbios aeróbicos	Nº microb/ml	Concentración	Cuantitativa	Continua
Inóculo microbiano metanogénico	Microbios anaeróbicos	Nº microb/ml	Concentración	Cuantitativa	Continua
Variable dependiente:					
Producción de biogás	Producto orgánico	cm ³	Volumen	Cuantitativa	Continua
productividad de biogás	Rapidez de producción	cm ³ /día	Volumen/tiempo	Cuantitativa	Continua
rendimiento de biogás	Razón de producción	cm ³ /g	Volumen/masa	Cuantitativa	Continua

Fuente: Elaboración propia, 2012

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.4.1. Fase de laboratorio

Se llevó a cabo en los ambientes del laboratorio del Bioterio, laboratorio de Micología Virología y laboratorio de Química inorgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.

3.4.1.1. Materiales

- **Substrato en estudio**

Estuvo conformado por estiércol de cuy, grass y agua. El estiércol de cuy fue colectado de criaderos de cuyes y transportado en sacos de Rafia a la ciudad universitaria a un apartado del Bioterio de la Facultad de Ciencias de la UNJBG, estuvieron sobre mantas de plástico en el suelo, donde se extendió y revolvió periódicamente hasta que estuvo seco en forma uniforme por acción de la luz solar. El grass fue colectado de montones de grass, provenientes de la poda del césped de jardines, transportado y secado por separado, en el mismo lugar y en forma similar, a lo realizado para el estiércol de cuy.

- **Inóculo microbiano**

Se obtuvo a partir de un inóculo microbiano primario constituido por el rumen del estómago de una res del ganado vacuno, esto se obtuvo en el camal municipal de Tacna, y trasladado en baldes herméticamente cerrados al área de la experimentación (en uno de los ambientes del laboratorio del Bioterio de la Facultad de Ciencias, UNJBG).

- **De vidrio**

Beakers, pipetas Pasteur, probeta, tubos de ensayo.

- **Otros materiales**

Cámara de Neubauer, cilindros de polietileno, termómetros, llaves de grifo de plástico, bomba de aireación, mangueras de conexión y palos de madera.

3.4.1.2. Equipos

Autoclave, horno, mufla, biodigestores de polietileno, pHmetro, microscopio binocular compuesto.

3.4.1.3. Obtención y preparación del substrato fermentativo

El estiércol de cuy y el grass secos fueron cortados en segmentos pequeños, por separado, con ayuda de tijeras. Estos segmentos fueron tamizados con tres tamices metálicos que tuvieron aberturas cuadradas, el primero de 2 mm, el segundo de 4 mm y el tercero de 6 mm. En función de esto la longitud del segmento tamizado del material orgánico correspondiente fue asumido como de 2, 4 y 6 mm según el tamíz empleado; no obstante que el material orgánico considerado de 2 mm, cuando fue medido con una regla, su longitud real osciló entre 0,01 a 2 cm; para el de 4 mm entre 0,5 a 4 cm y para el de 6 mm entre 2 y 5 cm. Cada material orgánico asumido como de 2, 4 y 6 mm de longitud fue depositado en bolsas para su uso posterior.

3.4.1.4. Caracterización del sustrato fermentativo. Determinación del carbono y nitrógeno del estiércol y grass por separado y en mezcla:

Estas determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de Química inorgánica de la Facultad de Ciencias de la UNJBG por el personal especializado. Las muestras empleadas para estos análisis fueron aquellas que previamente fueron secadas al sol. La muestra mezcla (20g) estuvo formada por 3,66 g de grass (2 volúmenes) y 16,34 g de estiércol de cuy (1 volumen).

3.4.1.5. Prefermentado del sustrato

Se hizo 3 prefermentados, uno por cada longitud del sustrato (2, 4 y 6 mm). En cada prefermentado la longitud del estiércol de cuy y el grass componentes del sustrato de cada prefermentado fue la misma. Cada prefermentado se hizo en un cilindro, abierto en su parte superior, que funcionó como fermentador aeróbico dentro del cual se colocó un volumen total de suspensión de sustrato acorde al volumen total de suspensión de sustrato que se necesitó para todas las biodigestiones discontinuas de producción de biogás previstas en el diseño experimental. En el fermentador aeróbico se colocó dos

volúmenes de grass, un volumen de estiércol de cuy seco y un volumen de agua, los cuales fueron mezclados con ayuda de un palo de madera. Luego el fermentador fue incubado a temperatura ambiente con mezclas diarias, durante 15 minutos tanto en la mañana como en la tarde, durante 4 días; posterior a este tiempo en el fermentador se adicionó dos volúmenes de agua y se siguió incubando realizando el mezclado diario hasta el día en que la mezcla adoptó la apariencia de una mermelada de fresa, que fue el indicativo de la obtención del prefermentado (Castillo & Tito, 2011). De este prefermentado, luego, se sacarían los volúmenes que sirvieron para cargar a los biodigestores, volúmenes de 80% de la capacidad del biodigestor (32 L) , es decir 25,6 L para cada biodigestor.

3.4.1.6. Caracterización de temperatura y humedad ambiental del prefermentado

Se registró periódicamente la temperatura y la humedad ambiental con un termohigrómetro digital instalado a un metro de altura y distancia de los fermentadores en los cuales estuvo realizándose la prefermentación.

3.4.1.7. Caracterización química del prefermentado (pH, DBO₅)

Determinación del pH

Fue realizada por personal especializado en diferentes fechas del proceso de la prefermentación en el laboratorio de Química General de la Facultad de Ciencias de la UNJBG. Para el pH se utilizó un pHmetro de electrodos de mesa y muestras de prefermentado de 10 ml para cada determinación. Para el DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) también se requirieron muestras de 10 ml.

3.4.1.8. Obtención y preparación de los microbios anaeróbicos facultativos para la biodigestión

El rumen obtenido del estómago de una res del ganado vacuno, en el camal municipal de Tacna, fue trasladado en baldes herméticamente cerrados al área de experimentación (uno de los ambientes del laboratorio del Bioterio de la Facultad de Ciencias, UNJBG) luego del cual fue homogenizado con ayuda de un palo de madera e inmediatamente sometido a un conteo del número de microbios por mililitro haciendo uso de una cámara de Neubauer y un microscopio binocular de campo claro. Se separó la parte fibrosa del rumen pasándolo a través de una malla de

6 mm separando en dos volúmenes lo colado (rumen sin fibra), uno de los cuales se esterilizó en la autoclave durante 15 minutos a 121°C y a 15 libras de presión y el otro se aireó con 0,6 VVM de aireación con ayuda de una bomba de aireación de pecera, a temperatura ambiente, durante 36 horas, tiempo en el cual se hicieron conteos de los microbios con ayuda de la cámara de Neubauer y del microscopio binocular de campo claro para efecto de determinar el momento de estado de la concentración más alta (10^8 microb./ml), detener la aireación y considerar al rumen aireado a esa concentración como el inóculo microbiano anaeróbico facultativo con nivel alto (+) (10^8 microb./ml). Del volumen total de este inóculo con esa concentración de microbios se separó 4 volúmenes iguales, cada una con un 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), un número de volúmenes que correspondió al número de inóculos con esa concentración prevista en el diseño experimental (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel +).

Para obtener los otros inóculos nivel medio (0) (10^6 microb./ml) y nivel inferior (-) (10^4 microb./ml) se procedió de la siguiente manera: para el inóculo de nivel 0 se tomó una cantidad determinada del volumen inicial inóculo microbiano anaeróbico facultativo nivel + y se le separó en 4 volúmenes iguales cada una con una cantidad de la 1/100 parte de 5%

del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), agregándole inmediatamente a cada volumen rumen colado esterilizado hasta que enrazó a una cantidad de 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32 L). El número de 4 volúmenes correspondió al número de inóculos con la concentración prevista en el diseño experimental (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel 0). Para obtener el inóculo de nivel - se tomó una cantidad determinada del volumen inicial inóculo microbiano anaeróbico facultativo nivel + y se le separó en 4 volúmenes iguales cada una con una cantidad de la 1/1000 parte del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), agregándole inmediatamente a cada volumen rumen colado esterilizado hasta que enrazó a una cantidad del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), un número de volúmenes que correspondió al número de inóculos con esa concentración prevista en el diseño experimental (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel -). Es decir, de inóculo microbiano anaeróbico facultativo, se agregó a cada biodigestor un volumen de 1,28 L.

3.4.1.9. Obtención y preparación de los microbios metanogénicos para la biodigestión

Se obtuvo un segundo rumen, del estómago de otra res de ganado vacuno, en el camal municipal de Tacna; 15 días después de obtenido el rumen anterior; este fue trasladado en baldes herméticamente cerrados al área de experimentación (a un costado del Bioterio de la Facultad de Ciencias, UNJBG) donde fue homogenizado con ayuda de un palo de madera e inmediatamente sometido a un conteo del número de microbios por mililitro; haciendo uso de una cámara de Neubauer y un microscopio binocular de campo claro; para luego separar la parte fibrosa del rumen, pasándolo a través de una malla de 6 mm, y separar en dos volúmenes lo colado (rumen sin fibra). Uno de los volúmenes colados se esterilizó en la autoclave durante 15 minutos a 121°C y a 15 libras de presión y el otro se sometió al conteo del número de microbios por mililitro con ayuda de una cámara de Neubauer y un microscopio binocular donde se obtuvo 10^8 microb./ml, valor que correspondió al del inóculo microbios metanogénicos nivel + (10^8 microb./ml). Del volumen total de este inóculo se separó 4 volúmenes iguales cada una con una cantidad de 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32 L), un número de volúmenes que correspondió al número de inóculos con esa concentración previstas en el diseño del experimento (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel +).

Para obtener los otros inóculos nivel 0 (10^6 microb./ml) y nivel - (10^4 microb./ml) se procedió de la siguiente forma: para obtener el inóculo de nivel 0 se tomó una cantidad determinada del volumen inicial inóculo microbio metanogénico nivel + y de este se separó 4 volúmenes iguales cada uno con una cantidad de la 1/100 parte del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32 L), agregándole inmediatamente a cada volumen rumen colado esterilizado hasta que enrazó a una cantidad del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), un número de volúmenes que correspondió al número de inóculos con esa concentración previstas en el diseño experimental (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel 0); luego, para obtener el inóculo de nivel - se tomó un volumen determinado del volumen inicial inóculo microbiano anaeróbico facultativo nivel + y de este se separó 4 volúmenes iguales cada uno con una cantidad de la 1/1000 parte del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), agregándole inmediatamente a cada volumen rumen colado esterilizado hasta que enrazó a una cantidad del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor (32L), un número de volúmenes que correspondió al número de inóculos con esa concentración previstas en el diseño experimental (4 inóculos, 4 fermentaciones con nivel -). Es decir, de inóculo

microbiano metanogénico, se agregó a cada biodigestor un volumen de 1,28 L.

3.4.1.10. Diseño y construcción del biodigestor para la biodigestión

Los biodigestores (12) que se construyeron tuvieron el mismo diseño, se construyeron con los mismos materiales y en la misma forma. La capacidad de cada biodigestor de forma cilíndrica, de polietileno, fue de 32 litros. En su tapa, parte superior, se hizo dos aberturas una para que quedara fijado un termómetro y la otra para una llave de paso de ½ pulgada de polietileno que sirvió a su vez para la medición de la presión manométrica conectándolo a un manómetro de columna de agua, así mismo para medir el volumen de biogás, por desplazamiento de volumen de agua, conectándolo a través de una manguera a una probeta invertida llena de agua. En su parte lateral, a un cuarto de altura de su base, se hizo una sola abertura, este sirvió para que quedara fijo una llave de ½ pulgada de polietileno para la toma de muestra que serviría para evaluar el pH.

3.4.1.11. Biodigestión para la producción de biogás

Se agregó a cada biodigestor, por su parte superior previo retiro de la tapa, un volumen de prefermentado del 80% de su capacidad, con ayuda de baldes plásticos. Luego se agregó el inóculo microbios anaeróbicos facultativos en un volumen del 5% del 80% de la capacidad del biodigestor siguiendo el diseño experimental. A continuación se cerró el biodigestor herméticamente con su tapa y se dejó en incubación a temperatura ambiente al aire libre bajo sombra en un área ubicada al costado del Bioterio de la Facultad de Ciencias de la UNJBG, estableciéndose así el inicio de la fermentación. Posteriormente a los 15 días se abrió la tapa del biodigestor, se agregó un volumen de 5% del 80% de la capacidad del biodigestor del inóculo microbios metanogénicos siguiendo el diseño experimental, y se cerró herméticamente la tapa del biodigestor. Cada biodigestor continuó incubándose hasta que se obtuvo la primera producción de biogás.

3.4.1.12. Caracterización química de la biodigestión (pH y DQO)

Se registró el pH y la DQO (Demanda Química de Oxígeno) al inicio y al término de la biodigestión en los tres tratamientos. El pH se evaluó con ayuda de un pHmetro de electrodos de mesa. Tanto el pH como el DQO fueron determinados en el laboratorio de Química inorgánica de la

Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por el personal especializado.

3.4.1.13. Caracterización de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión

La caracterización de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión se hizo en el laboratorio de Química inorgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por el personal especializado utilizando muestras de suspensiones del substrato del inicio y del término de la biodigestión.

3.4.1.14. Evaluación de la producción de biogás en la biodigestión

Se registró el volumen de biogás de cada producción en cada uno de los biodigestores posterior a su acumulación máxima en la cámara de almacenamiento del biodigestor, aplicando el método desplazamiento de volumen de agua. La acumulación máxima de biogás fue considerada como tal cuando se notó un abombamiento significativo de la tapa del biodigestor.

Se determinó la calidad y el tiempo de quemado del biogás en un mechero Bunsen. La calidad del biogás se consideró como buena cuando en el mechero Bunsen se originó una llama azul clara constante; regular, cuando fue azul naranja; y mala, cuando fue de color naranja rojiza. El tiempo de quemado se determinó desde que el biogás almacenado de cada biodigestor, al prenderse con fuego en el mechero Bunsen, originó una llama y luego de mantenerse prendida por un tiempo se apagó.

Se determinó la presión manométrica de cada volumen parcial de biogás producido en cada biodigestor con ayuda de un manómetro de columna de agua para después encontrar el grado de relación que hay entre el volumen de biogás producido y su respectiva presión en el biodigestor.

3.4.1.15. Evaluación de la temperatura y humedad ambiental en la biodigestión

Se registró periódicamente la temperatura interna de los biodigestores con ayuda del termómetro de mercurio de bulbo instalado en el biodigestor, así mismo la temperatura y humedad ambiental con ayuda de un

termohigrómetro digital instalado a un metro de distancia y altura de donde estuvieron los biodigestores.

3.4.1.16. Determinación de la producción de biogás total de cada tratamiento de la biodigestión

La producción total de biogás para cada tratamiento se estableció sumando las producciones parciales de biogás que se obtuvieron durante el tiempo que duró la biodigestión de producción de biogás.

3.4.1.17. Determinación de la productividad de biogás total de cada tratamiento de la biodigestión

La productividad total de biogás para cada tratamiento se estableció dividiendo la producción total con el tiempo que duró la biodigestión de producción de biogás.

3.4.1.18. Determinación del rendimiento de biogás en la biodigestión

Se determinó dividiendo la producción de biogás con el peso de sólidos totales inicialmente contenido en el biodigestor (2 398,32 g) (Anexo 10).

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Se utilizó el análisis de variancia (ANVA) usando la prueba F a un nivel de significación de 0,05 para determinar diferencias significativas entre los tratamientos; así mismo se aplicó la prueba de DMS (diferencia de medias significativa) para establecer el orden de los tratamientos, y se determinó si hubo efecto significativo en los diferentes tratamientos. Los datos fueron analizados usando la hoja de cálculo Microsoft Excel 2010.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Determinación de Carbono y Nitrógeno del sustrato fermentativo para prefermentación

Tabla 3.

Datos de porcentaje de carbono, nitrógeno, relación de carbono, nitrógeno y cenizas de los componentes y mezcla (grass y estiércol de cuy) del sustrato fermentativo para la producción de biogás

SUBSTRATO FERMENTATIVO	SUBSTRATO SECO (%)	HUMEDAD (%)	CENIZA (%)	CARBONO (%)	NITRÓGENO (%)	C/N
GRASS	95,84	4,16	14,43	40,00	1,36	29,41
ESTIER.CUY	96,33	3,67	19,70	47,30	1,84	25,71
MEZCLA	-----	-----	-----	44,42	1,65	26,92

Fuente: Elaboración propia, 2012.

La tabla 3 muestra los valores del porcentaje de carbono y de nitrógeno como la relación C:N del sustrato (mezcla de estiércol y grass) que se empleó en la prefermentación para la producción de biogás.

4.2. Determinación del pH y del DBO₅ en prefermentación

Tabla 4.

Datos de caracterización química (pH y DBO₅) del proceso de prefermentado en los tratamientos T₋, T_o y T₊ para la producción de biogás desarrollado en el 2012

Tiempo (días) (fecha)	pH ---DBO ₅ (mg/l)		
	T ₋	T _o	T ₊
(06) (16/10/2012)	7,88-- 464,0	8,13---462,0	8,24---461,0
(15) (25/10/2012)	7,66	7,55	7,80
(26) (05/11/2012)	7,62---439,0	7,45---438,5	7,66---401,5

Fuente: Elaboración propia, 2012.

La tabla 4 muestra los valores de pH, en el intervalo ligeramente alcalino, como fue disminuyendo; así mismo como fue disminuyendo el DBO₅ en la prefermentación para la producción de biogás.

4.3. Humedad y temperatura ambiental en prefermentación

Tabla 5.

Datos diarios de humedad y temperatura ambiental del prefermentado en sus tratamientos T₋, T₀, T₊ para la producción de biogás

DIA	HUMEDAD	TEMP.AMB.
0	42	28,8
4	63	19,3
5	41	24,5
6	37	27,9
8	46	23,5
9	41	28,9
10	37	27,0
11	68	17,0
12	54	22,0
13	40	26,0
15	40	26,0
16	51	23,0
17	53	23,5
18	44	26,4
19	46	26,0
20	52	23,3
21	51	24,2
22	41	27,0
23	32	28,3
24	69	18,3
25	56	21,0
26	51	23,0

Fuente: Elaboración propia, 2012.

La tabla 5 muestra los valores diarios que osciló para la humedad relativa, entre 32% y 69%; y para temperatura ambiental entre 17°C y 28,9°C, valores a los que estuvieron sometidos los tratamientos T₋, T₀, T₊ en la prefermentación para la producción de biogás.

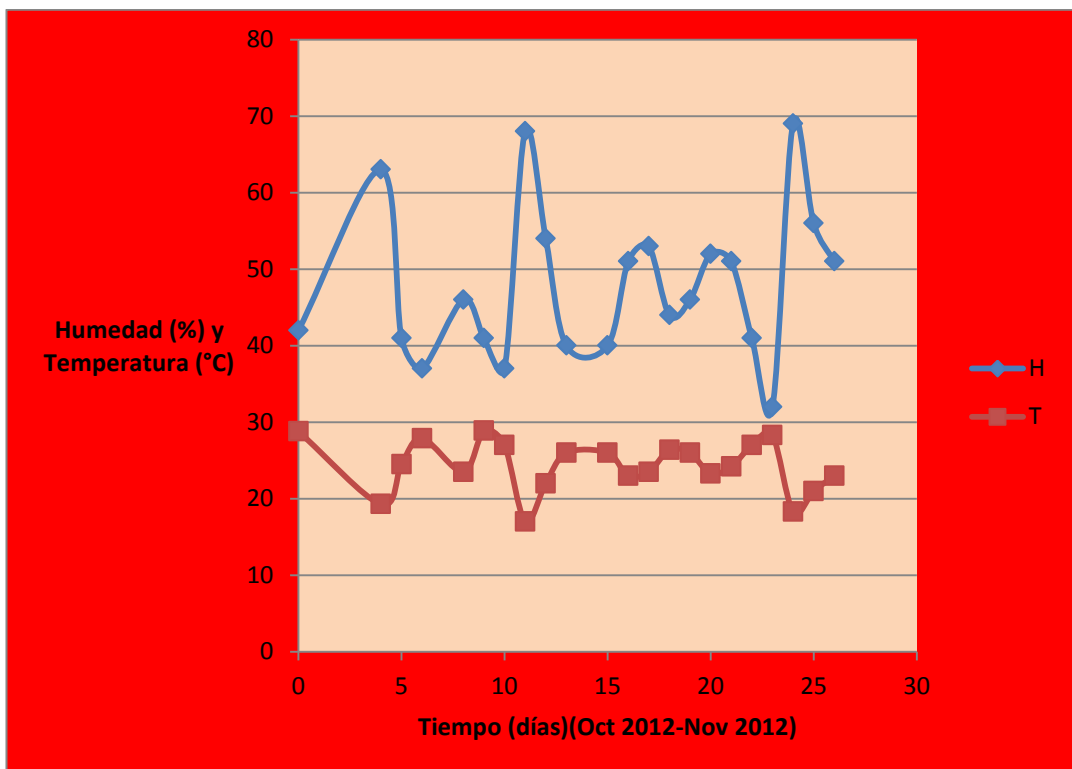


Figura 2: Curva de valores diarios de humedad relativa (H) y temperatura de ambiente (TA) del prefermentado para los tratamientos T- , To y T+ para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2012.

En la figura 2, se muestra las curvas de los valores diarios que osciló para humedad relativa, que fueron entre 32% y 69% y para la temperatura ambiental estuvo entre 17°C y 28,9°C, valores a los que estuvieron sometidos los tratamientos T- , T_o ,T₊ en la prefermentación para la producción de biogás.

4.4. Determinación de DQO y pH en biodigestión

Tabla 6.

Datos de caracterización química (DQO y pH) del proceso de biodigestión en los tratamientos T- , T_o y T+ para la producción de biogás

Tiempo Días--fecha	DQO (mg/l)			pH		
	T-	T _o	T+	T-	T _o	T+
09-- 14/11/2012 (inicio)	1391,30	1130,43	1347,82	7,55	7,43	7,34
318--19/09/2013 (término)	1291,30			7,98		
534--23/04/2014 (término)		1043,48			8,34	
526--23/07/2015 (término)			1247,82			7,71

Fuente: Elaboración propia, 2015.

La tabla 6 muestra cómo entre el inicio y el término del proceso de biodigestión para la producción de biogás disminuyen los valores de DQO y se incrementa en el intervalo ligeramente alcalino el pH en los tratamientos T- , T_o y T+ .

4.5. Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión

Tabla 7.

Datos de sólidos totales (mg/l), cenizas (%) y sólidos volátiles (mg/l) en los tratamientos T- , T_o y T+ al inicio y al término de la biodigestión para la producción de biogás

Tiempo Días—fecha	SÓLIDOS TOTALES			CENIZAS			SÓLIDOS VOLÁTILES		
	T-	T _o	T ₊	T-	T _o	T ₊	T-	T _o	T ₊
09-14/11/2012 (Inicio)	69 149,00	45 391	41 053,50	43,99	17,69	26,51	5, 93	3,40	5,20
526-23/07/2015 (término)	23 015,50	25 165	26 564,50	44,09	31,31	40,97	2,87	2,89	3,36

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 7 se muestra cómo los valores de los sólidos totales y sólidos volátiles disminuyen en los tratamientos T- , T_o y T+, entre el inicio y el término de la biodigestión para la producción de biogás.

4.6. Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en interiores de biodigestores en proceso de biodigestión

Tabla 8.

Datos de humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en biodigestores de los tratamientos T-, To y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

N° mes	Mes	Año	Hora	Prom. Hume Relat	Prom. Temp. Ab. (°C)	Prom. Temp. .biodigestor (°C)		
						T-	To	T+
1	Nov	2012	08:00-20:00	59,96	21,68	21,75	21,04	20,85
2	Dic	2012	08:00-20:00	55,87	23,35	23,47	23,07	22,13
3	Ene	2013	08:00-20:00	56,50	24,13	24,00	23,80	22,50
4	Feb	2013	08:00-20:00	57,00	24,45	24,60	25,07	23,80
5	Mar	2013	08:00-20:00	55,33	25,16	24,67	24,42	23,92
6	Abr	2013	08:00-20:00	55,00	23,16	21,40	21,15	20,75
7	May	2013	08:00-20:00	64,63	19,91	19,09	19,25	18,75
8	Jun	2013	08:00-20:00	62,25	18,81	17,55	17,60	16,70
9	Jul	2013	08:00-20:00	63,38	17,44	16,36	16,55	15,52
10	Ago	2013	08:00-20:00	55,79	18,46	17,21	17,21	15,71
11	Sep	2013	08:00-20:00	66,67	18,15	17,83	17,61	16,94
12	Oct	2013	08:00-20:00	58,63	19,88	18,69	19,31	18,56
13	Nov	2013	08:00-20:00	60,36	20,93	20,09	20,18	19,82
14	Dic	2013	08:00-20:00	57,93	23,08	22,47	22,73	21,67
15	Ene	2014	08:00-20:00	49,79	25,62	24,93	24,64	24,57
16	Feb	2014	08:00-20:00	51,54	24,36	23,65	24,15	23,35
17	Mar	2014	08:00-20:00	55,71	22,79	22,93	23,21	22,21
18	Abr	2014	08:00-20:00	62,09	21,00	20,45	20,55	20,55
19	May	2014	08:00-20:00	62,27	18,96	18,91	18,91	18,73
20	Jun	2014	08:00-20:00	68,56	16,27	16,11	16,11	15,89
21	Jul	2014	08:00-20:00	69,89	14,44	14,44	14,44	14,44

Tabla 8. Continuación.

N° mes	Mes	Año	Hora	Prom. Hum. Relat	Prom. Temp.Ab. (°C)	Prom. Temp. .biodigestor (°C)		
						T-	To	T+
22	Ago	2014	08:00-20:00	57,00	18,23	18,17	18,17	17,83
23	Sep	2014	08:00-20:00	68,80	17,34	17,00	17,00	17,00
24	Oct	2014	08:00-20:00	60,83	20,32	20,67	20,67	20,50
25	Nov	2014	08:00-20:00	61,50	20,33	20,63	20,63	20,25
26	Dic	2014	08:00-20:00	58,33	21,50	22,50	22,50	21,50
27	Ene	2015	08:00-20:00	66,17	21,70	22,67	22,67	21,83
28	Feb	2015	08:00-20:00	55,25	24,95	25,75	25,75	24,75
29	Mar	2015	08:00-20:00	57,67	25,08	26,00	26,00	25,50
30	Abr	2015	08:00-20:00	64,67	22,77	23,33	23,33	22,67
31	May	2015	08:00-20:00	55,00	21,65	21,50	21,50	20,50
32	Jun	2015	08:00-20:00	61,67	18,20	18,33	18,33	17,67
33	Jul	2015	08:00-20:00	60,50	18,30	18,00	18,00	17,50

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 8 se muestra los valores de humedad relativa (49,79%-69,89%), temperatura ambiental (14,44°C-25,62°C) y temperatura en biodigestores (14,44°C-25,75°C) de los tratamientos T-, To y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

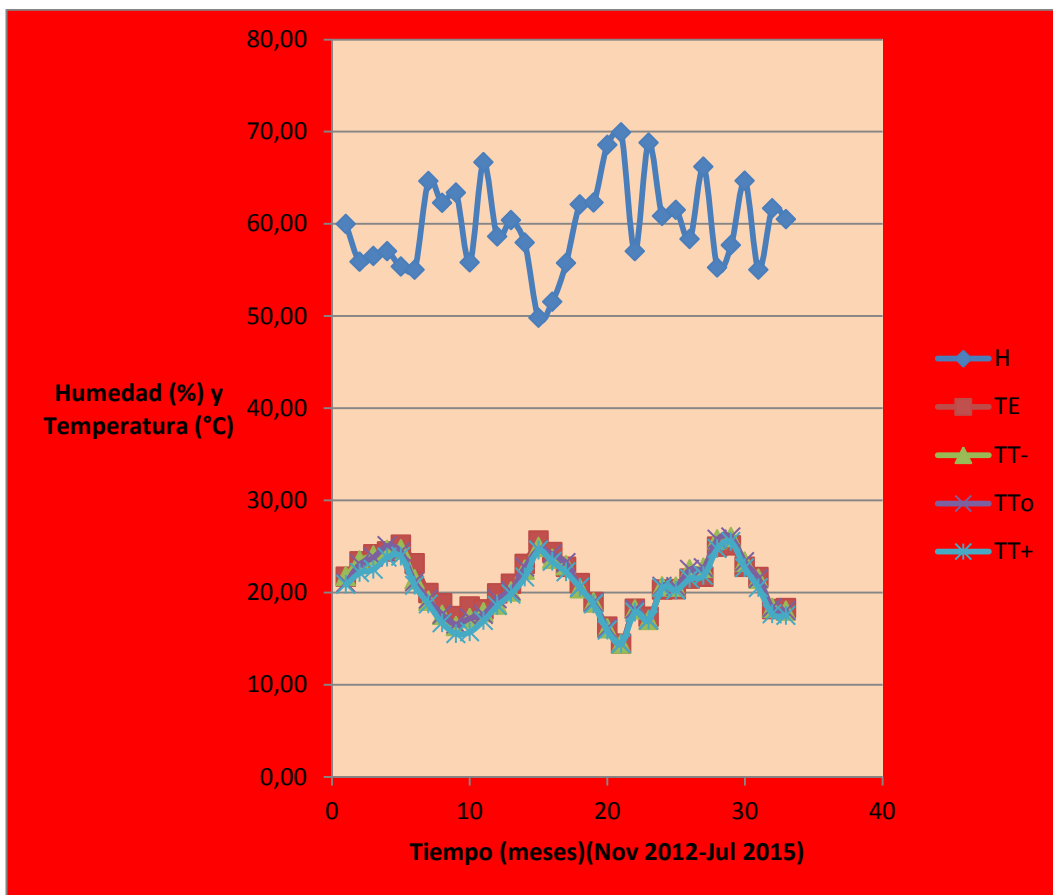


Figura 3: Curvas de humedad relativa (H), temperatura ambiental (TE) y temperatura en biodigestores de los tratamientos T-, To y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 3 se muestra las curvas de los valores de Humedad relativa (49,79%-69,89%), temperatura ambiental (14,44°C-25,62°C) y temperatura en biodigestores (14,44°C-25,75°C) de los tratamientos T-,

To y T+ según mes, año y hora en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

4.7. Producciones parciales de biogás en la biodigestión

Tabla 9.

Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (cm ³)	X (días)
000,00	000
385,00	024
261,50	094
259,75	120
152,50	140
111,25	164
120,75	192
101,00	212
095,75	232
210,75	252
103,25	266
111,75	287
094,50	304
121,25	318
000,00	332

Fuente: Elaboración propia, 2013.

La tabla 9 muestra valores de producciones parciales de biogás (Y)(94,5-210,75 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

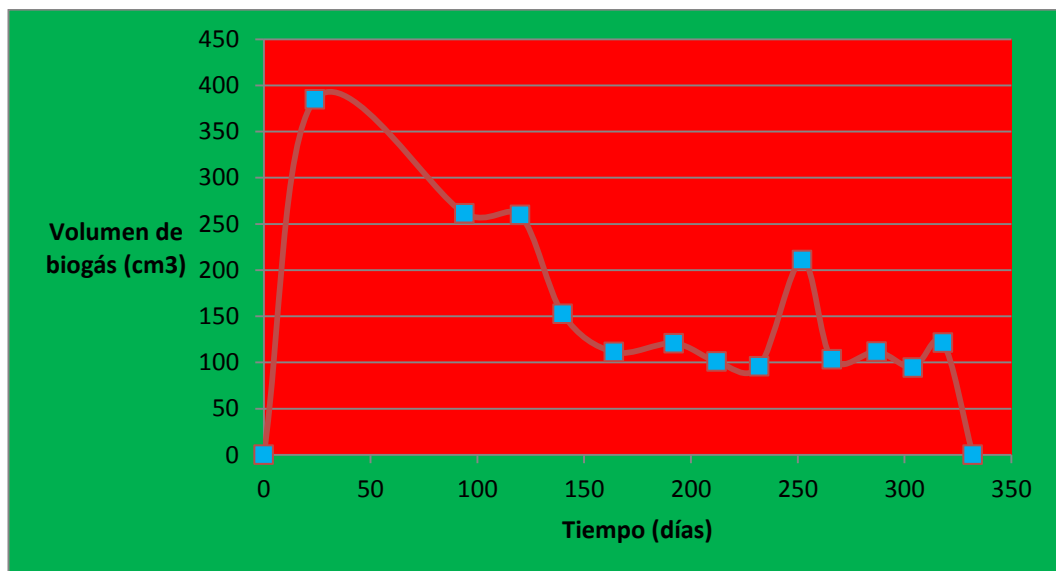


Figura 4: Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2013.

La figura 4 muestra la curva de los valores de producciones parciales de biogás (Y) (94,5 cm³-210,75 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 10.

Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (cm³)	X (días)
000,00	000
871,50	024
645,25	094
877,50	120
946,25	140
630,00	164
652,00	192
566,00	212
402,50	232
490,00	252
261,25	266
468,75	287
262,50	304
337,50	318
280,00	332
480,25	346
509,50	366
453,50	380
659,25	394
547,50	408
416,25	422
535,00	436
443,75	450
543,75	464
537,50	478
487,50	492

Tabla 10. Continuación.

Y (cm³)	X (días)
432,50	506
528,75	520
358,75	534
000,00	548

Fuente: Elaboración propia, 2014.

La tabla 10 muestra valores de producciones parciales de biogás (Y) (262,5 cm³-946,25 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

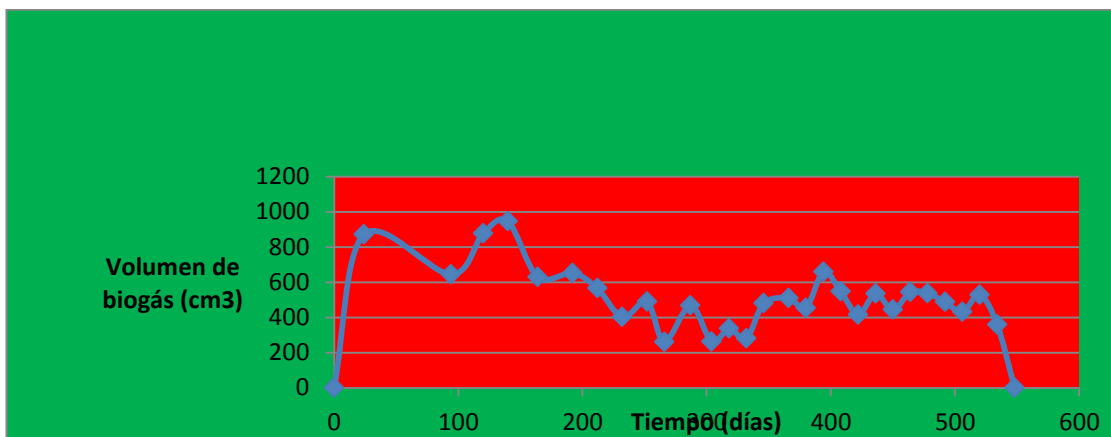


Figura 5: Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2014.

La figura 5 muestra la curva de los valores de producciones parciales de biogás (Y) (262,5-946,25 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₀ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 11.

Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (cm³)	X (días)
0	0
1161,5	24
968,25	94
872,25	120
855,00	140
881,75	164
890,00	192
638,25	212
641,25	232
793,75	252
678,75	266
635,00	287
580,00	304
538,75	318
587,5	332
670,25	346
449,25	366
591,25	380
690,00	394
590,00	408
471,25	422
607,50	436
690,00	450
543,75	464
512,50	478
473,75	492

Tabla 11. Continuación.

Y (cm³)	X (días)
555,00	506
551,25	520
450,00	534
668,75	548
427,50	562
785,00	575
295,00	589
460,00	603
410,00	617
437,50	631
703,75	647
401,25	661
311,25	680
495,00	694
446,25	708
532,50	722
751,25	736
438,75	750
653,75	764
701,25	778
721,25	793
350,00	806
462,50	820
547,50	834
720,00	848
552,50	864
550,00	883
425,00	897
450,00	911
337,50	927
387,50	939
350,00	954

Tabla 11. Continuación.

Y (cm³)	X (días)
362,50	967
387,50	981
400,00	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

La tabla 11 muestra valores de producciones parciales de biogás (Y) (295 cm³-1161,5 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

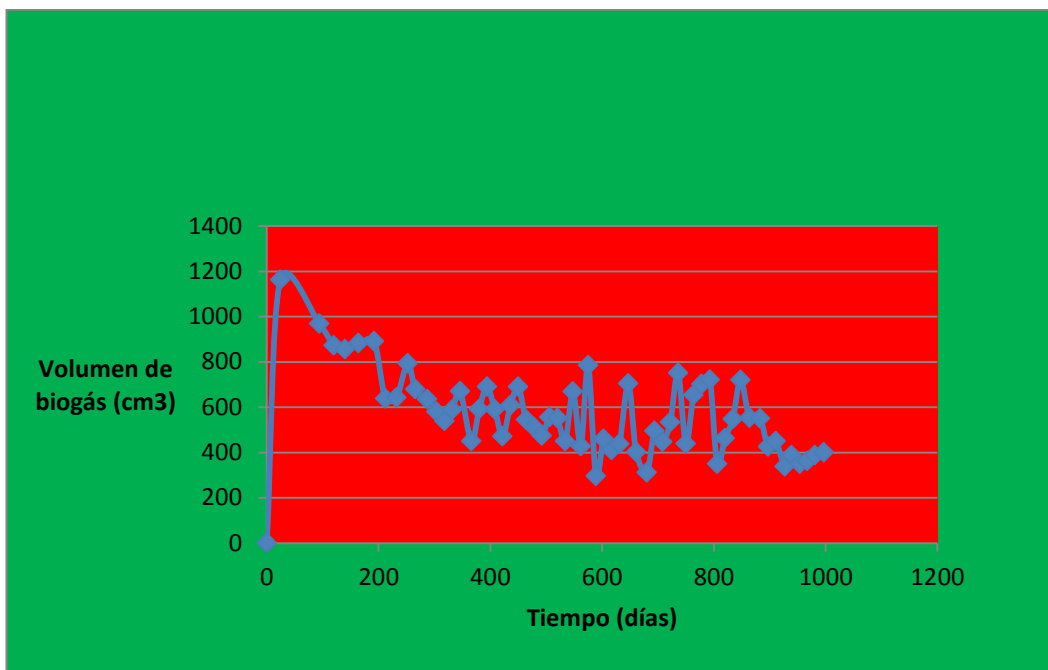


Figura 6: Curva de los datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2015.

La figura 6 muestra valores de producciones parciales de biogás (Y) (295-1161,5 cm³) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 12.

Datos de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T-, T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (T-) (cm ³)	Y (T _o) (cm ³)	Y (T ₊) (cm ³)	X (días)
000,00	000,00	0	0
385,00	871,50	1161,5	24
261,50	645,25	968,25	94
259,75	877,50	872,25	120
152,50	946,25	855,00	140
111,25	630,00	881,75	164
120,75	652,00	890,00	192
101,00	566,00	638,25	212
095,75	402,50	641,25	232
210,75	490,00	793,75	252
103,25	261,25	678,75	266
111,75	468,75	635,00	287
094,50	262,50	580,00	304
121,25	337,50	538,75	318
000,00	280,00	587,50	332
	480,25	670,25	346
	509,50	449,25	366
	453,50	591,25	380
	659,25	690,00	394
	547,50	590,00	408
	416,25	471,25	422
	535,00	607,50	436
	443,75	690,00	450
	543,75	543,75	464
	537,50	512,50	478
	487,50	473,75	492

Tabla 12. Continuación.

Y (T-) (cm ³)	Y (To) (cm ³)	Y (T+) (cm ³)	X (días)
	432,50	555,00	506
	528,75	551,25	520
	358,75	450,00	534
	000,00	668,75	548
		427,50	562
		785,00	575
		295,00	589
		460,00	603
		410,00	617
		437,50	631
		703,75	647
		401,25	661
		311,25	680
		495,00	694
		446,25	708
		532,50	722
		751,25	736
		438,75	750
		653,75	764
		701,25	778
		721,25	793
		350,00	806
		462,50	820
		547,50	834
		720,00	848
		552,50	864
		550,00	883
		425,00	897
		450,00	911

Tabla 12. Continuación.

Y (T-) (cm ³)	Y (To) (cm ³)	Y (T+) (cm ³)	X (días)
		337,50	927
		387,50	939
		350,00	954
		362,50	967
		387,50	981
		400,00	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 12 se muestra los valores de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- (94,5 cm³-210,75 cm³), T_o (262,5 cm³-946,25 cm³) y T₊ (295,0 cm³-1161,5 cm³) en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

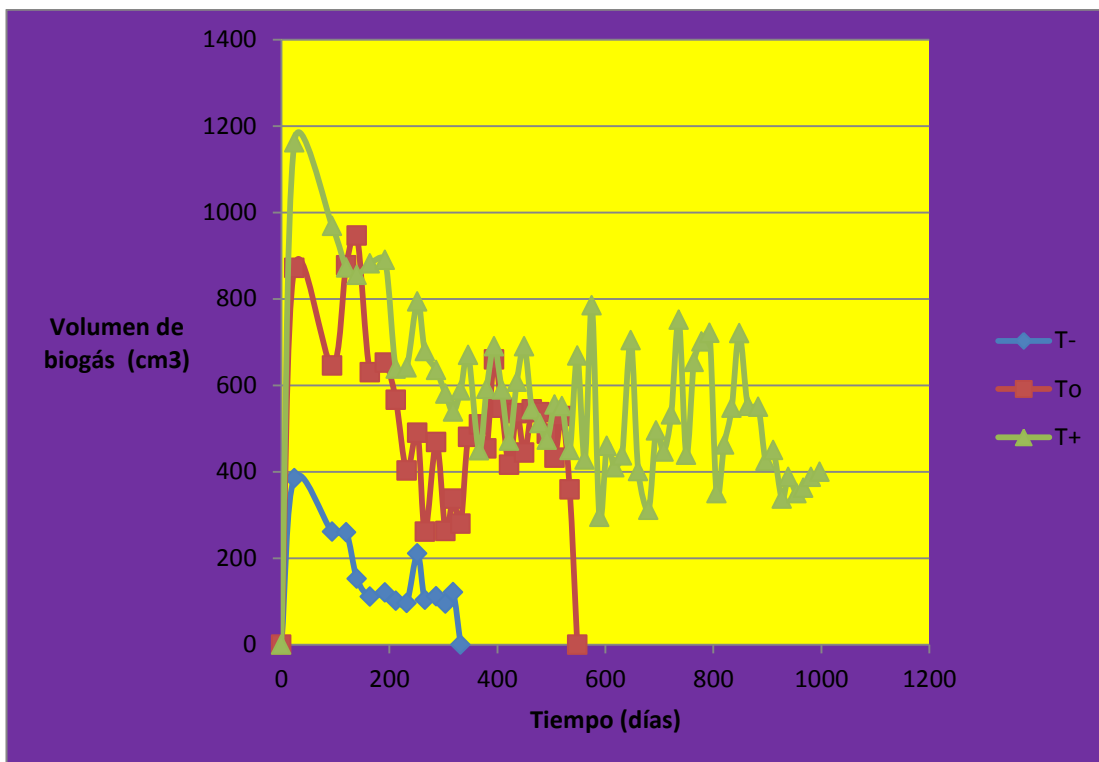


Figura 7: Curvas de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T-, To y T+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 7 se muestra las curvas de los valores de producciones parciales de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- ($94,5 \text{ cm}^3$ - $210,75 \text{ cm}^3$), To ($262,5 \text{ cm}^3$ - $946,25 \text{ cm}^3$) y T+ ($295,0 \text{ cm}^3$ - $1161,5 \text{ cm}^3$) en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

4.8. Producciones acumuladas de biogás en la biodigestión

Tabla 13.

Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Y (cm³)	X (días)
0000,00	000
0385,00	240
0646,50	940
0906,25	120
1058,75	140
1170,00	164
1290,75	192
1391,75	212
1487,50	232
1698,25	252
1801,50	266
1913,25	287
2007,75	304
2129,00	318

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la tabla 13 se muestra los valores de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- ; así mismo la producción total acumulada que fue de 2 129,0 cm³ alcanzada a los 318 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

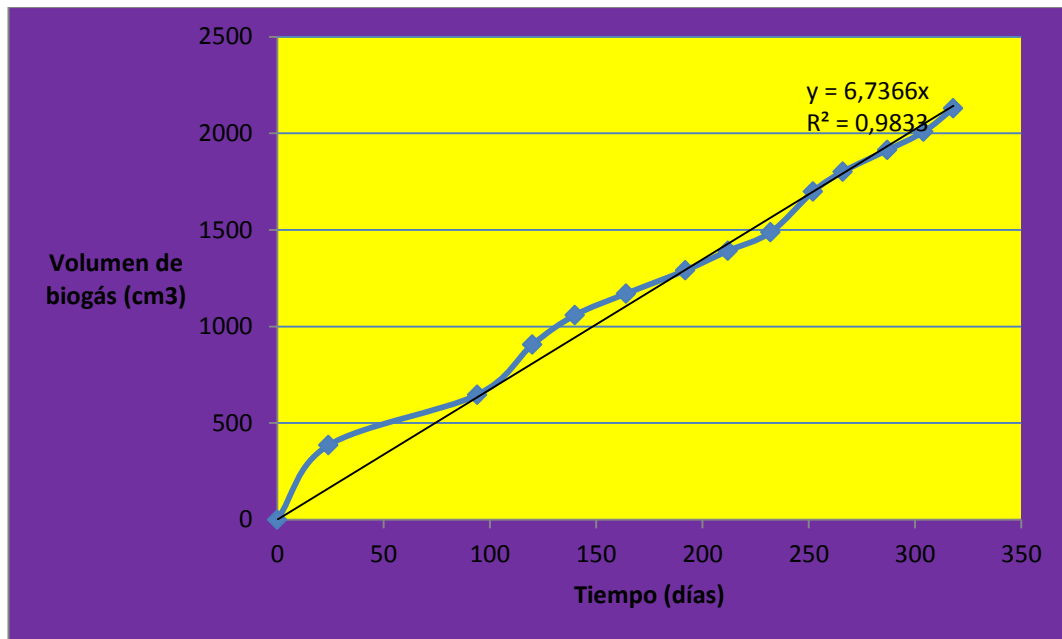


Figura 8: Curva de datos de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la figura 8 se muestra la curva de los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- ; asimismo el punto de la producción total acumulada que fue de 2 129,0 cm³ alcanzada a los 318 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 14.

Datos de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_0 en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (cm³)	X (días)
00000,00	000
00871,50	024
01516,75	094
02394,25	120
03340,50	140
03970,50	164
04622,50	192
05188,50	212
05591,00	232
06081,00	252
06342,25	266
06811,00	287
07073,50	304
07411,00	318
07691,00	332
08171,25	346
08680,75	366
09134,25	380
09793,50	394
10341,00	408
10757,25	422
11292,25	436
11736,00	450
12279,75	464
12817,25	478
13304,75	492
13737,25	506
14266,00	520
14624,75	534

Fuente: Elaboración propia, 2014.

En la tabla 14 se muestra los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_0 ; también se muestra la producción total acumulada que fue de 14 624,75 cm^3 alcanzada a los 534 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

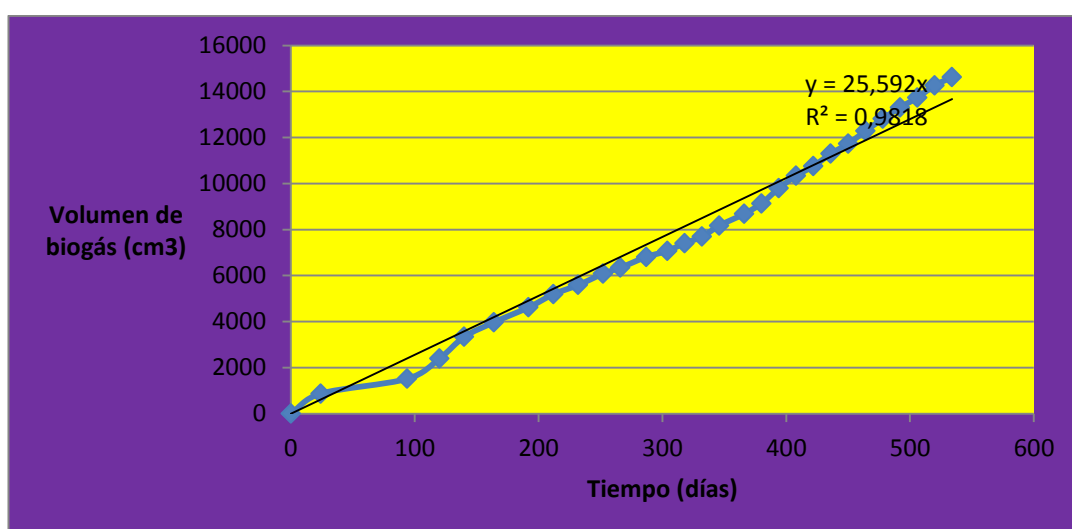


Figura 9: Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_0 en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2014.

En la figura 9 se muestra la curva de los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T_0 ; asimismo, se muestra el punto de la producción total acumulada

que fue de 14 624,75 cm³ alcanzada a los 534 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 15.

Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Y (cm ³)	X (días)
0	0
1161,5	24
2129,75	94
3002,00	120
3857,00	140
4738,75	164
5628,75	192
6267,00	212
6908,25	232
7702,00	252
8380,75	266
9015,75	287
9595,75	304
10134,50	318
10722,00	332
11392,25	346
11841,50	366
12432,75	380
13122,75	394
13712,75	408
14184,00	422
14791,50	436
15481,50	450
16025,25	464
16537,75	478
17011,50	492
17566,50	506

Tabla 15. Continuación.

Y (cm³)	X (días)
18117,75	520
18567,75	534
19236,50	548
19664,00	562
20449,00	575
20744,00	589
21204,00	603
21614,00	617
22051,50	631
22755,25	647
23156,50	661
23467,75	680
23962,75	694
24409,00	708
24941,50	722
25692,75	736
26131,50	750
26785,25	764
27486,50	778
28207,75	793
28557,75	806
29020,25	820
29567,75	834
30287,75	848
30840,25	864
31390,25	883
31815,25	897
32265,25	911
32602,75	927
32990,25	939
33340,25	954
33702,75	967
34090,25	981
34490,25	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 15 se muestra los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T+ ; también se muestra la producción total acumulada que fue de 34 490,25 cm³ alcanzada a los 997 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

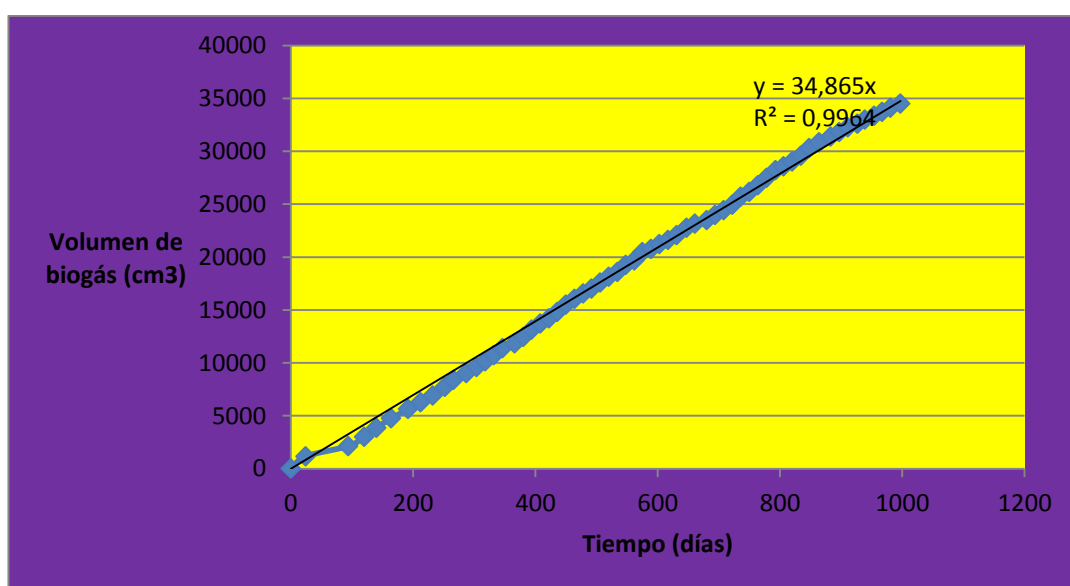


Figura 10: Curva de datos de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 10 se muestra la curva de los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X)

en el tratamiento T+; también se muestra el punto de la producción total acumulada que fue de 34 490,25 cm³ alcanzada a los 997 días en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 16.

Datos de producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Y (R-) (cm ³)	Y (Ro) (cm ³)	Y (R+) (cm ³)	X (días)
0000,00	00000,00	0	0
0385,00	00871,50	1161,50	24
0646,50	01516,75	2129,75	94
0906,25	02394,25	3002,00	120
1058,75	03340,50	3857,00	140
1170,00	03970,50	4738,75	164
1290,75	04622,50	5628,75	192
1391,75	05188,50	6267,00	212
1487,50	05591,00	6908,25	232
1698,25	06081,00	7702,00	252
1801,50	06342,25	8380,75	266
1913,25	06811,00	9015,75	287
2007,75	07073,50	9595,75	304
2129,00	07411,00	10134,50	318
	07691,00	10722,00	332
	08171,25	11392,25	346
	08680,75	11841,50	366
	09134,25	12432,75	380
	09793,50	13122,75	394
	10341,00	13712,75	408
	10757,25	14184,00	422
	11292,25	14791,50	436

Tabla 16. Continuación.

Y (R-) (cm³)	Y (Ro) (cm³)	Y (R+) (cm³)	X (días)
	11736,00	15481,50	450
	12279,75	16025,25	464
	12817,25	16537,75	478
	13304,75	17011,50	492
	13737,25	17566,50	506
	14266,00	18117,75	520
	14624,75	18567,75	534
		19236,50	548
		19664,00	562
		20449,00	575
		20744,00	589
		21204,00	603
		21614,00	617
		22051,50	631
		22755,25	647
		23156,50	661
		23467,75	680
		23962,75	694
		24409,00	708
		24941,50	722
		25692,75	736
		26131,50	750
		26785,25	764
		27486,50	778
		28207,75	793
		28557,75	806
		29020,25	820
		29567,75	834
		30287,75	848
		30840,25	864
		31390,25	883
		31815,25	897
		32265,25	911
		32602,75	927

Tabla 16. Continuación.

Y (R-) (cm³)	Y (Ro) (cm³)	Y (R+) (cm³)	X (días)
		32990,25	939
		33340,25	954
		33702,75	967
		34090,25	981
		34490,25	997

Fuente: elaboración propia, 2015.

En la tabla 16 se muestra los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T₋, T_o y T₊; cuyas producciones totales en sus respectivos tiempos en el proceso de biodigestión para la producción de biogás fueron 2 129,0 cm³ en 318 días; 14 624,75 cm³ en 534 días; 34 490,25 cm³ en 997 días.

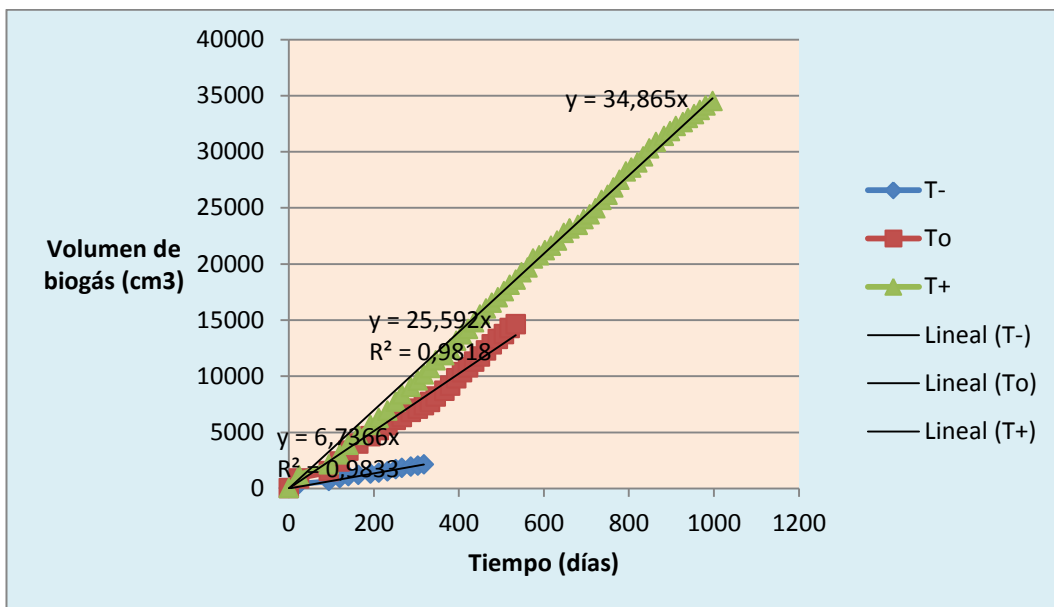


Figura 11: Curva de datos de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- , T₀ y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 11 se muestra las curvas de los valores de las producciones acumuladas de biogás (Y) en sus respectivos tiempos de producción (X) en el tratamiento T- , T₀ y T₊ ; cuyas producciones totales en sus respectivos tiempos fueron 2 129,0 cm³ en 318 días; 14 624,75 cm³ en 534 días; 34 490,25 cm³ en 997 días; esto en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

Tabla 17.

Producción de biogás (cm³) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T⁻, T₀ y T⁺ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

R	T ⁻	T ₀	T ⁺
1	2 106,00	14 510,00	34572,00
2	2 161,00	14 798,00	34640,00
3	2 137,00	14 643,00	34295,00
4	2 112,00	14 548,00	34454,00
Promedio	2 129,00	14 624,75	34490,25

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 17 se muestra los valores de producción de biogás (cm³) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T⁻, T₀ y T⁺ en el proceso de biodigestión de la producción de biogás para ser sometidos al análisis de variancia.

Tabla 18.

Análisis de variancia para producciones de biogás en tratamientos T-, To y T+

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	4	8516	2129	635,333333
Columna 2	4	58499	14624,75	16468,9167
Columna 3	4	137961	34490,25	22848,25

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2130709813	2	1065354907	79996,614	7,508E-20	4,25649473
Dentro de los grupos	119857,5	9	13317,5			
Total	2130829671	11				

Ho se rechaza. $F_{exp} > F_{tabla}$ o crítico. F_{exp} . cae en zona de rechazo. Hay diferencia entre tratamientos.

La tabla 18 nos indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en estudio, es decir, que por lo menos uno de los tratamientos es superior en la producción de biogás.

Tabla 19.

Prueba de DMS al 99% para las producciones de biogás en tratamientos T-, To y T+

Orden de mérito	Tratamientos	Promedios	Significación alfa = 0,01
1	T+	34 490,25	a
2	To	14 624,75	b
3	T-	2 129,00	c

En la tabla 19 se identifican tres grupos heterogéneos que estadísticamente son diferentes en la producción de biogás. El tratamiento T+ es diferente del To y del T-; así mismo el tratamiento To es diferente estadísticamente del T-.

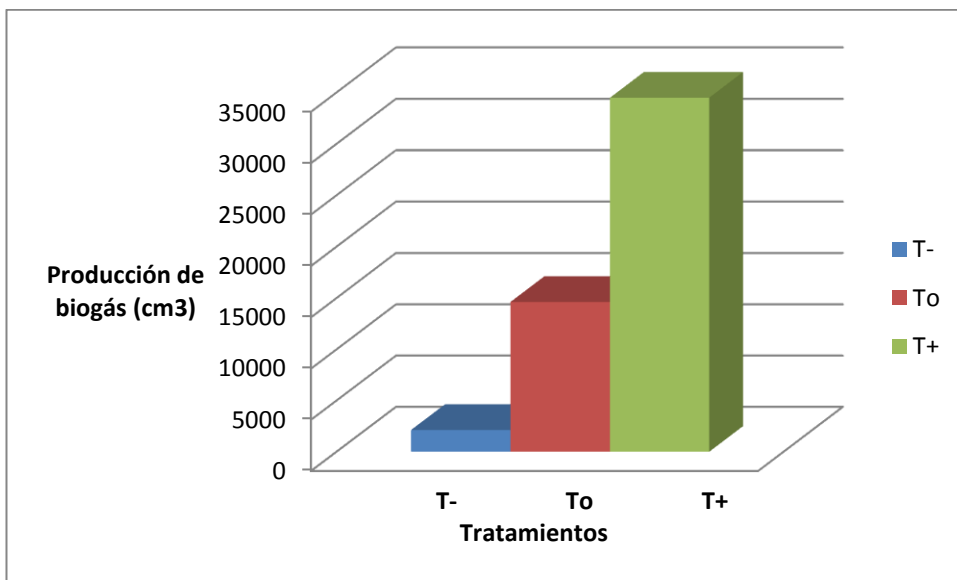


Figura 12. Producciones de biogás en los tratamientos T-, To y T+.

Fuente: Tabla 19.

En la figura 12 se observa que los tratamientos tuvieron diferentes producciones de biogás, siendo el de mayor producción el tratamiento T+ seguido del To, y el de menor producción el T-.

4.9. Productividades de biogás en la biodigestión

Tabla 20.

Productividad de biogás en función a la producción total y el tiempo de fermentación obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

R	T-			T _o			T ₊		
	Producción (cm ³)	tiempo (días)	Productiv. (cm ³ /día)	Producción (cm ³)	tiempo (días)	Productiv. (cm ³ /día)	Producción (cm ³)	tiempo (días)	Productiv. (cm ³ /día)
1	2106	318	6,62	14510,00	534	27,17	34572	997	34,68
2	2161	318	6,80	14798,00	534	27,71	34640	997	34,74
3	2137	318	6,72	14643,00	534	27,42	34295	997	34,40
4	2112	318	6,64	14548,00	534	27,24	34454	997	34,56
PROM	2129	318	6,69	14624,75	534	27,39	34490.25	997	34,56

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 20 se muestra los valores de la productividad de biogás en función de la producción total y el tiempo de fermentación obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás; siendo los valores de productividad en el tratamiento T- de 6,69 cm³/día; en T_o de 27,39 cm³/día y en T₊ de 34,56 cm³/día.

Tabla 21.

Productividad de biogás ($\text{cm}^3/\text{día}$) obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

R	T-	T_o	T₊
1	6,62	27,17	34,91
2	6,80	27,71	35,14
3	6,72	27,42	34,96
4	6,64	27,24	34,94
PROMEDIO	6,69	27,39	34,99

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 21 se muestra los valores de la productividad de biogás en función de sus repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás; siendo los valores de productividad en el tratamiento T- de 6,69 $\text{cm}^3/\text{día}$; en T_o de 27,39 $\text{cm}^3/\text{día}$ y en T₊ de 34,56 $\text{cm}^3/\text{día}$ para efectos de ser sometidos al análisis de variancia.

Tabla 22.

Análisis de variancia para productividades de biogás en tratamientos T-, To y T+

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	4	26,7798742	6,69496855	0,00628272
Columna 2	4	109,548689	27,3871723	0,05775406
Columna 3	4	138,376128	34,5940321	0,02298596

ANÁLISIS DE VARIANCIA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1677,95183	2	838,975913	28922,646	7,3043E-18	4,25649473
Dentro de los grupos	0,2610682	9	0,02900758			
Total	1678,2129	11				

Ho se rechaza. $F_{exp} > F_{tabla}$ o crítico. F_{exp} cae en zona de rechazo. Hay diferencia entre tratamientos.

La tabla 22 indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en estudio, es decir, que por lo menos uno de los tratamientos es superior en la producción de biogás.

Tabla 23.

Prueba de DMS al 99% para las productividades de biogás en los tratamientos T-, To y T+

Orden de mérito	Tratamientos	Promedios	Significación alfa = 0,01
1	T+	34,5940300	a
2	To	27,3871723	b
3	T-	6,6949685	c

En la tabla 23 se muestran tres grupos heterogéneos que estadísticamente son diferentes en la productividad de biogás. El tratamiento T+ es diferente del To y del T-; asimismo el tratamiento To es diferente estadísticamente del T-.

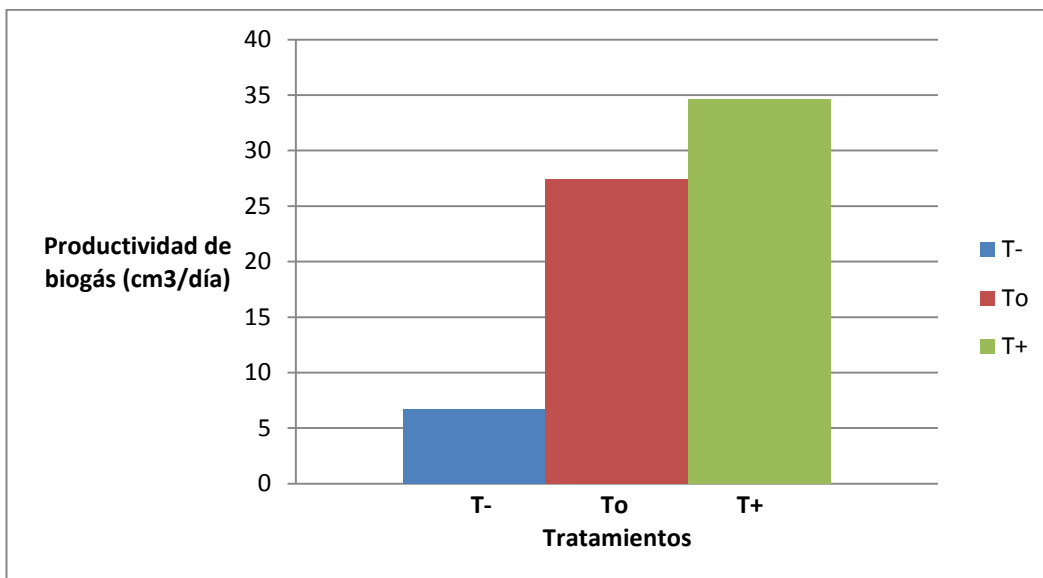


Figura 13. Productividades de biogás en los tratamientos T-, To y T+

Fuente: Tabla 23.

En la figura 13 se observa que los tratamientos tuvieron diferentes productividades de biogás, siendo el de mayor productividad el tratamiento T+ seguido del To, y el de menor productividad el T-.

4.10. Rendimiento de biogás en la biodigestión

Tabla 24.

Rendimiento de biogás (Rdmto) (cm^3/g) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás considerando como peso de sólidos totales (ST) de 2 398, 32 g presentes en una carga del biodigestor.

R	T-	T _o	T ₊
1	0,8781	60,501	144.151
2	0,9010	61,702	144,434
3	0,8910	61,055	142,996
4	0,8806	60,659	143,659
Promedio	0,8877	60,979	143,810

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 24 se muestra el rendimiento de biogás (Rdmto) (cm^3/g) total obtenida en cada una de las repeticiones (R) de los tratamientos T- , T_o y T₊ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás, considerando como peso de sólidos totales (ST) 2 398, 32 g presentes en una carga del biodigestor. Siendo los valores de rendimiento en T- de 0,8877 cm^3/g ; en T_o de 60,979 cm^3/g ; y en T₊ de 143,810 cm^3/g .

Tabla 25.

Análisis de variancia para rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	4	3,5507	0,887675	0,00011012
Columna 2	4	243,917	60,97925	0,28646292
Columna 3	4	575,24	143,81	0,397018

ANÁLISIS DE VARIANCIA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	41198,2954	2	20599,1477	90401,1903	4,3309E-20	4,25649473
Dentro de los grupos	2,0507731	9	0,22786368			
Total	41200,3461	11				

Ho se rechaza. $F_{exp} > F_{tabla}$ o crítico. F_{exp} . cae en zona de rechazo. Hay diferencia entre tratamientos.

La tabla 25 indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en estudio, es decir, que por lo menos uno de los tratamientos es superior en el rendimiento de biogás.

Tabla 26.

Prueba de DMS al 99% para los rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+

Orden de mérito	Tratamientos	Promedios	Significación alfa = 0,01
1	T+	143,8100	a
2	To	60,9790	b
3	T-	0,8877	c

En la tabla 26 se identifican tres grupos heterogéneos que estadísticamente son diferentes en el rendimiento de biogás. El tratamiento T+ es diferente del To y del T-; asimismo el tratamiento To es diferente estadísticamente del T-.

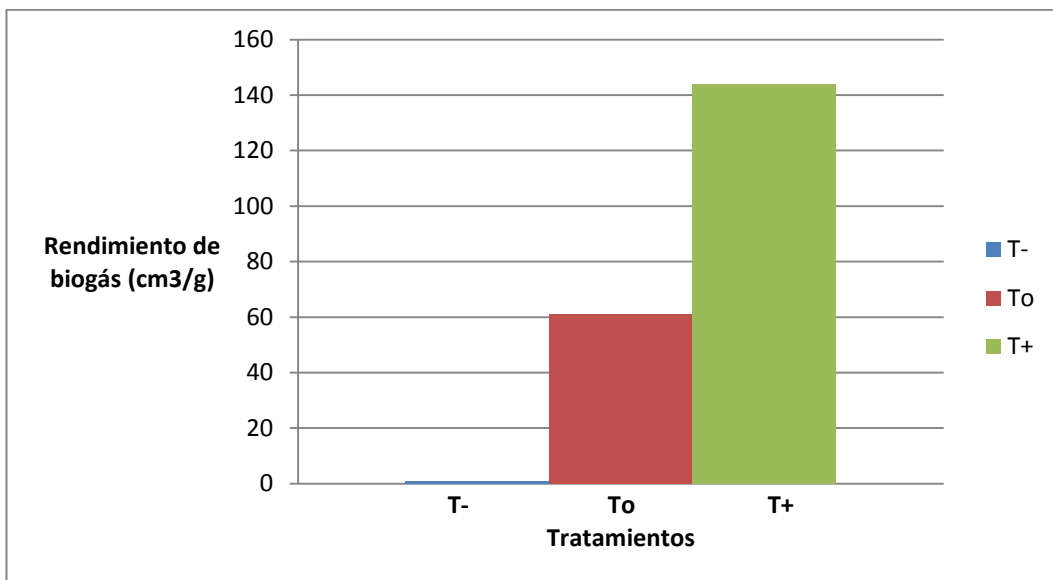


Figura 14. Rendimientos de biogás en los tratamientos T-, To y T+

Fuente: Tabla 26.

En la figura 14 se observa que los tratamientos tuvieron diferentes rendimientos de biogás, siendo el de mayor rendimiento el tratamiento T+ seguido del To, y el de menor rendimiento el T-.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Determinación de Carbono y Nitrógeno del sustrato fermentativo para la prefermentación

La mezcla de grass y estiércol de cuy empleada como sustrato constituye materia orgánica degradable por microorganismos que luego se convierte en una serie de sustancias químicas entre ellas, los gases. Este sustrato ha permitido obtener biogás que es una mezcla de gases en el que se encuentran el metano, dióxido de carbono, hidrógeno y trazas de otros gases; este biogás se obtiene por fermentación anaeróbica, como ha ocurrido en este trabajo, y que es uno de los procesos biológicos más frecuentes usados por la naturaleza para descomponer los materiales orgánicos, esto constituye un proceso sumamente complejo en el que interviene un elevado número de especies bacterianas, productoras o no de metano, que contribuyen de algún modo a la formación de este gas (Rodríguez y col., 1995). Las características del sustrato suministrado al biodigestor anaerobio son de gran

importancia, ya que los requerimientos nutrimentales de los microorganismos anaerobios son especiales, debido a su lento metabolismo y a que la regeneración de nuevas células también es muy baja, la fijación de los elementos nutritivos como el nitrógeno y el fósforo es escasa, no así el consumo de carbono que es transformado a metano y a dióxido de carbono. En la biodigestión, el material orgánico se separa y se precipita en forma natural, depositándose los lodos en el fondo. Los elementos nutricionales en el material orgánico son utilizados por los microorganismos para realizar sus procesos metabólicos (Mejía, 1996).

El gas obtenido al haber originado una llama azul clara cuando se le prendió con un fósforo y que duró un minuto para una descarga de 14 días de biodigestión no solamente demuestra que el substrato empleado originó biogás sino también que fue de buena calidad. El biogás contiene un alto porcentaje de metano, CH_4 (entre 50-70%), es el responsable de la calidad, por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien solo o mezclado con otro combustible (Ruge & Hernández, 2011).

El biogás de buena calidad es obtenido, entre otros factores, gracias al substrato usado. Para la composición, 50% de metano y 50% de inertes, se tiene una potencia calorífica superior del biogás de 4 426 kcal/m³ que es la más típica; si mejoramos la calidad de la biomasa obtendremos mayores calorías (Díaz, 2015).

El biogás, generado a partir del substrato empleado, tiene mucha relación con la proporción carbono / nitrógeno, 26,92, que se presentó en el substrato; una relación que si bien no fue óptima, pero fue buena. La relación óptima de C/N es de 30:1, cuando la relación es muy estrecha (10:1) hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a la falta de nitrógeno. El substrato en términos de porcentaje de sólidos empleado, 6,86, también contribuyó a que se obtuviera biogás de buena calidad. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir es de 7 a 9 y se consigue al diluir el material orgánico con agua.

5.2. Determinación del pH y del DBO₅ en prefermentación

El pH desarrollado en la prefermentación fue un pH ligeramente alcalino que acondicionó para que la acción bacteriana en el proceso de biodigestión desarrollara y actuara dentro del pH ligeramente alcalino que se necesita para la producción de biogás. La disminución del DBO₅ en esta prefermentación se correspondió con la transformación del material orgánico u substrato presente en el prefermentado convirtiéndose este parámetro como un indicativo de que el proceso de prefermentación se llegó a realizar y que coincidió cuando el prefermentado adquirió el aspecto y la consistencia de una mermelada (Castillo & Tito, 2010).

El prefermentado utilizado como carga para la biodigestión es un producto de fermentación aeróbica que ha permitido la separación e hidrólisis de una serie de compuestos presentes en los componentes de la mezcla substrato como también la actividad microbiana aeróbica para la generación de una serie de compuestos es decir la transformación del substrato a una forma mucho más fácil de continuar transformándose a otras sustancias más simples a través de procesos como la biodigestión. Sin la prefermentación no se hubiera producido el biogás en el tiempo obtenido ni con la calidad producida. La prefermentación es un paso

previo importante a la biodigestión para producir biogás. En este trabajo como indicativo de que la prefermentación se llegó a realizar se tuvo en cuenta a las mediciones de DBO_5 , cuya disminución en el tiempo significó la degradación del sustrato presente en los fermentadores así mismo la disminución del potencial contaminante (Soria y col., 2001). La prefermentación es una fermentación aeróbica porque se produjo con microorganismos aeróbicos propios de la flora nativa del sustrato en fermentadores abiertos y con constante agitación.

5.3. Humedad y temperatura ambiental en prefermentación

La humedad y la temperatura ambiental de algún modo influenciaron en la temperatura interna de los fermentadores donde se desarrolló la prefermentación. Se observó que a mayor humedad menor temperatura y viceversa; de igual forma se observó la similitud de valores de temperatura ambiental y temperatura interna de los fermentadores de la prefermentación.

5.4. Determinación de DQO y pH en biodigestión

En este proceso de producción de biogás, la biodigestión desarrollada y la disminución del nivel de contaminación (por la disminución de malos olores) se corroboró con la disminución del DQO evaluado al inicio y al término de la biodigestión. La demanda química de oxígeno, DQO, además de medir el grado de transformación de la materia orgánica, también es un indicador del nivel del grado de contaminación, que mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica degradable, así como también los restos de materiales fibrosos, ligninas y otros. La DQO en la biodigestión disminuyó para cada tratamiento T-; To; y T+ en 100; 86,95; y 100 mg/L respectivamente. Esto indica que la actividad de los microorganismos, así como las condiciones del ambiente anaerobio, fueron responsables de la degradación ya que redujeron su actividad y con ello el consumo de oxígeno.

El pH presente en la mezcla del substrato en la biodigestión, que osciló entre 8,34 y 7,34, tuvo un rol importante para la producción de biogás. En digestores operados, por ejemplo, con estiércol de bovino, los valores óptimos de operación oscilan entre 6,7 y 7,5 con límites de 6,5 a 8,0 (Hayes et al., 1979). En forma general el rango óptimo del pH para lograr una mayor eficiencia en la biodigestión es entre 6,6 a 7,6 (McCarty, 1964). La biodigestión, cuando mantiene este rango de pH, indica que está

operando correctamente. El equilibrio ácido –base, que tiene lugar en la operación de los biodigestores anaerobios, es muy importante por la presencia de los diversos tipos de microorganismos que están en el medio y que requieren ser neutralizados para restituir el pH (Mejía, 1996). El pH es un parámetro muy importante en la disponibilidad de los nutrientes. En esta investigación, el pH se mantuvo dentro de los rangos deseables para un proceso de biodigestión adecuado, ya que el pH al inicio fue de 8,34 y se redujo a 7,34 al término de la biodigestión.

5.5. Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles en la biodigestión

La disminución de la sólidos totales y sólidos volátiles en este proceso de biodigestión fue un indicador de la actividad microbiana, de la transformación del sustrato y de la generación de biogás. Para lograr mayor eficiencia en un proceso de biodigestión es necesario que el sustrato fermentativo contenga mínimo 12% de sólidos totales (Soria y col., 2001). En este trabajo el tratamiento T-, el que contuvo mayor porcentaje de sólidos totales, 69 149 mg/L (6,9%) contuvo un porcentaje de sólidos menor al mínimo recomendado para lograr una mayor eficiencia en la producción de biogás. Este porcentaje de los sólidos es,

por lo tanto, uno dentro de otros factores que ha contribuido a que se tenga una baja producción de biogás.

5.6. Humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en interiores de biodigestores en proceso de biodigestión

La temperatura interna de los biodigestores con la que se incubó el substrato para la producción de biogás, que osciló entre 13 y 30°C también fue un factor importante para el desarrollo de este proceso. Esta temperatura en gran parte estuvo influenciada por la humedad y la temperatura del ambiente que osciló también en forma paralela entre 13 y 30°C de acuerdo al día, a los meses y a los años. Cuando hubo mayor humedad hubo menor temperatura y viceversa, en forma similar a lo que se presentó en la prefermentación. La temperatura es un parámetro importante en la operación del biodigestor anaerobio, debido a que tiene que procurarse un crecimiento bacteriano adecuado y aumentarse la velocidad de las reacciones bioquímicas que se dan en el proceso (Mejía, 1996). Temperaturas entre los 20°C y los 60°C son consideradas condiciones para la obtención de biogás en un digestor (Díaz, 2015). Las temperaturas con las que se incubó los biodigestores caen en gran parte dentro de este rango.

5.7. Producciones parciales de biogás en la biodigestión

Las producciones parciales de biogás, entendidas como las descargas sucesivas de biogás que se han obtenido en cada biodigestor hasta que ya no se produjo biogás, han sido diferentes en número según el tratamiento. En promedio las descargas se han sucedido cada 14 días. El volumen de cada descarga ha sido variable. Este volumen ha sido medido utilizando una probeta invertida llena de agua de tal modo que cuando se midió el biogás de descarga el agua fue desplazado dentro de la probeta por el biogás. Bajo este método de medición de biogás se dan errores visuales: fuga de gas exactitud de la medida en la probeta, etc.; por lo cual es comprensible que las mediciones no sean exactas, sin embargo las mediciones de volumen obtenidos son importantes y muy referenciales. Estas producciones de biogás están estrechamente relacionados, además del substrato a partir del cual se obtuvo el biogás, con los inóculos microbianos empleados y con el tipo de biodigestor.

El inóculo microbiano, suspensión de poblaciones microbianas, constituye para cualquier proceso microbiano un factor importante para su mejora. Inocular suspensiones microbianas en un proceso de biodigestión para mejorar la biodigestión propiamente dicha; por tanto, es ayudar a la

producción de biogás que es lo que se ha conseguido en este trabajo. Los inóculos microbianos que se inoculan en una biodigestión tienen que ser los que intervienen en el proceso. En la biodigestión a partir de polímeros naturales y en ausencia de compuestos inorgánicos, como la realizada en este trabajo, se realiza en tres etapas: 1) hidrólisis y fermentación, en la que la materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaerobias que hidrolizan las moléculas solubles en agua, como grasas, proteínas y carbohidratos, y las transforman en monómeros y compuestos simples solubles; 2) acetogénesis y deshidrogenación, donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, CO_2 e hidrógeno que son los substratos de las bacterias metanogénicas; 3) metanogénica en la que se produce metano a partir de CO_2 e hidrógeno, a partir de la actividad de bacterias metanogénicas (Marty, 1984) (Khanal, 2008). Los microorganismos que en forma secuencial intervienen en el proceso son: 1) bacterias hidrolíticas y de hidrógeno (sintroficas); 2) bacterias sulfato reductoras (sintroficas facultativas) consumidoras de hidrógeno; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metanogénicas; 5) bacterias desnitrificantes (Soubes, 1994). De estos 6 grupos de bacterias los 4 primeros constituyen bacterias anaeróbicas facultativas y las dos últimas bacterias anaeróbicas estrictas. Las empleadas como inóculos han sido

las bacterias anaeróbicas facultativas y las bacterias metanogénicas que son las que intervienen en todo el proceso de biodigestión para la producción de biogás.

La biodigestión es un proceso de digestión que se desarrolla en biodigestores, estos son máquinas simples que convierten las materias primas en subproductos aprovechables, en este caso gas metano y abono (Díaz, 2015). El biodigestor utilizado fue tipo cilíndrico, de batch, lote o discontinuo. Este se caracteriza por una carga y vaciado total de la cámara de digestión. Es de uso en laboratorios y en el tratamiento de materias vegetales, con o sin agitación. Requieren para acelerar su arranque de una proporción de inóculo 20%. Su curva de producción de gas sigue la característica arranque-estabilización-agotamiento. Este tipo de biodigestor es eficaz para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida (Hilbert, 2015). El biogás obtenido es un producto de la biodigestión realizada sobre el substrato mezcla, grass y estiércol de cuy. Este es una mezcla constituida fundamentalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (SH_2) y nitrógeno (N) (Hilbert, 2014)

(Rodríguez y col, 1995). Este biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO₂ y H₂O. Su combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas (Hilbert, 2014):



5.8. Producciones acumuladas de biogás en la biodigestión

El biogás total producido en un biodigestor resultado de la sumatoria de las producciones parciales de biogás constituye la producción acumulada de biogás en un biodigestor.

La mayor producción de biogás obtenida cuando la longitud del substrato y la concentración microbiana de anaeróbicos facultativos y metanogénicos han sido las más altas nos demuestra que tanto el

substrato, microbios anaeróbicos facultativos como microbios metanogénicos tienen influencia en la producción de biogás. Diferentes investigadores coinciden en la importancia del rol fundamental que juegan tanto el substrato como los microorganismos para que se produzca biogás (Soria, 2001) (Sosa y col., 2014). Es probable que el substrato en este trabajo no haya tenido gran influencia para una mayor producción de biogás, se sabe que mientras más pequeño sea el substrato, la fermentación será mejor. A medida que se incrementó el tamaño del substrato (longitud) y las concentraciones de los inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos se dieron incrementos positivos en las producciones de biogás esto probablemente debido a que hubo una mayor actividad microbiana en la fase premetanogénica como metanogénica por las respectivas altas concentraciones de microbios anaerobios facultativos como metanogénicos que en ellas actuaron, que condujeron sinérgica y consecutivamente a una serie de productos que finalmente se transformaron en metano, componente principal del biogás (Sosa & col, 2014)(Marty, 1984)(Soubes, 1994), lo cual se tradujo en una mayor producción de biogás.

No se ha encontrado reportes de producción de biogás a partir del substrato mezcla grass con estiércol de cuy, mucho menos variando la

longitud del sustrato y las concentraciones de los inóculos microbianos. Sin embargo, hay reportes de producción de biogás a partir de otros tipos de sustratos aunque sin aplicación de inóculos microbianos a diferentes concentraciones (Havukainen, 2014) (Bozym, 2015) (Lemmer, 2015).

La producción más alta de biogás obtenida fue de 34 490,25 cm³ (34,5 L);cuyo valor relativamente es alto, mayor al de algunos trabajos reportados. Trabajando con estiércol de ganado se ha llegado a obtener 11 L de biogás, cuando se empleó estiércol de ganado y bora el biogás fue de 25 litros, y con bora solo 16 litros (Rodríguez & col., 1997). Cuando se ha trabajado con la mezcla rastrojo de alimento vegetal del cuy, estiércol de cuy y grass se llegó a obtener 452 L de biogás. Trabajando con la mezcla rastrojo de alimento vegetal del cuy y estiércol del cuy se obtuvo de biogás 104 L (Castillo & Tito, 2010). Estos volúmenes de biogás últimos mayores que el obtenido es debido a que los volúmenes de biodigestión de los biodigestores empleados fueron mayores. En este trabajo se empleó biodigestores con capacidad de 32 litros, donde se empleó bora y estiércol de ganado biodigestores de 18 litros, y en donde se empleó rastrojo de alimento, estiércol de cuy y grass biodigestores de 227 L (Rodríguez & col., 1997) (Castillo & Tito, 2010).

5.9. Productividades de biogás en la biodigestión

La productividad más alta de biogás obtenida fue $34,59 \text{ cm}^3 / \text{día}$, cuyo valor fue bajo y mucho menor que los obtenidos en otros trabajos.

Cuando se trabajó con estiércol de ganado se obtuvo $343,75 \text{ cm}^3 / \text{día}$ de biogás, cuando se empleó estiércol de ganado y bora la productividad obtenida fue $781,25 \text{ cm}^3 / \text{día}$, y solo con bora $500 \text{ cm}^3 / \text{día}$ (Rodríguez & col., 1997). Trabajando con la mezcla rastrojo de alimento vegetal del cuy, estiércol de cuy y grass se obtuvo $1\,973,80 \text{ cm}^3 / \text{día}$ de biogás y con la mezcla rastrojo de alimento vegetal del cuy y estiércol del cuy $481,48 \text{ cm}^3 / \text{día}$ (Castillo & Tito, 2010). La productividad de biogás obtenida podría ser mejorada evaluando otros niveles diferentes de los factores evaluados, así como evaluando la influencia de otros factores que son importantes para una mayor producción de biogás en un menor tiempo.

5.10. Rendimiento de biogás en la biodigestión

El rendimiento de biogás más alto obtenido, $143,81 \text{ cm}^3/\text{g}$ ($0,144 \text{ m}^3/\text{kg}$) es un valor menor al de algunos trabajos pero mayor al de otros. Cuando se trabajó con bora se obtuvo $0,188 \text{ m}^3 / \text{kg}$; con bora más estiércol,

0,184 m³ / kg; y con estiércol, 0,0235 m³ / kg (Rodríguez y col., 1997). El rendimiento de biogás obtenido puede ser mejorado de manera similar a la productividad.

La baja producción, productividad y rendimiento de biogás, entre otros factores, probablemente se deba a la casi total degradación bacteriana del material que debería transformarse en biogás, lo cual dio como resultado una lenta digestión. El estiércol de cuy presenta alta concentración de nitrógeno que favorece el incremento acelerado de la flora bacteriana. Esto también podría haber causado inhibición de los digestores debido a la formación de iones amonio que conlleva a la disminución del pH por debajo del valor óptimo (Mandujano, 1979) (Cowley & Wase, 1981) (Mandujano & Martínez, 1982); La casi total degradación bacteriana del material transformable probablemente haya sido un factor, entre otros más, como la temperatura las que hayan determinado la baja producción de biogás. La temperatura, dentro de los biodigestores durante el tiempo de incubación en este trabajo, ha sido similar a la temperatura del ambiente y esta ha estado variando según los días y meses dentro de un amplio rango por debajo de las temperaturas óptimas. Se sabe que la temperatura es importante para la producción de biogás. Las bacterias mesofílicas completan su ciclo biológico en el ámbito de 15°C a 40°C con una

temperatura óptima de 35°C. Las bacterias termofílicas cumplen sus funciones en el ámbito de 35°C a 60°C con una temperatura óptima de 55°C (Gunnerson & Stuckey, 1986) (Soria & col., 2001). En estas temperaturas la digestión termofílica tiene ventajas dado que dentro de estos rangos la producción de biogás es aproximadamente el doble de la mesofílica, de allí que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general (Gunnerson & Stuckey, 1986). Esto nos hace comprender porqué con las temperaturas trabajadas, menores al óptimo de los mesofílicos, se obtuvo baja producción, productividad y rendimiento de biogás.

CONCLUSIONES

Primera

El substrato e inóculos microbios anaeróbicos facultativos y metanogénicos a diferentes niveles tuvieron influencia en la producción de biogás.

Segunda

La longitud del substrato que mayor influencia tuvo en la producción de biogás fue la de 6 mm.

Tercera

La concentración de inóculos microbios anaeróbicos facultativos que más influencia tuvo en la producción de biogás fue la de 10^8 microb./ ml.

Cuarta

La concentración de inóculos microbios metanogénicos de mayor influencia en la producción de biogás fue la de 10^8 microb./ ml.

Quinta

La mayor producción, productividad y rendimiento de biogás fue de $34\,490,25\text{ cm}^3$; $34,56\text{ cm}^3/\text{día}$ y $14,3810\text{ cm}^3/\text{g}$ respectivamente.

RECOMENDACIONES

Primera

Investigar la influencia de los factores más importantes que afectan la producción de biogás trabajando con sus niveles óptimos.

Segunda

Investigar la producción de biogás trabajando con otros substratos orgánicos solos y en mezcla.

Tercera

Investigar la producción de biogás bajo un proceso de biodigestión continuo.

Cuarta

Asegurar el hermetismo de los biodigestores en la producción de biogás para obtener el ambiente anaeróbico necesario para este proceso.

Quinta

Fomentar la investigación, aplicación y generación de tecnologías amigables con el ambiente para la producción de biogás que conlleven a dar valor agregado a los residuos orgánicos que están como contaminantes del ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anonimous. (1976). MAKING AQUATIC WEEDS USEFUL: SOME PERSPECTIVES FOR DEVELOPING COUNTRIES. Natl. Acad. Sciences, Washington, D.C. 175 p.
- Bidlingmaier, W. (2006). FIFTH ORBIT CONFERENCE PROBES ANAEROBIC DIGESTION. BioCycle Journal of Composting and Organics Recycling. 47(9), 42-49.
- Bjornda, I k. & Moore, J. (1988). CHEMICAL CHARACTERISTICS AND THEIR RELATION TO FERMENTABILITY OF POTENTIAL BIOMASS FEEDSTOCKS. EN: METHANE FROM BIOMASS: A SYSTEMS APPROACH. Smith WH, Frank JR, Abelson PH, Eds. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. & Hamdi, M. (2005). BIOREACTOR PERFORMANCE IN ANAEROBIC DIGESTION OF FRUIT AND VEGETABLE WASTES. Process Biochemistry. 40: 989–995.

Bozym, M., Florczak, I., Zdanowska, P., Wojdalski, J., & Klimkiewicz, M. (2015). AN ANALYSIS OF METAL CONCENTRATIONS IN FOOD WASTES FOR BIOGÁS PRODUCTION. *Renewable Energy* 77 (2015): 467-472.

Carrillo, L. (2003). MICROBIOLOGÍA AGRÍCOLA. Universidad Nacional de Salta. Argentina. Ed. Salta. 1:160.

Castillo, D. & Tito, C. (2010). OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCREMENTO DE CUY EN CONDICIONES AMBIENTALES EN TACNA-PERÚ. ESBI. FACI. COIN. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna. Perú.

Castillo, E., Cristancho, D. & Arellano, V. (2006). STUDY OF THE OPERATIONAL CONDITIONS FOR ANAEROBIC DIGESTION OF URBAN SOLID WASTES. *Waste Management*. 26:546–556.

Cuesta, J. & Col. (2008). INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA “SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DE SU APROVECHAMIENTO”. Fundación Madrid para el conocimiento. Universidad Rey Juan Carlos. Universidad de Alcalá. Madrid. España.

Cui, D. (2006). ENHANCED METHANE PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF DISINTEGRATED AND DEPROTEINIZED EXCESS SLUDGE. *Biotechnology Letters*. 28, 531–538.

Cowley, I. & Wase, D. (1981). ANAEROBIC DIGESTIÓN OF FARM WASTES. A review-part 1. *Process Biochemistry*. *Chem ADV-Chem.Serv.* 115(70):35-40.

De Mes, T., Stams, A., Reitch, J. & Zeeman, G. (2003). "METHANE PRODUCTION BY ANAEROBIC DIGESTION OF WASTEWATER AND SOLID WASTES". IN: *BIO-METHANE & BIO-HYDROGEN - STATUS AND PERSPECTIVES OF BIOLOGICAL METHANE AND HYDROGEN PRODUCTION*. Dutch Biological Hydrogen Foundation. 168 p.

Demirer, G. & Chen, S. (2005). TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTION OF UNSCREENED DAIRY MANURE. *Process Biochemistry*. 40: 3542–3549.

Delgado, V. (2006). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE ESTIÉRCOL DE CUY CAVIA PORCELUS. ESBI. FACI. COIN. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna. Perú.

Demirel, B. & Scherer, P. (2008). THE ROLES OF ACETOTROPHIC AND HYDROGENOTROPHIC METHANOGENS DURING ANAEROBIC CONVERSION OF BIOMASS TO METHANE:A review. Rev Environ Sci Biotechnol. 7,173–190.

Díaz, L. (2015). CURSO GENERACIÓN DE GAS MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS, recuperado de www.comercori.com

Díaz, M., Espitia, V. & Molina, P. (2002). DIGESTIÓN ANAEROBIA. UNA APROXIMACIÓN A LA TECNOLOGÍA. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Biotecnología.

Elias, X. (2005). TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUO. Ed. Díaz de Santos. Madrid. 1 228 p.

Gallert C., & J. Winter. (1997). MESOPHILIC AND THERMOPHILIC ANAEROBIC DIGESTION OF SOURCESORTED ORGANIC WASTES: EFFECT OF AMMONIA ON GLUCOSE DEGRADATION AND METHANE PRODUCTION. Appl Microbiol Biotechnol. 48, 405-410.

González, Y. & Sandoval, S. (2005). DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE PURINES DE

ORIGEN BOVINO. Tesis Doctoral, 204 p. Universidad Católica de Temuco. Chile.

Greashmam, R. & Inamine, E. (1986). NUTRITIONAL IMPROVEMENT OF PROCESSES. IN MANUAL OF INDUSTRIAL MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. Editado por Demain, A. And Solomon, N. American society for microbiology, S. A. Washington. 466 p.

Guevara A. (1996). FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES. PRODUCCIÓN DE GAS Y SANEAMIENTO DE EFLUENTES. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Oficina Regional de la Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú. 80.

Gunnerson, C. & Stuckey, D. (1986). ANAEROBIC DIGESTION PRINCIPES AND PRACTICES FOR BIOGAS SISTEMAS. The world Bank Technical Paper #49, Washington D.C., pp.93.100.

Havukainen, J., Uusitalo, V., Niskanen, A., Kapustina, V. & Horttanainen, M. (2014). EVALUATION OF METHODS FOR ESTIMATING

ENERGY PERFORMANCE OF BIOGÁS PRODUCTION. *Renew Energy* 2014; 66: 232-40.

Hayes, T., W. Jewell, Orto, K., Franconi, A. & D. Sherman. (1979). ANAEROBIC DIGESTIÓN OF CATTLE MANURE. pp. 255-286. In: A.Stafford, B.I. Wheatley y D.E. Hughes. *Anaerobic digestión*. Applied Science Publishers. London, England.

Hedrick, D., White, T., Gruckert, J., Jewell, W. & White, D. (1992). MICROBIAL BIOMASS AND COMMUNITY STRUCTURE OF A PHASE-SEPARATED METHANOGENIC REACTOR DETERMINED BY LIPID ANALYSIS. *Journal of industrial Microbiology*. 9: 193-199.

Hilbert, J. (2014). *MANUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS*. Instituto de Ingeniería Rural. I.N.T.A.-Castelar. Argentina.

Jagnow, D. (1991). *BIOTECNOLOGÍA*. Acribia, Zaragoza,

Johnson, A. (1977). *FINAL REPORT ON RESEARCH IN METHANE GENERATION*. Aerospace Report No. ATR-77 (9990)-4 El segundo, C.A. 65 pp.

Jarvis, Å. (2004). BIOGÁS: RENEWABLE ENERGY FROM ORGANIC WASTE. Swedish Biogas Association, Stockholm, Sweden. Recuperado de: www.sbgf.org

Khanal, S. (2008). ANAEROBIC BIOTECHNOLOGY FOR ENERGY PRODUCTION: PRINCIPLES AND APPLICATIONS. Wiley-Blackwell. Ames. Iowa. p.301.

Kennedy, J. & Berg, D. (1982). ANAEROBIC DIGESTIÓN OF PIGGERY WASTE USING A STATIONARY FIXED FILM REACTOR. Agric. Wastes 4: 151-158.

Lemmer, A., chen, Y., Lindner, J., Wonneberger, A., Zielonka, S., Oechsner, H. & Jungbluth, T. (2015). INFLUENCE OF DIFFERENT SUBSTRATES ON THE PERFORMACE OF A TWO-STAGE HIGH PRESSURE ANAEROBIC DIGESTIÓN SYSTEM. Bioresource Technology 178(2015): 313-318.

Mandujano, M. (1979). EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE ESTIÉRCOL DE BOVINO Y ESQUEMAS VEGETALES PARA OBTENCIÓN DE

BIOGÁS POR FERMENTACIÓN ANAERÓBICA. Informe II E/FE-A2/12. Inst. Inv. Elec. Cuernavaca. Morelos. México. 179 pp.

Mandujano, M. & Martínez, A. (1982). BIOGÁS, ENERGÍA Y FERTILIZANTES A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS. MANUAL PARA EL PROMOTOR DE TECNOLOGÍA. OLADE. Cuernavaca, Morelos, México. 35 pp.

Madigan, M., Martinko, J. & Parker, B. (2003). BIOLOGY OF MICROORGANISMS. 10° Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River,

Marchain, U. (1992). BIOGÁS PROCESSES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Bull.FAO Agric. Services, Rome, 95. 165-193.

Marty, B. (1984). MICROBIOLOGY OF ANAEROBIC DIGESTIÓN. pp. 72-85. In: A.M. Bruce, A. Kouzeli-katsiri y P.J. Newman. Anaerobic digestión of sewage sludge and organic agricultural wastes. New York: Elsevier.

McCarty, P. (1964). ANAEROBIC WASTE TREATMENT FUNDAMENTALS. Part 1. Chemistry and microbiology. Public Works 95: 123 – 126.

Meaza, Y. (2010). BIOGAS POTENTIAL FROM COW MANURE– INFLUENCE OF DIET. Master tesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.

Mejía, G. (1996). DIGESTIÓN ANAERÓBICA. Folleto técnico 1. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc., México.

Montgomery, D. & G. Runger. (1996). PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA. México: Mc Graw Hill. 895 p.

Osorio, J., Ciro, H. & González, H. (2007). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN EN SERIE PARA CLIMA FRÍO. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín. 60 (2).

Pohland, F. G. & Ghosh, S. (1971). ANAEROBIC STABILIZATION OF ORGANIC WASTES. Gobar Gas Research Station . Ajitmal, Etawah (U.P.), India. 52 pp.

Poulsen, G. (2003). ANAEROBIC DIGESTION (SOLID WASTE MANAGEMENT). Aalborg University, Sweden.

Rivas, O., Faith, M. & Guillén, R. (2010). BIODIGESTORES: FACTORES QUÍMICOS, FÍSICOS Y BIOLÓGICOS RELACIONADOS CON SU PRODUCTIVIDAD. Tecnología en Marcha, Vol. 23, N.º 1, P. 39-46.

Rodríguez, J., El K., Rumbos, E. & Delepiani, A. (1997). RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE LA BORA Y EL ESTIÉRCOL DE GANADO. Universidad de Oriente. Instituto Limnológico. Caicara del Orinoco. Estado Bolívar. Venezuela. Agronomía Trop. 47(4), 441-455.

Ruge, I. & Hernández, H. (2015). CONTROL DIFUSO BASADO EN MICROCONTROLADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS. Ciencia, Tecnología y Futuro.

Sachs, J., Meyer, U., Rys, P. & Feitkenhauer, H. (2003). NEW APPROACH TO CONTROL THE METHANOGENIC REACTOR OF

A TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM. *Water Research*. 37: 973–982.

Schlegel, H. & Zaborosch, C. (1993). *GENERAL MICROBIOLOGY*. 2º Edición. Cambridge University Press, UK.

Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcantar, G., Trinidad, J., Borges, L. & Pereyda, G. (2001). PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES MEDIANTE BIODIGESTIÓN DE EXCRETA LÍQUIDA DE CERDO. *Universidad Autónoma de Chapingo. México. TERRA Latinoamericana*, octubre-diciembre, año/vol.19, número 004. pp.353-362.

Sosa, R., Chao, R., & Del Río, J. (2014). ASPECTOS BIOQUÍMICOS Y TECNOLÓGICOS DEL TRATAMIENTO DE RESIDUALES AGRÍCOLAS CON PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. Instituto de Investigaciones porcinas. La Habana. Cuba.

Sosnowski, P., Wieczorek, A. & Ledakowicz, S. (2003). ANAEROBIC CO-DIGESTION OF SEWAGE SLUDGE AND ORGANIC

FRACTION OF MUNICIPAL SOLID WASTES. Advances in Environmental Research. 7: 609-616.

Soubes, M. (1994). BIOTECNOLOGÍA DE LA DIGESTION ANAEROBIA. Pp: 136-148. In: III Taller y Seminario Latinoamericano "tratamiento de Agua Residuales". Montevideo. Uruguay.

Singh, R. (1971). SOME EXPERIMENTS WITH BIOGAS. Gobar Gas Res. St. Ajitmal, Etawah (U.P.). India. 28 p.

Van, B., Frijns, J. & Lettinga, G. (1995). WASTEWATER TREATMENT AND REUSE IN DEVELOPING COUNTRIES. Wageningen Agricultural University.

Verma, S. (2002). ANAEROBIC DIGESTION OF BIODEGRADABLE ORGANICS IN MUNICIPAL SOLID WASTES. Master of Science Degree in Earth Resources Engineering. Department of the Earth & Environmental Engineering (Henry Krumb School of Mines). Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University. 56p. Recuperado de: <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>

Wheatley A. (1990). ANAEROBIC DIGESTION: A WASTE TREATMENT TECHNOLOGY. Elsevier Science Publishers Ltd, Barking, Essex. Cap. 1, 5.

Wolverton, B., McDonald, R. & Gordon, J. (1975). BIOCONVERSIÓN OF WATER HYACINTHS INTO METHANE GAS: Part. I NASA Techn. memorandum TM-X-72725. 32 pp.

Wolverton, B., McDonald, R. & Gordon, J. (1981). ENERGY FROM VASCULAR PLANT WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS. Econ. Bot. 35 (2): 224-232.

Yadvika, S., Sreekrishnan, T., Kohli, S. & Rana, V. (2004). ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM SOLID SUBSTRATES USING DIFFERENT TECHNIQUE: Bioresource Technology, 95:1–10.

ANEXOS

Anexo 1. Procedimientos para la determinación de carbono, nitrógeno, pH, DBO₅, DQO, sólidos totales y sólidos volátiles

Determinación de carbono orgánico total (COT)

Para determinar el carbono orgánico, las moléculas orgánicas deben romperse en unidades de carbono simples y ser convertidas en una forma molecular sencilla que puede medirse de forma cuantitativa.

El método utilizado corresponde al procedimiento descrito por Walkey y Black, que consiste en una combustión húmeda de la materia con una mezcla de dicromato de potasio y un ácido fuerte, en este caso H₂SO₄. Añadiéndose H₃PO₄ para eliminar el carbono inorgánico. Después de la reacción se titula con sulfato ferroso utilizando como indicador difenilamina.

El cálculo de COT se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$\% (\text{COT}) = (V_b - V_l) \times N \times 0,39 / M$$

V_b = volumen de FeSO₄ consumido en la valoración del blanco.

V_l = volumen de FeSO₄ consumido en la valoración de la muestra

N = normalidad del FeSO_4

M = muestra de materia seca (g)

Determinación de nitrógeno

El contenido de nitrógeno orgánico de una muestra se determina por diferencia entre el nitrógeno Kjeldahl y el nitrógeno amoniacal:

$$[\text{N}_{\text{org}}] = [\text{N}_k] - [\text{N} - \text{NH}_4^+]$$

Nitrógeno Total (Kjeldahl)

El método Kjeldahl determina el nitrógeno en estado trinegativo. No tiene en cuenta el nitrógeno en forma de azida, azina, azo, hidrazona, nitrato, nitrito, nitrilo, nitroso, oxima y semicarbazona. A pesar de ello normalmente se asocia a nitrógeno total, por considerar las fracciones más importantes de formas nitrogenadas en los residuos animales, nitrógeno orgánico y amoniacal.

Este análisis ha sido adaptado del método 4500-N de Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA,

1992). Consiste en digerir la muestra, en medio ácido con un catalizador de $K_2SO_4 + CuSO_4$ con temperatura, de manera que los compuestos orgánicos nitrogenados produzcan formas amoniacales, sulfato amónico.

La reacción se podría resumir en:



Posteriormente se analiza el contenido de sales amoniacales mediante la destilación de la muestra digerida con una unidad de destilación semiautomática (UDK 132, Velp). Se añade una base fuerte (NaOH 35 %) para subir el pH y desplazar el equilibrio hacia la formación de amoniaco libre, según la siguiente ecuación:



El destilado se recoge en ácido bórico con indicador mixto (rojo de metilo y verde bromocresol). Al recogerse el vapor en un medio ácido el amoniaco pasará a la forma iónica no volátil.



Finalmente, se realiza la valoración del borato que ha reaccionado con el amoníaco, mediante titulación con un ácido fuerte, HCl, de normalidad conocida



El nitrógeno total se estima utilizando la siguiente expresión:

$$N_k \text{ (mg/kg)} = 14000 \times (V_b - V_l) \times N_{\text{HCl}} / V_{\text{muestra}}$$

Donde:

V_{muestra} : Volumen de la muestra (g)

V_m : Volumen de HCl consumido en la valoración de la muestra (ml)

V_{bl} : Volumen de HCl consumido en la valoración del blanco

N_{HCl} : Normalidad del HCl

Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal se ha analizado por el método de destilación semiautomática UDK 132, Velp, siguiendo el método modificado 4500-NH₃ de Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, 1992).

El método es exactamente el mismo que el utilizado para destilar y valorar el nitrógeno kjeldahl, sin la digestión previa y utilizando como base MgO. La determinación se realiza sobre la fracción, de sobrenadante producido al centrifugar a 3500 rpm, tomando 1 ml de muestra. El cálculo de la concentración de nitrógeno amoniacal se expresa de la siguiente manera:

$$N - \text{NH}_4^+ \text{ (mg/l)} = 14000 \times (V_m - V_{bl}) * N_{\text{HCl}} / V_{\text{muestra}}$$

Donde:

V_{muestra} : Volumen de la muestra (ml)

V_m : Volumen de HCl consumido en la valoración de la muestra (ml)

V_{bl} : Volumen de HCl consumido en la valoración del blanco

N_{HCl} : Normalidad del HCl

Determinación del pH

El pH es la forma común de expresar la concentración del ión hidrógeno en las soluciones acuosas:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Se midió directamente sobre la muestra, a través de un electrodo combinado, en un pHmetro de marca Denver Instrument. Se realizó la calibración con disoluciones tampón estándar de pH 7 y 4. La resolución de las lecturas es de 0,001 unidades de pH y la precisión de +/- 0,001.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (BOD)

La prueba analítica de BOD es una estimación de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual por medio de una población microbiana heterogénea. Las sustancias inorgánicas (S^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , etc.) podrían ser oxidadas si es que los microorganismos quimioautotróficos están presentes y las condiciones de incubación lo permiten.

Se basa en el consumo de oxígeno en una muestra de agua incubada durante cinco días a 20°C y en oscuridad. Para esto se hacen dos determinaciones de oxígeno disuelto (OD_1 y OD_2).

Procedimiento:

- a. Llenar cuidadosamente sin agitar dos botellas BOD con la muestra sin diluir. Si se va a trabajar con muestras diluidas, usar dos botellas adicionales por cada dilución, colocando cuidadosamente la muestra sin diluir y rellenando luego con agua destilada fresca y bien aireada (saturada de oxígeno) en proporción que permita lograr la dilución deseada.
- b. Tapar las botellas evitando que se formen burbujas de aire en el interior, dejar en reposo por 15 segundos.
- c. Determinar por el método de Winkler el contenido inicial del oxígeno disuelto (OD_1) en una botella de cada dilución.
- d. Incubar las botellas restantes durante 5 días a 20°C y en oscuridad.
- e. Determinar luego el contenido de oxígeno disuelto en las botellas incubadas (OD_2).
- f. Encontrar la demanda bioquímica de oxígeno (BOD) de la muestra aplicando la siguiente fórmula:

$$OD_1 - OD_2$$

$$BOD_{(5 d)} (mg O_2 /L) = \frac{OD_1 - OD_2}{p}$$

p

p = Fracción de la muestra analizada (dilución considerada)

NOTA: La dilución considerada correcta será la última que permita hallar diferencias entre OD_1 y OD_2 . esta diferencia será mayor o igual a 2 mg/L, y el valor de OD_2 será mayor o igual a 1 mg de O_2 /L.

Determinación del oxígeno disuelto en el agua

El oxígeno disuelto en el agua puede determinarse colorimétricamente por medio del oxigenómetro o por titración por el método yodométrico de Winkler.

Método de Winkler (Modificado por Alsterberg):

1. Fundamento:

Se basa en la titulación de yodo liberado en cantidad equivalente a la del oxígeno disuelto en el agua, empleando una solución de tiosulfato de sodio y una solución de almidón como indicador.

2. Equipos y aparatos a usar:

- 01 Bureta automática graduada a 50 cc.
- 01 Probeta de 50 o 100 ml.
- 04 Pipetas de 1 o 2 ml.
- 01 Vaso de precipitación de 100 ml.

- 02 Frascos BOD de 300 ml de capacidad con tapa esmerilada por muestra o por dilución.

3. Reactivos:

a. Solución de sulfato de manganeso:

Mn SO₄.H₂O 500 g/L de Sol.

Mn SO₄.4H₂O 480 g/L de Sol.

Mn SO₄.2H₂O 400 g/L de Sol.

b. Solución Yoduro-Alcalina-Azida:

NaI 140 g/L ó KI 150 g/L

NaOH 500 g/L

NaN₃ 7,5 g/L

Mezclar las soluciones en partes iguales.

c. Solución de Na₂S₂O₃.5H₂O de N=1/40 :

Pesar 6,205 g de Na₂S₂O₃.5H₂O y añadir 0,1 g de Na₂CO₃

Llevar a un litro de solución y adicionar una gota de CS₂ .

d. Ácido sulfúrico:

H₂SO₄ cc (densidad gravimétrica, 1,84).

e. Solución de almidón 0,5% :

Pesar 2g de almidón soluble en 300 ml de agua destilada. Luego adicionar NaOH al 20% hasta que desaparezca la opalescencia. Dejar en reposo por 1 a 2 horas, agregar solución de HCl para neutralizar. Añadir 2 ml de ácido acético glacial. Completar a 1 litro de solución con agua destilada.

4. Muestreo y almacenamiento de muestras:

Las botellas BOD deben lavarse con agua de la muestra a ser analizada.

El pH de la muestra debe estar dentro de un rango de 6,8 a 7,8 .

Luego llenar con la muestra hasta el ras y taparlas evitando la formación de burbujas de aire.

El análisis debe comenzarse en menos de 1 hora después de colectada la muestra. Si el análisis va a retardarse, conservar la muestra adicionando 1 ml de solución de $Mn SO_4$ y 1 ml de solución de ioduro-alcalina-azida. El resto de análisis es completado después.

No debe guardarse la muestra en nevera.

5. Procedimiento:

- 5.1. Destapar cuidadosamente el frasco BOD y subsuperficialmente 1 ml de solución de $MnSO_4$ y 1 ml de solución de solución ioduro-alcalina-azida. Tapar el frasco verificando que no formen burbujas de aire. Dejar en reposo por 10 segundos.
- 5.2. Mezclar el contenido hasta que el precipitado se disperse completamente y dejar en reposo por 10 minutos.
- 5.3. Destapar el frasco y adicionar 1 ml de H_2SO_4 cc. Tapar cuidadosamente y agitarlo enérgicamente hasta que todo el precipitado se disuelva. El agua toma un color ámbar, si este no es el caso repetir la prueba; si toma un color blanco lechoso puede ser que la muestra no tenga oxígeno disuelto. Dejar reposar por 30 minutos.
- 5.4. Colocar 50 ml en un vaso de precipitación y titular con la solución de tiosulfato de sodio estándar hasta que aparezca un color amarillo pálido.
- 5.5. Cuando el color ámbar a virado al amarillo pálido, adicionar 1 ml de solución de almidón (indicador) inmediatamente aparecerá una coloración azul, seguir titulando lentamente hasta que desaparezca completamente dicha coloración. Repetir dos veces la titulación para obtener un valor promedio.

5.6. Determinar el contenido de oxígeno disuelto aplicando la siguiente fórmula:

$$a \times N(1/40) \times 8 \times 1000$$

$$\text{mg O}_2 \text{ Dis. /L} = \text{-----}$$

$$V \times (\text{Vfco BOD} - 2) / (\text{Vfco BOD})$$

Donde:

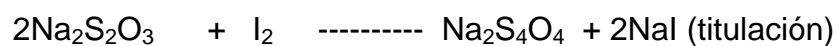
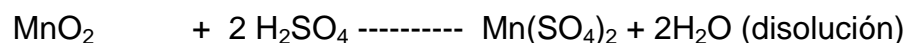
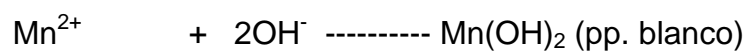
a = Gasto

N = Normalidad del tiosulfato de sodio (1/40)

V = volumen de muestra titulada (50 ml)

Vfco = volumen de frasco BOD (300 ml)

6. Fundamento químico:



Demanda química de Oxígeno

La DQO se define como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente la materia orgánica y los compuestos oxidables de una determinada muestra. Se utilizó el método 5220 B propuesto en Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, 1992), conocido también como método de reflujo abierto.

Se realizó la digestión de la muestra con exceso de dicromato potásico, en medio fuertemente ácido (H_2SO_4), durante 2 horas a 150°C . Se utilizó un bloque de digestión con capacidad para 16 tubos con reflujo abierto (marca Scientific). La reacción es catalizada por sulfato de plata (Ag_2SO_4) y se utiliza HgSO_4 para eliminar problemas de interferencia de los haluros presentes. El exceso de dicromato se valora con sulfato ferroso de amonio, usando ferroina como indicador.

En cada grupo de muestra se realiza un blanco y un control, siguiendo el mismo procedimiento que con el resto de las muestras, sustituyendo la muestra por agua para análisis y el control con ftalato de potasio siendo la DQO teórica de 200 ml de O_2 /l.

La DQO se determina según la siguiente expresión:

$$\text{DQO mg O}_2/\text{l} = (A-B) \times N \times 1600$$

Donde:

A = ml FAS usados para el blanco.

B = ml FAS usado para la muestra, y

N = Normalidad del FAS

Cada tubo de reacción contiene 5 ml de líquido de suspensión del substrato (muestra), 3 ml de dicromato y 5 ml de solución catalizadora y se utilizó un factor de dilución de 250.

Sólidos totales y sólidos volátiles

La determinación del contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se realizó de acuerdo con el método 2540 E de Metodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, 1992). Los sólidos totales se determinaron mediante el peso del residuo, secado a 105°C en estufa, durante 24 horas.

Para el cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$(A-B) \times 1\,000$$

Sólidos Totales (mg/l) = -----

volumen de muestra, ml

Donde:

A = peso de la placa + muestra a 105°C, mg

B = peso de la placa, mg

La determinación de los sólidos volátiles se realizó (SV) sobre la misma muestra, mediante calcinación, en una mufla, a 550° durante una hora. El contenido en sólidos volátiles se determina entre el residuo seco y la ceniza, utilizando la siguiente expresión:

$$(B-C) \times 1\,000$$

Sólidos Volátiles (mg/l) = -----

volumen de muestra, ml

Donde:

B = peso de la placa + muestra a 105°C, mg

C = peso de la placa + peso de residuo después de la incineración, mg

Anexo 2. Cálculos para determinar el porcentaje de carbono y de nitrógeno en la mezcla estiércol y grass del substrato fermentativo

Estiércol + recipiente = 327g
 Recipiente solo = 174g
 Estiércol solo = 327g - 174g = 153 g = 1 Vol.
 Grass + recipiente = 224g
 Grass solo = 224g - 174g = 50 g = 1 Vol.
 Grass solo: 100 g = 2 Vol.
 Agua + recipiente = 873g
 Agua sola = 873g - 174g = 699 g = 1 Vol.
 Agua sola: 2097 g = 3 Vol.
 Mezcla = 153g estiércol + 100g grass = 253g

153g estiércol-----253g mezcla 100 g grass-----253g
 mezcla
 X -----100% Y-----100%
 $X = 153(100)/253 = 60,47\%$ estiercol $Y = 100(100)/ 253 = 39,53\%$ grass

100g grass-----1,36 gN 100g estiércol-----1.84 gN
 100g grass----- X gN 153g estiércol-----Y gN
 $X = 1,36$ gN en grass $Y = 153(1,84)/100 = 2,82$ gN en estiércol

253g de mezcla ----- 100%
 (1,36 + 2,82)g N mezcla ----- X % $X = 4,18(100)/253 = 1,65 \%N$
 mezcla

100g grass-----40 gC 100g estiércol-----47,3 gC
 100g grass----- X gC 153g estiércol----- Y gC

$$X = 40,0 \text{ gC en grass} \qquad Y = 153(47,3)/100 = 72,37 \text{ gC en estiércol}$$

$$\begin{array}{l} 253 \text{ g mezcla} \qquad \text{-----} \quad 100\% \\ (40+72,37) \text{ gC mezcla} \text{-----} \quad X \%C \qquad X = 112,37 (100)/253 = 44,42 \%C \\ \text{mezcla} \end{array}$$

Anexo 3. Evaluación de la humedad relativa, temperatura ambiental, presión manométrica y producción de biogás.

Tabla 27.

Datos de humedad relativa y temperatura ambiental según fecha, día, hora en que se evaluó el proceso de prefermentado desde su inicio hasta el final para los tres tratamientos T-, To y T+

FECHA (DÍA)	HORA	HUM.REL. %	TEMP. AMB. (°C)
10-10-2012	MEZCLA: ESTIÉRCOL+GRASS + UN VOL. DE AGUA		
10-10-2012 (0)	12:00	42	28,8
14-10-2012	AGREGADO A MEZCLA: DOS VOLÚMENES DE AGUA		
14-10-2012 (4)	08:00	63	19,3
15-10-2012 (5)	12:00	41	24,5
16-10-2012 (6)	10:00	37	27,9
18-10-2012 (8)	16:00	46	23,5
19-10-2012 (9)	12:00	41	28,9
20-10-2012 (10)	10:00	37	27,0
21-10-2012 (11)	08:30	68	17,0
22-10-2012 (12)	16:00	54	22,0
23-10-2012 (13)	11:00	40	26,0
25-10-2012 (15)	11:00	40	26,0
26-10-2012 (16)	16:00	51	23,0
27-10-2012 (17)	10:00	53	23,5
28-10-2012 (18)	09:00	44	26,4

Tabla 27. Continúa.

FECHA (DIA)	HORA	HUM.REL. %	TEMP. AMB. (°C)
29-10-2012 (19)	12:00	46	26,0
30-10-2012 (20)	12:00	52	23,3
31-10-2012 (21)	15:00	51	24,2
01-11-2012 (22)	10:00	41	27,0
02-11-2012 (23)	10:00	32	28,3
03-11-2012 (24)	08:30	69	18,3
04-11-2012 (25)	17:00	56	21,0
05-11-2012 (26)	15:00	51	23,0

Fuente: Elaboración propia, 2012.

En la tabla 27 se muestra que entre el 10/10/2012 y el 05/11/2012 (26 días) alrededor de las 08:00 y 17:00 horas hubo un rango de humedad relativa de 32 y 69% con un rango de temperatura ambiental de 18,3 a 28,9°C.

Tabla 28.

Datos de tratamientos T-, T₀ T+ y sus repeticiones (1-4) de presión manométrica (cm de c.a.) y volumen de biogás (cm³) según el número de evaluación, fecha, número de días de fermentación acumulado y lapso parcial de días dados en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
		Ev 0 (Inicio fermentación)	05/11/2012	0		CERO									
		Ev. 1	29/11/2012	24		VEINTICUATRO									
Presión man.	11	11,5	11,5	11	11,25	28	28	28,5	27,5	28	38	37,8	37,4	38,2	37,85
Volumen	384	387	386	383	385	870	872	874	870	871,5	1167	1163	1145	1171	1161,5
		Ev. 2	07/02/2013	94		SETENTA									
Presión man.	7,5	7	8	7,5	7,5	20,5	20	21	20,5	20,5	31,5	31	32	31,5	31,5

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	N°EVALUACIÓN (Ev)		FE CHA	N° DÍAS ACUMULADO		LAPSO DE DÍAS					PROM. T+					PROM. T+
	T-1	T-2		T-3	T-4		T-	To1	To2	To3		To4	To	T+1	T+2	
Vol.	262	258	264	262	261,5	650	631	658	642	645,25	970	950	983	970	968,25	
		Ev. 3	05/03/2013	120		VEINTISEIS										
Presión man.	7,5	7	8	7,5	7,5	28	28,5	27,5	28	28	28	28	29	28,5	28,375	
Volumen	260	255	263	261	259,75	880	890	864	876	877,5	860	865	892	872	872,25	
		Ev. 4	25/03/2013	140		VEINTE										
Presión man.	7	8	7	8	7,5	27	28,5	27,5	28	27,75	28,5	28	27,5	28,5	28,125	
Volumen	150	155	152	153	152,5	900	990	910	985	946,25	850	860	840	870	855	
		Ev. 5	18/04/2013	164		VEINTICUATRO										
Presión man.	6	6,5	6,5	5,5	6,125	23	24	22,5	22,5	23	27	27	27,5	26,5	27	
Vol.	110	115	112	108	111,25	630	640	625	625	630	880	882	885	880	881,75	
		Ev. 6	16/05/2013	192		VEINTIOCHO										
Presión man.	5,5	5	6	6	5,625	25	26	25	25	25,25	27,5	27	27	28,5	27,5	
Volumen	120	118	125	120	120,75	650	656	652	650	652	890	890	870	910	890	
		Ev. 7	05/06/2013	212		VEINTE										

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	N°EVALUACIÓN (Ev)		FE CHA	N° DÍAS ACUMULADO	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS	To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
	T-1	T-2														
Presión man.	6	7	5	6	6	20	22	18	21		20,25	22	21	22	23	22
Volumen	100	110	92	102	101	560	580	556	568		566	630	630	645	648	638,25
		Ev. 8	25/06/2013	232		VEINTE										
Presión man.	5	5,5	5,5	5	5,25	13	13	13	13,5		13,125	30	28	28	33	29,75
Vol.	90	100	95	98	95,75	400	395	405	410		402,5	640	635	640	650	641,25
		Ev. 9	15/07/2013	252		VEINTE										
Presión man.	6	6	7	5	6	15	16	16	13		15	31,5	32	31	31	31,375
Volumen	210	208	215	210	210,75	490	490	510	470		490	790	810	790	785	793,75
		Ev. 10	29/07/2013	266		CATORCE										
Presión man.	4	4,5	5	3	4,125	11	11	12	11		11,25	26	27	27	24	26
Volumen	100	110	118	85	103,25	260	265	265	255		261,25	680	710	705	620	678,75
		Ev. 11	19/08/2013	287		VEINTIUNO										
Presión man.	5	5	4	6	5	14	13	15	14		14	29	29	28,5	29	28,875
Vol.	110	115	110	112	111,75	470	460	480	465		468,75	630	640	640	630	635
		Ev. 12	05/09/2013	304		DIECISIETE										

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	N°EVALUACIÓN (Ev)		FE CHA	N° DÍAS ACUMULADO	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS	To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
	T-1	T-2														
Presión man.	4	4,5	4	5	4,375	10	11	9	10	10	25	27	25	23	25	
Volumen	90	95	95	98	94,5	260	285	250	255	262,5	580	595	585	560	580	
		Ev. 13	19/09/2013	318		CATORCE										
Presión man.	5	6	4	4,5	4,875	10	11	12	8	10,25	28	28	27,5	29	28,125	
Volumen	120	135	110	120	121,25	340	340	365	305	337,5	535	540	520	560	538,75	
		Ev. 14	03/10/2013	332		CATORCE										
Presión man.	0	0	0	0	0	14	14	13	15	14	30	31	30	28	29,75	
Vol.	0	0	0	0	0	280	280	270	290	280	590	600	600	560	587,5	
		Ev. 15	17/10/2013	346		CATORCE										
Presión man.	0	0	0	0	0	17	16	17,5	17,5	17	29	30	28	29	29	
Volumen	0	0	0	0	0	480	475	482	484	480,25	670	675	668	668	670,25	
		Ev. 16	06/11/2013	366		VEINTE										
Presión man.	0	0	0	0	0	16	16,5	16	16,5	16,25	23,5	24	23	24	23,625	
Volumen	0	0	0	0	0	510	515	505	508	509,5	450	450	445	452	449,25	
		Ev. 17	20/11/2013	380		CATORCE										

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	19	19	20,5	18	19,125	27	28	26	27,5	27,125
Vol.	0	0	0	0	0	450	454	460	450	453,50	600	610	555	600	591,25
		Ev. 18	04/12/2013	394		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	22	23	23	21	22,25	28	27	28	29	28
Volumen	0	0	0	0	0	660	665	662	650	659,25	690	680	690	700	690
		Ev. 19	18/12/2013	408		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	17,5	17	18	17,5	17,50	26,5	26	26	27	26,375
Volumen	0	0	0	0	0	550	530	565	545	547,50	590	590	580	600	590
		Ev. 20	01/01/2014	422		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	14	14	14	13	13,75	23	24	25	21	23,25
Vol.	0	0	0	0	0	420	425	415	405	416,25	470	475	482	458	471,25
		Ev. 21	15/01/2014	436		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	17	18	16	17,5	17,125	27,8	28,5	26	27	27,325
Volumen	0	0	0	0	0	530	560	520	530	535	600	620	610	600	607,5
		Ev. 22	29/01/2014	450		CATORCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	15	15	14,5	15,5	15	27	26	28	27	27
Volumen	0	0	0	0	0	440	450	440	445	443,75	690	680	695	695	690
		Ev. 23	12/02/2014	464		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	15	15,5	14,5	14,5	14,875	28	29	27	28	28
Vol.	0	0	0	0	0	540	550	540	545	543,75	540	555	535	545	543,75
		Ev. 24	26/02/2014	478		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	18	19	18,5	18	18,375	24	26	25	25	25
Volumen	0	0	0	0	0	530	545	535	540	537,5	510	515	515	510	512,5
		Ev. 25	12/03/2014	492		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	18	19	18,5	18	18,375	21,5	23	20	22	21,625
Volumen	0	0	0	0	0	480	495	490	485	487,5	470	475	470	480	473,75
		Ev. 26	26/03/2014	506		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	17	17,5	17,5	17	17,25	24	23	25	24	24
Vol.	0	0	0	0	0	430	440	435	425	432,5	550	545	570	555	555
		Ev. 27	09/04/2014	520		CATORCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FE CHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	19	19	20	18	19	29	29	28	30	29
Volumen	0	0	0	0	0	500	550	565	500	528,75	550	555	540	560	551,25
		Ev. 28	23/04/2014	534		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	13	14	13	13,5	13,375	19	19	20	19	19,25
Volumen	0	0	0	0	0	350	370	345	370	358,75	450	460	450	440	450
		Ev. 29	07/05/2014	548		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	27	25	25	25,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	670	680	665	660	668,75
		Ev. 30	21/05/2014	562		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	23	23	21	22,25
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	430	415	435	430	427,5
		EVA. 31	03/06/2014	575		TRECE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	21	21	20,5
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	790	770	780	800	785
		EVA. 32	17/06/2014	589		CATORCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	12	11	10,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	460	445	470	465	460
		EVA. 33	01/07/2014	562		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,5	17	19	18	18,125
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	460	445	470	465	460
		EVA.34	15/07/2014	617		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	18	16	18	17,25
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	410	415	405	410	410
		EVA.35	29/07/2014	631		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16	15	15	15,5
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	440	445	430	435	437,5
		EVA.36	14/08/2014	647		DIECISEIS									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	26	25	27	26,25
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	710	695	690	720	703,75
		EVA. 37	28/08/2014	661		CATORCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,5	11	10	11	10,875
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	405	390	410	401,25
		EVA. 38	16/09/2014	680		DIECINUEVE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	18	16	16	16,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	310	330	300	305	311,25
		EVA. 39	30/10/2014	694		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	27	28	27	27,50
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	480	510	490	495
		EVA. 40	14/10/2014	708		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	26	27	27	26,75
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	450	430	460	445	446,25
		EVA. 41	28/10/2014	722		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	21	21	23	21,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	530	510	500	545	521,25
		EVA. 42	11/11/2014	736		CATORCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	NºEVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	Nº DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	26	26	27	26,5
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	760	760	750	765	758,75
		EVA.43	25/11/2014	750		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	19	18	18	18,25
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	440	450	430	435	438,75
		EVA.44	09/12/2014	739		QUINCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	24	23	27	24,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	650	650	635	680	653,75
		EVA.45	23/12/2014	778		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	27	26	27	26,5
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	700	700	690	715	701,25
		EVA.46	07/01/2015	793		QUINCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	26	27	26	26,25
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	710	735	720	721,25
		EVA.47	20/01/2015	806		TRECE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0			0	0	0	0	0	0	0	16	16	15	15	15,5
Vol.	0			0	0	0	0	0	0	0	350	375	330	345	350
		EVA.48	03/02/2015	820		CATORCE									
Presión man.	0			0	0	0	0	0	0	0	21,5	22	20	21,5	21,25
Vol.	0			0	0	0	0	0	0	0	500	500	400	450	462,5
		EVA.49	17/02/2015	834		CATORCE									
Presión man.	0			0	0	0	0	0	0	0	23,5	21	22	21,5	22
Volumen	0			0	0	0	0	0	0	0	580	500	510	600	547,5
		EVA.50	03/03/2015	848		CATORCE									
Presión man.	0			0	0	0	0	0	0	0	25	25	26	24	25
Vol.	0			0	0	0	0	0	0	0	700	740	730	710	720
		EVA.51	19/03/2015	864		DIECISEIS									
Presión man.	0			0	0	0	0	0	0	0	26	24	25	24	24,75
Vol.	0			0	0	0	0	0	0	0	580	500	560	570	552,5
		EVA.52	07/04/2015	883		DIECINUEVE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	T-1	N°EVALUACIÓN (Ev) T-2	FECHA T-3	N° DÍAS ACUMULADO T-4	PROM. T-	LAPSO DE DÍAS To1	To2	To3	To4	PROM. To	T+1	T+2	T+3	T+4	PROM. T+
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	25	26	25	25,75
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	600	500	550	550	550
		EVA.53	21/04/2015	897		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	16	20	17	17,75
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	430	400	450	420	425
		EVA.54	05/05/2015	911		CATORCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	19	18	17	18,25
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	450	400	500	450	450
		EVA.55	21/05/2015	927		DIECISEIS									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	14	13	15	14
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	400	350	300	337,5
		EVA.56	02/06/2015	939		DOCE									
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	17,5	17	19	17,875
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	400	380	400	387,5
		EVA.57	17/06/2015	954		QUINCE									

Tabla 28. Continúa.

Tratam.	N°EVALUACIÓN (Ev)				N° DÍAS ACUMULADO T-4	LAPSO DE DÍAS To1					PROM. To					PROM. T+
	T-1	T-2	FECHA T-3				To2	To3	To4	T+1		T+2	T+3	T+4		
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	17	16	15	16	
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350	450	300	300	350	
		EVA.58	30/06/2015	967		TRECE										
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	18	21	18	19,25	
Volumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350	400	400	300	362,5	
		EVA.59	14/07/2015	981		CATORCE										
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	19	16	15	17	
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	500	300	350	387,5	
		EVA.60	30/07/2015	997		DIECISEIS										
Presión man.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	18	17	20	18,5	
Vol.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	420	350	400	430	400	

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 28 se muestra valores de los tratamientos T-, T₀ T+ y sus repeticiones (1-4) sobre presión manométrica y volumen de biogás según el número de evaluación, fecha, número de días de fermentación acumulado y lapso parcial de días dados en el proceso de biodigestión para la producción

Tabla 29.

Datos en tratamiento T- y sus repeticiones (T-1, T-2, T-3, T-4) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso simple, lapso acumulado en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T- 1 P.simp. (cm ³)	T-1 P.acum. (cm ³)	T- 2 P.simp. (cm ³)	T-2 P.acum. (cm ³)	T- 3 P.simp. (cm ³)	T-3 P.acum. (cm ³)	T- 4 P.simp. (cm ³)	T-4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
Inicio ferm.	05/11/2012 -05/11/2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1RA.	05/11/2012 -29/11/2012	24	24	384	384	387	387	386	386	383	383	385	385
2DA.	29/11/2012 -07/02/2013	70	94	262	646	258	645	264	650	262	645	261,5	646,5
3RA.	07/02/2013 -05/03/2013	26	120	260	906	255	900	263	913	261	906	259,75	906,25
4TA.	05/03/2013 -25/03/2013	20	140	150	1056	155	1055	152	1065	153	1059	152,5	1058,75
5TA.	25/03/2013 -18/04/2013	24	164	110	1166	115	1170	112	1177	108	1167	111,25	1170
6TA.	18/04/2013 -16/05/2013	28	192	120	1286	118	1288	125	1302	120	1287	120,75	1290,75
7MA.	16/05/2013 -05/06/2013	20	212	100	1386	110	1398	92	1394	102	1389	101	1391,75
8VA.	05/06/2013 -25/06/2013	20	232	90	1476	100	1498	95	1489	98	1487	95,75	1487,5

Tabla 29. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T- 1 P.simp. (cm ³)	T-1 P.acum. (cm ³)	T- 2 P.simp. (cm ³)	T-2 P.acum. (cm ³)	T- 3 P.simp. (cm ³)	T-3 P.acum. (cm ³)	T- 4 P.simp. (cm ³)	T-4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
9NA.	25/06/2013 -15/07/2013	20	252	210	1686	208	1706	215	1704	210	1697	210,75	1698,25
10MA.	15/07/2013 -29/07/2013	14	266	100	1786	110	1816	118	1822	85	1782	103,25	1801,5
11VA.	29/07/2013 -19/08/2013	21	287	110	1896	115	1931	110	1932	112	1894	111,75	1913,25
12VA.	19/08/2013 -05/09/2013	17	304	90	1986	95	2026	95	2027	98	1992	94,5	2007,75
13VA.	05/09/2013 -19/09/2013	14	318	120	2106	135	2161	110	2137	120	2112	121,25	2129
14VA.	19/09/2013 -03/10/2013	14	332	0	2106	0	2161	0	2137	0	2112	0	2129
Total acum.(cm ³)			332		2106		2161		2137		2112		2129

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Tabla 30.

Datos de tratamiento T_0 y sus repeticiones (T_0 1, T_0 2, T_0 3, T_0 4) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso parcial , lapso acumulado en el proceso de biodigestión

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	To 1 P.simp. (cm ³)	To1 P.acum. (cm ³)	To 2 P.simp. (cm ³)	To2 P.acum. (cm ³)	To3 P.simp. (cm ³)	To3 P.acum. (cm ³)	To 4 P.simp. (cm ³)	To4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
Inicio ferm.	05/11/2012 -05/11/2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1RA.	05/11/2012 -29/11/2012	24	24	870	870	872	872	874	874	870	870	871,5	871,5
2DA.	29/11/2012 -07/02/2013	70	94	650	1520	631	1503	658	1532	642	1512	645,25	1516,75
3RA.	07/02/2013 -05/03/2013	26	120	880	2400	890	2393	864	2396	876	2388	877,5	2394,25
4TA.	05/03/2013 -25/03/2013	20	140	900	3300	990	3383	910	3306	985	3373	946,25	3340,5
5TA.	25/03/2013 -18/04/2013	24	164	630	3930	640	4023	625	3931	625	3998	630	3970,5
6TA.	18/04/2013 -16/05/2013	28	192	650	4580	656	4679	652	4583	650	4648	652	4622,5
7MA.	16/05/2013 -05/06/2013	20	212	560	5140	580	5259	556	5139	568	5216	566	5188,5
8VA.	05/06/2013 -25/06/2013	20	232	400	5540	395	5654	405	5544	410	5626	402,5	5591

Tabla 30. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	To 1 P.simp. (cm ³)	To1 P.acum. (cm ³)	To 2 P.simp. (cm ³)	To2 P.acum. (cm ³)	To3 P.simp. (cm ³)	To3 P.acum. (cm ³)	To 4 P.simp. (cm ³)	To4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
9NA.	25/06/2013 -15/07/2013	20	252	490	6030	490	6144	510	6054	470	6096	490	6081
10MA.	15/07/2013 -29/07/2013	14	266	260	6290	265	6409	265	6319	255	6351	261,25	6342,25
11VA.	29/07/2013 -19/08/2013	21	287	470	6760	460	6869	480	6799	465	6816	468,75	6811
12VA.	19/08/2013 -05/09/2013	17	304	260	7020	285	7154	250	7049	255	7071	262,5	7073,5
13VA.	05/09/2013 -19/09/2013	14	318	340	7360	340	7494	365	7414	305	7376	337,5	7411
14VA.	19/09/2013 -03/10/2013	14	332	280	7640	280	7774	270	7684	290	7666	280	7691
15VA.	03/10/2013 -17/10/2013	14	346	480	8120	475	8249	482	8166	484	8150	480,25	8171,25
16VA.	17/10/2013 -06/11/2013	20	366	510	8630	515	8764	505	8671	508	8658	509,5	8680,75
17VA.	06/11/2013 -20/11/2013	14	380	450	9080	454	9218	460	9131	450	9108	453,5	9134,25
18VA.	20/11/2013 -04/12/2013	14	394	660	9740	665	9883	662	9793	650	9758	659,25	9793,5
19VA.	04/12/2013 -18/12/2013	14	408	550	10290	530	10413	565	10358	545	10303	547,5	10341
20VA.	18/12/2013 -01/01/2014	14	422	420	10710	425	10838	415	10773	405	10708	416,25	10757,25
21VA.	01/01/2014 -15/01/2014	14	436	530	11240	560	11398	520	11293	530	11238	535	11292,25
22VA.	15/01/2014 -29/01/2014	14	450	440	11680	450	11848	440	11733	445	11683	443,75	11736

Tabla 30. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	To 1 P.simp. (cm ³)	To1 P.acum. (cm ³)	To 2 P.simp. (cm ³)	To2 P.acum. (cm ³)	To3 P.simp. (cm ³)	To3 P.acum. (cm ³)	To 4 P.simp. (cm ³)	To4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
23VA.	29/01/2014 -12/02/2014	14	464	540	12220	550	12398	540	12273	545	12228	543,75	12179,75
24VA.	12/02/2014 -26/02/2014	14	478	530	12750	545	12943	535	12808	540	12768	537,5	12623,5
25VA.	26/02/2014 -12/03/2014	14	492	480	13230	495	13438	490	13298	485	13253	487,5	13067,25
26VA.	12/03/2014 -26/03/2014	14	506	430	13660	440	13878	435	13733	425	13678	432,5	13511
27VA.	26/03/2014 -09/04/2014	14	520	500	14160	550	14428	565	14298	500	14178	528,75	13954,75
28VA.	09/04/2014 -23/04/2014	14	534	350	14510	370	14798	345	14643	370	14548	358,75	14398,5
29VA.	23/04/2014 -07/05/2014	14	548	0	14510	0	14798	0	14643	0	14548	0	14398,5
30VA.	07/05/2014 -21/05/2014	14	562	0	14510	0	14798	0	14643	0	14548	0	14398,5
TOTAL ACUMULADA (cm3)			562		14510		14798		14643		14548		14398,5

Fuente: Elaboración propia, agosto 2014.

Tabla 31.

Datos de tratamientos T+ y sus repeticiones (T+1, T+2, T+3, T+4) de producción de biogás simple y acumulada según el número de evaluación, fechas de evaluación, lapso simple, lapso acumulado del proceso de biodigestión para la producción de biogás

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
INICIO FERM.	05/11/2012-05/11/2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1RA.	05/11/2012-29/11/2012	24	24	1167	1167	1163	1163	1145	1145	1171	1171	1161,5	1161,5
2DA.	29/11/2012-07/02/2013	70	94	970	2137	950	2113	983	2128	970	2141	968,25	2129,75

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
3RA.	07/02/2013- 05/03/2013	26	120	860	2997	865	2978	892	3020	872	3013	872,25	3002
4TA.	05/03/2013- 25/03/2013	20	140	850	3847	860	3838	840	3860	870	3883	855	3857
5TA.	25/03/2013- 18/04/2013	24	164	880	4727	882	4720	885	4745	880	4763	881,75	4738,75
6TA.	18/04/2013- 16/05/2013	28	192	890	5617	890	5610	870	5615	910	5673	890	5628,75
7MA.	16/05/2013- 05/06/2013	20	212	630	6247	630	6240	645	6260	648	6321	638,25	6267
8VA.	05/06/2013- 25/06/2013	20	232	640	6887	635	6875	640	6900	650	6971	641,25	6908,25
9NA.	25/06/2013- 15/07/2013	20	252	790	7677	810	7685	790	7690	785	7756	793,75	7702

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
10MA.	15/07/2013-29/07/2013	14	266	680	8357	710	8395	705	8395	620	8376	678,75	8380,75
11VA.	29/07/2013-19/08/2013	21	287	630	8987	640	9035	640	9035	630	9006	635	9015,75
12VA.	19/08/2013-05/09/2013	17	304	580	9567	595	9630	585	9620	560	9566	580	9595,75
13VA.	05/09/2013-19/09/2013	14	318	535	10102	540	10170	520	10140	560	10126	538,75	10134,5
14VA.	19/09/2013-03/10/2013	14	332	590	10692	600	10770	600	10740	560	10686	587,5	10722
15VA.	03/10/2013-17/10/2013	14	346	670	11362	675	11445	668	11408	668	11354	670,25	11392,25
16VA.	17/10/2013-06/11/2013	20	366	450	11812	450	11895	445	11853	452	11806	449,25	11841,5

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
17VA.	06/11/2013-20/11/2013	14	380	600	12412	610	12505	555	12408	600	12406	591,25	12432,75
18VA.	20/11/2013-04/12/2013	14	394	690	13102	680	13185	690	13098	700	13106	690	13122,75
19VA.	04/12/2013-18/12/2013	14	408	590	13692	590	13775	580	13678	600	13706	590	13712,75
20VA.	18/12/2013-01/01/2014	14	422	470	14162	475	14250	482	14160	458	14164	471,25	14184
21VA.	01/01/2014-15/01/2014	14	436	600	14762	620	14870	610	14770	600	14764	607,5	14791,5
22VA.	15/01/2014-29/01/2014	14	450	690	15452	680	15550	695	15465	695	15459	690	15481,5
23VA.	29/01/2014-12/02/2014	14	464	540	15992	555	16105	535	16000	545	16004	543,75	16025,25

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
24VA.	12/02/2014-26/02/2014	14	478	510	16502	515	16620	515	16515	510	16514	512,5	16537,75
25VA.	26/02/2014-12/03/2014	14	492	470	16972	475	17095	470	16985	480	16994	473,75	17011,5
26VA.	12/03/2014-26/03/2014	14	506	550	17522	545	17640	570	17555	555	17549	555	17566,5
27VA.	26/03/2014-09/04/2014	14	520	550	18072	555	18195	540	18095	560	18109	551,25	18117,75
28VA.	09/04/2014-23/04/2014	14	534	450	18522	460	18655	450	18545	440	18549	450	18567,75
29VA.	23/04/2014-07/05/2014	14	548	670	19192	680	19335	665	19210	660	19209	668,75	19236,5
30VA.	07/05/2014-21/05/2014	14	562	430	19622	415	19750	435	19645	430	19639	427,5	19664

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
31VA	21/05/2014-03/06/2014	13	575	790	20412	770	20520	780	20425	800	20439	785	20449
32VA	03/06/2014-17/06/2014	14	589	300	20712	280	20800	310	20735	290	20729	295	20744
33VA	17/06/2014-01/07/2014	14	603	460	21172	445	21245	470	21205	465	21194	460	21204
34VA	01/07/2014-15/07/2014	14	617	410	21582	415	21660	405	21610	410	21604	410	21614
35VA	15/07/2014-29/07/2014	14	631	440	22022	445	22105	430	22040	435	22039	437,5	22051,5
36VA	29/07/2014-14/08/2014	16	647	710	22732	695	22800	690	22730	720	22759	703,75	22755,25
37VA	14/08/2014-28/08/2014	14	661	400	23132	405	23205	390	23120	410	23169	401,25	23156,5

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
38VA	28/08/2014-16/09/2014	19	680	310	23442	330	23535	300	23420	305	23474	311,25	23467,75
39VA	16/09/2014-30/10/2014	14	694	500	23942	480	24015	510	23930	490	23964	495	23962,75
40VA	30/10/2014-14/10/2014	14	708	450	24392	430	24445	460	24390	445	24409	446,25	24409
41VA	14/10/2014-28/10/2014	14	722	530	24922	535	24980	525	24915	540	24949	532,5	24941,5
42VA	28/10/2014-11/11/2014	14	736	760	25682	735	25715	730	25645	780	25729	751,25	25692,75
43VA	11/11/2014-25/11/2014	14	750	440	26122	450	26165	430	26075	435	26164	438,75	26131,5
44VA	25/11/2014-09/12/2014	14	764	650	26772	650	26815	635	26710	680	26844	653,75	26785,25

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
45VA	09/12/2014-23/12/2014	14	778	700	27472	700	27515	690	27400	715	27559	701,25	27486,5
46VA	23/12/2014-07/01/2015	15	793	720	28192	710	28225	735	28135	720	28279	721,25	28207,75
47VA	07/01/2015-20/01/2015	13	806	350	28542	375	28600	330	28465	345	28624	350	28557,75
48VA	20/01/2015-03/02/2015	14	820	500	29042	500	29100	400	28865	450	29074	462,5	29020,25
49VA	03/02/2015-17/02/2015	14	834	580	29622	500	29600	510	29375	600	29674	547,5	29567,75
50VA	17/02/2015-03/03/2015	14	848	700	30322	740	30340	730	30105	710	30384	720	30287,75

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
51VA	03/03/2015-19/03/2015	16	864	580	30902	500	30840	560	30665	570	30954	552,5	30840,25
52VA	19/03/2015-07/04/2015	19	883	600	31502	500	31340	550	31215	550	31504	550	31390,25
53VA	07/04/2015-21/04/2015	14	897	430	31932	400	31740	450	31665	420	31924	425	31815,25
54VA	21/04/2015-05/05/2015	14	911	450	32382	400	32140	500	32165	450	32374	450	32265,25
55VA	05/05/2015-21/05/2015	16	927	300	32682	400	32540	350	32515	300	32674	337,5	32602,75
56VA	21/05/2015-02/06/2015	12	939	370	33052	400	32940	380	32895	400	33074	387,5	32990,25
57VA	02/06/2015-17/06/2015	15	954	350	33402	450	33390	300	33195	300	33374	350	33340,25

Tabla 31. Continúa.

Evaluación producción (cm ³)	Fechas de lapso	Lapso simple (días)	Lapso acum. (días)	T+ 1 P.simp. (cm ³)	T+1 P.acum. (cm ³)	T+2 P.simp. (cm ³)	T+2 P.acum. (cm ³)	T+3 P.simp. (cm ³)	T+3 P.acum. (cm ³)	T+ 4 P.simp. (cm ³)	T+4 P.acum. (cm ³)	Prom. P.simp. (cm ³)	Prom. P.acum. (cm ³)
58VA	17/06/2015-30/06/2015	13	967	350	33752	400	33790	400	33595	300	33674	362,5	33702,75
59VA	30/06/2015-14/07/2015	14	981	400	34152	500	34290	300	33895	350	34024	387,5	34090,25
60VA	14/07/2015-30/07/2015	16	997	420	34572	350	34640	400	34295	430	34454	400	34490,25
TOTAL ACUMULADA (cm3)			997		34572		34640		34295		34454		34490,25

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Tabla 32.

Datos de humedad relativa, temperatura ambiental y temperatura en los biodigestores de los tratamientos T-, To y T+ según el número de evaluación, mes, fecha y hora en que se tomó los datos del proceso de biodigestión para la producción de biogás

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
1	Nov	05/11/2012	16:00	59,00	22,40	22,00	22,00	21,00
2	Nov	06/11/2012	09:00	60,00	21,80	21,00	22,00	21,00
3	Nov	07/11/2012	09:00	60,00	21,90	21,00	22,00	21,00
4	Nov	08/11/2012	14:30	59,00	22,60	22,00	22,50	22,00
5	Nov	09/11/2012	08:30	61,00	21,70	21,00	21,00	21,00
6	Nov	10/11/2012	17:00	59,00	30,00	22,00	22,00	22,00
7	Nov	11/11/2012	19:00	76,00	16,50	20,00	21,00	21,00
8	Nov	12/11/2012	16:00	55,00	22,50	22,00	22,00	22,00
9	Nov	13/11/2012	10:15	57,00	22,60	22,00	21,00	21,00
10	Nov	14/11/2012	14:00	53,00	23,00	23,00	23,00	22,00
11	Nov	15/11/2012	09:00	65,00	19,50	20,00	20,00	19,00
12	Nov	16/11/2012	15:00	52,00	24,10	24,00	23,00	23,00
13	Nov	17/11/2012	08:00	70,00	19,60	19,00	20,00	19,50
14	Nov	18/11/2012	09:00	66,00	19,60	21,00	20,50	20,50
15	Nov	19/11/2012	19:00	69,00	20,30	22,00	21,00	21,00
16	Nov	20/11/2012	16:00	57,00	22,50	23,00	21,00	22,00
17	Nov	21/11/2012	17:00	62,00	21,00	22,00	21,00	21,00
18	Nov	22/11/2012	11:00	58,00	21,60	23,00	21,00	20,00
19	Nov	23/11/2012	13:00	55,00	21,60	23,00	20,00	19,00
20	Nov	24/11/2012	08:00	61,00	19,50	20,00	18,00	19,00
21	Nov	25/11/2012	09:30	56,00	20,50	21,00	19,00	19,00
22	Nov	26/11/2012	15:30	55,00	22,70	23,00	21,00	22,00
23	Nov	27/11/2012	17:00	60,00	20,90	22,00	20,00	21,00
24	Nov	28/11/2012	16:00	54,00	22,10	23,00	21,00	21,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
25	Nov	29/11/2012	10:15	61,00	20,30	21,00	20,00	20,00
26	Nov	30/11/2012	17:00	59,00	23,00	22,50	22,00	21,00
PROMEDIO				59,96	21,68	21,75	21,04	20,85
MÁXIMO				76,00	30,00	24,00	23,00	23,00
MÍNIMO				52,00	16,50	19,00	18,00	19,00
1	Dic	01/12/2012	19:00	58,00	21,50	21,00	22,00	21,00
2	Dic	02/12/2012	15:00	52,00	23,60	23,00	22,00	22,00
3	Dic	03/12/2012	15:30	52,00	24,00	24,00	23,00	23,00
4	Dic	04/12/2012	11:00	50,00	23,30	24,00	25,00	22,00
5	Dic	05/12/2012	18:00	69,00	21,80	22,00	22,00	22,00
6	Dic	06/12/2012	10:00	59,00	22,60	23,00	24,00	21,00
7	Dic	07/12/2012	16:00	57,00	23,80	23,00	23,00	23,00
8	Dic	08/12/2012	10:00	59,00	22,70	23,00	23,00	21,00
9	Dic	09/12/2012	12:30	50,00	24,50	26,00	24,00	22,00
10	Dic	13/12/2012	16:00	54,00	24,00	24,00	24,00	23,00
11	Dic	15/12/2012	09:00	62,00	21,70	22,00	21,00	22,00
12	Dic	16/12/2012	12:00	52,00	24,70	26,00	23,00	22,00
13	Dic	18/12/2012	16:30	56,00	23,70	24,00	23,00	23,00
14	Dic	19/23/2012	16:30	56,00	24,50	24,00	24,00	23,00
15	Dic	30/12/2012	16:00	52,00	23,90	23,00	23,00	22,00
PROMEDIO				55,87	23,35	23,47	23,07	22,13
MÁXIMO				69,00	24,70	26,00	25,00	23,00
MÍNIMO				50,00	21,50	21,00	21,00	21,00
1	Ene	02/01/2013	14:00	52,00	24,00	24,00	23,00	23,00
2	Ene	21/01/2013	09:30	62,00	23,70	23,00	23,00	22,00
3	Ene	22/01/2013	11:40	48,00	25,90	26,00	26,00	24,00
4	Ene	23/01/2013	10:00	50,00	22,90	23,00	23,00	22,00
5	Ene	24/01/2013	15:50	52,00	25,30	25,00	25,00	24,00
6	Ene	26/01/2013	11:40	51,00	26,20	27,00	26,00	24,00
7	Ene	28/01/2013	08:50	65,00	23,40	23,00	23,00	20,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
8	Ene	29/01/2013	09:00	64,00	23,50	23,00	23,00	22,00
9	Ene	30/01/2013	09:10	63,00	23,10	23,00	23,00	22,00
10	Ene	31/01/2013	09:45	58,00	23,30	23,00	23,00	22,00
PROMEDIO				56,50	24,13	24,00	23,80	22,50
MÁXIMO				65,00	26,20	27,00	26,00	24,00
MÍNIMO				48,00	22,90	23,00	23,00	20,00
1	Feb	01/02/2013	12:00	49,00	26,20	27,00	26,00	24,00
2	Feb	03/02/2013	10:00	59,00	24,30	24,00	25,00	23,00
3	Feb	04/02/2013	17:30	63,00	24,30	24,00	24,00	24,00
4	Feb	05/02/2013	12:00	49,00	27,10	28,00	27,00	25,00
5	Feb	07/02/2013	08:00	77,00	23,80	24,00	24,00	24,00
6	Feb	09/02/2013	09:15	55,00	25,80	26,00	27,00	25,00
7	Feb	11/02/2013	15:00	53,00	25,90	26,00	26,00	26,00
8	Feb	14/02/2013	09:15	55,00	23,30	24,00	25,00	22,00
9	Feb	16/02/2013	18:00	62,00	23,90	24,00	25,00	23,00
10	Feb	18/02/2013	09:00	59,00	24,20	24,00	24,00	23,00
11	Feb	19/02/2013	10:00	53,00	22,00	22,00	22,00	22,00
12	Feb	21/02/2013	09:30	55,00	23,00	23,00	24,00	22,00
13	Feb	23/02/2013	16:00	62,00	23,80	24,00	24,00	23,00
14	Feb	25/02/2013	17:00	57,00	25,50	25,00	25,00	25,00
15	Feb	27/02/2013	14:30	47,00	23,60	24,00	28,00	26,00
PROMEDIO				57,00	24,45	24,60	25,07	23,80
MÁXIMO				77,00	27,10	28,00	28,00	26,00
MÍNIMO				47,00	22,00	22,00	22,00	22,00
1	Mar	01/03/2013	09:20	51,00	25,60	26,00	26,00	25,00
2	Mar	02/03/2013	14:00	48,00	27,40	27,00	27,00	26,00
3	Mar	03/03/2013	09:00	61,00	23,60	24,00	24,00	23,00
4	Mar	04/03/2013	17:00	64,00	25,30	25,00	25,00	26,00
5	Mar	05/03/2013	17:00	54,00	25,80	26,00	26,00	26,00
6	Mar	07/03/2013	14:20	50,00	27,90	27,00	27,00	26,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
7	Mar	08/03/2013	15:00	44,00	28,70	27,00	27,00	27,00
8	Mar	09/03/2013	10:40	66,00	24,30	24,00	24,00	23,00
9	Mar	10/03/2013	10:20	62,00	24,50	27,00	25,00	23,00
10	Mar	11/03/2013	16:45	54,00	25,70	25,00	25,00	25,00
11	Mar	12/03/2013	17:30	58,00	24,50	24,00	24,00	24,00
12	Mar	13/03/2013	17:00	50,00	25,50	25,00	25,00	25,00
13	Mar	15/03/2013	12:00	52,00	26,40	25,00	25,00	23,00
14	Mar	16/03/2013	13:30	48,00	26,00	25,00	25,00	23,00
15	Mar	17/03/2013	10:35	60,00	23,00	24,00	23,00	22,00
16	Mar	18/03/2013	16:15	49,00	25,90	24,00	25,00	24,00
17	Mar	19/03/2013	17:30	56,00	24,00	23,00	23,00	24,00
18	Mar	20/03/2013	17:30	56,00	24,70	24,00	24,00	24,00
19	Mar	22/03/2013	17:30	58,00	24,40	24,00	23,00	24,00
20	Mar	23/03/2013	09:00	69,00	21,50	21,00	21,00	21,00
21	Mar	25/03/2013	15:00	45,00	25,70	25,00	24,00	23,00
22	Mar	26/03/2013	16:15	51,00	25,20	24,00	24,00	24,00
23	Mar	28/03/2013	09:00	64,00	22,00	22,00	21,00	21,00
24	Mar	29/03/2013	11:15	58,00	26,20	24,00	23,00	22,00
PROMEDIO				55,33	25,16	24,67	24,42	23,92
MÁXIMO				69,00	28,70	27,00	27,00	27,00
MÍNIMO				44,00	21,50	21,00	21,00	21,00
1	Abr	01/04/2013	17:00	53,00	23,50	22,00	22,00	23,00
2	Abr	02/04/2013	18:00	54,00	22,20	21,00	22,00	22,00
3	Abr	03/04/2013	16:00	50,00	25,00	24,00	24,00	22,00
4	Abr	06/04/2013	10:00	64,00	21,00	20,00	20,00	20,00
5	Abr	09/04/2013	11:00	53,00	26,00	23,00	23,00	21,00
6	Abr	10/04/2013	16:30	51,00	23,70	23,00	23,00	22,00
7	Abr	11/04/2013	10:00	59,00	22,00	21,00	21,00	20,00
8	Abr	15/04/2013	15:30	52,00	24,20	23,00	23,00	22,00
9	Abr	16/04/2013	16:40	56,00	22,80	22,00	22,00	21,00
10	Abr	18/04/2013	16:00	57,00	26,10	20,00	20,00	20,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
11	Abr	19/04/2013	08:00	70,00	17,90	18,00	18,00	18,00
12	Abr	20/04/2013	09:00	48,00	20,70	21,00	20,00	20,00
13	Abr	21/04/2013	12:30	50,00	23,80	22,00	22,00	20,00
14	Abr	22/04/2013	15:30	52,00	30,00	22,00	21,00	21,00
15	Abr	24/04/2013	17:30	53,00	21,50	20,00	20,00	24,00
16	Abr	26/04/2013	07:30	67,00	17,70	18,00	18,00	18,00
17	Abr	27/04/2013	10:15	57,00	21,60	21,00	20,00	20,00
18	Abr	28/04/2013	10:45	51,00	26,00	22,00	21,00	20,00
19	Abr	29/04/2013	14:00	45,00	24,30	23,00	23,00	21,00
20	Abr	30/04/2013	12:45	58,00	23,10	22,00	20,00	20,00
PROMEDIO				55,00	23,16	21,40	21,15	20,75
MÁXIMO				70,00	30,00	24,00	24,00	24,00
MÍNIMO				45,00	17,70	18,00	18,00	18,00
1	May	02/05/2013	08:00	79,00	17,00	17,00	17,00	17,00
2	May	04/05/2013	12:00	55,00	23,00	20,00	20,00	18,00
3	May	05/05/2013	10:15	62,00	18,80	18,00	18,00	17,00
4	May	07/05/2013	17:00	54,00	22,60	21,00	21,00	21,00
5	May	11/05/2013	10:15	76,00	18,20	17,00	18,00	18,00
6	May	12/05/2013	10:30	76,00	18,20	17,00	18,00	18,00
7	May	14/05/2013	09:00	74,00	17,00	17,00	17,00	17,00
8	May	15/05/2013	09:30	70,00	18,70	18,00	19,00	18,00
9	May	16/05/2013	09:00	66,00	19,50	20,00	20,00	19,00
10	May	17/05/2013	09:30	54,00	19,30	19,00	20,00	19,00
11	May	18/05/2013	09:30	70,00	19,80	19,50	20,00	20,00
12	May	19/05/2013	13:00	55,00	24,40	23,00	23,00	21,00
13	May	21/05/2013	08:30	81,00	18,20	18,00	18,00	18,00
14	May	23/05/2013	14:30	60,00	20,70	20,00	20,00	20,00
15	May	30/05/2013	14:20	51,00	21,20	20,00	18,00	19,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
16	May	31/05/2013	15:30	51,00	21,90	21,00	21,00	20,00
PROMEDIO				64,63	19,91	19,09	19,25	18,75
MÁXIMO				81,00	24,40	23,00	23,00	21,00
MÍNIMO				51,00	17,00	17,00	17,00	17,00
1	Jun	02/06/2013	10:00	49,00	20,80	18,00	17,00	15,00
2	Jun	03/06/2013	16:30	59,00	19,50	18,00	17,00	18,00
3	Jun	04/06/2013	16:45	59,00	19,10	18,00	18,00	18,00
4	Jun	05/06/2013	15:40	55,00	20,20	19,00	19,00	18,00
5	Jun	06/06/2013	17:00	64,00	20,30	19,00	19,00	18,00
6	Jun	08/06/2013	08:50	73,00	17,30	17,00	17,00	15,00
7	Jun	09/06/2013	09:30	76,00	17,50	17,00	17,00	15,00
8	Jun	11/06/2013	11:35	55,00	21,50	19,00	19,00	18,00
9	Jun	12/06/2013	16:00	57,00	20,90	20,00	20,00	19,00
10	Jun	13/06/2013	15:20	62,00	19,70	19,00	19,00	19,00
11	Jun	14/06/2013	09:00	69,00	18,10	17,00	18,00	17,00
12	Jun	15/06/2013	15:00	57,00	21,50	20,00	20,00	19,00
13	Jun	19/06/2013	09:15	74,00	14,80	15,00	15,00	15,00
14	Jun	20/06/2013	08:30	67,00	15,40	15,00	15,00	15,00
15	Jun	22/06/2013	12:30	60,00	18,50	17,00	17,00	15,00
16	Jun	23/06/2013	10:00	69,00	18,00	17,00	17,00	15,00
17	Jun	25/06/2013	13:50	72,00	16,40	16,00	16,00	15,00
18	Jun	28/06/2013	11:00	56,00	18,70	17,00	16,00	15,00
19	Jun	29/06/2013	13:00	55,00	19,40	15,00	18,00	18,00
20	Jun	30/06/2013	15:15	57,00	18,50	18,00	18,00	17,00
PROMEDIO				62,25	18,81	17,55	17,60	16,70
MÁXIMO				76,00	21,50	20,00	20,00	19,00
MÍNIMO				49,00	14,80	15,00	15,00	15,00
1	Jul	02/07/2013	17:00	57,00	18,50	18,00	18,00	15,00
2	Jul	03/07/2013	12:30	53,00	19,50	17,00	17,00	15,00
3	Jul	04/07/2013	17:00	58,00	18,00	17,00	17,00	17,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
4	Jul	05/07/2013	16:40	61,00	18,30	17,50	17,50	17,00
5	Jul	06/07/2013	12:00	52,00	20,50	18,00	18,00	16,00
6	Jul	07/07/2013	13:00	54,00	20,40	19,00	19,00	17,00
7	Jul	09/07/2013	17:50	65,00	17,50	17,00	17,00	17,00
8	Jul	11/07/2013	09:15	75,00	14,50	13,00	15,00	15,00
9	Jul	12/07/2013	16:55	59,00	17,30	17,00	17,00	16,00
10	Jul	13/07/2013	11:00	61,00	17,40	16,00	16,00	15,00
11	Jul	15/07/2013	14:30	55,00	19,70	18,00	18,00	16,00
12	Jul	17/07/2013	09:00	76,00	14,30	14,00	15,00	15,00
13	Jul	18/07/2013	09:05	67,00	16,10	16,00	16,00	16,00
14	Jul	19/07/2013	09:45	69,00	16,70	16,00	16,00	15,00
15	Jul	20/07/2013	11:00	70,00	16,70	16,00	16,00	15,00
16	Jul	21/07/2013	11:25	76,00	14,80	15,00	15,00	15,00
17	Jul	23/07/2013	11:40	58,00	17,30	15,00	15,00	14,00
18	Jul	25/07/2013	17:00	62,00	17,50	16,00	17,00	15,00
19	Jul	27/07/2013	08:15	72,00	15,30	15,00	15,00	15,00
20	Jul	29/07/2013	11:30	57,00	19,50	18,00	17,00	15,00
21	Jul	30/07/2013	10:45	74,00	16,40	15,00	16,00	15,00
PROMEDIO				63,38	17,44	16,36	16,55	15,52
MÁXIMO				76,00	20,50	19,00	19,00	17,00
MÍNIMO				52,00	14,30	13,00	15,00	14,00
1	Ago	02/08/2013	16:40	69,00	16,20	15,00	16,00	15,00
2	Ago	03/08/2013	11:00	66,00	17,50	16,00	16,00	15,00
3	Ago	04/08/2013	11:10	62,00	17,60	16,00	16,00	15,00
4	Ago	05/08/2013	17:10	59,00	17,00	16,00	16,00	15,00
5	Ago	06/08/2013	12:30	50,00	20,10	17,00	17,00	15,00
6	Ago	19/08/2013	12:00	49,00	20,00	18,00	18,00	15,00
7	Ago	21/08/2013	12:20	57,00	19,10	18,00	18,00	17,00
8	Ago	22/08/2013	12:00	50,00	20,40	19,00	19,00	17,00
9	Ago	24/08/2013	09:00	17,00	14,90	15,00	15,00	15,00
10	Ago	26/08/2013	16:20	61,00	18,30	17,00	17,00	15,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
11	Ago	27/08/2013	14:00	51,00	21,10	19,00	19,00	17,00
12	Ago	29/08/2013	10:15	59,00	19,50	19,00	18,00	16,00
13	Ago	30/08/2013	10:30	62,00	19,60	19,00	19,00	17,00
14	Ago	31/08/2013	08:26	69,00	17,10	17,00	17,00	16,00
PROMEDIO				55,79	18,46	17,21	17,21	15,71
MÁXIMO				69,00	21,10	19,00	19,00	17,00
MÍNIMO				17,00	14,90	15,00	15,00	15,00
1	Set	03/09/2013	08:00	73,00	15,10	15,00	15,00	15,00
2	Set	04/09/2013	15:00	50,00	22,90	24,00	21,00	20,00
3	Set	05/09/2013	09:20	71,00	17,70	18,00	17,00	18,00
4	Set	07/09/2013	11:20	65,00	18,90	18,00	18,00	15,00
5	set	09/09/2013	16:45	54,00	21,70	20,00	20,00	20,00
6	Set	10/09/2013	08:50	72,00	18,00	18,00	18,00	17,00
7	set	14/09/2013	11:00	69,00	18,70	18,00	18,00	17,00
8	Set	16/09/2013	16:20	60,00	18,70	18,00	18,00	17,00
9	Set	17/09/2013	10:00	69,00	15,70	16,00	16,00	15,00
10	Set	19/09/2013	12:00	58,00	18,80	20,00	19,00	17,00
11	Set	21/09/2013	10:00	75,00	16,70	16,00	17,00	16,00
12	Set	22/09/2013	09:50	79,00	15,70	15,00	15,00	15,00
13	Set	24/09/2013	11:00	72,00	17,30	17,00	17,00	16,00
14	Set	25/09/2013	17:00	65,00	18,60	18,00	18,00	18,00
15	Set	26/09/2013	16:50	61,00	19,60	19,00	19,00	19,00
16	Set	27/09/2013	17:50	68,00	17,70	18,00	18,00	18,00
17	Set	28/09/2013	11:00	71,00	17,00	16,00	16,00	15,00
18	Set	30/09/2013	16:50	68,00	17,90	17,00	17,00	17,00
PROMEDIO				66,67	18,15	17,83	17,61	16,94
MÁXIMO				79,00	22,90	24,00	21,00	20,00
MÍNIMO				50,00	15,10	15,00	15,00	15,00
1	Oct	03/10/2013	16:30	59,00	18,70	18,00	18,00	17,00
2	Oct	04/10/2013	15:30	56,00	20,30	19,00	19,00	18,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
3	Oct	05/10/2013	10:30	61,00	19,10	20,00	19,00	18,00
4	Oct	07/10/2013	11:20	52,00	21,60	20,00	20,00	19,00
5	Oct	09/10/2013	17:30	66,00	17,80	18,00	18,00	18,00
6	Oct	12/10/2013	10:00	63,00	18,00	18,00	18,00	17,00
7	Oct	14/10/2013	16:30	64,00	18,80	18,00	19,00	18,00
8	Oct	16/10/2013	15:00	52,00	22,20	21,00	20,00	20,00
9	Oct	17/10/2013	15:55	53,00	20,40	20,00	20,00	20,00
10	Oct	18/10/2013	17:00	55,00	20,50	20,00	20,00	19,00
11	Oct	19/10/2013	15:00	56,00	20,40	20,00	20,00	19,00
12	Oct	21/10/2013	15:50	58,00	20,30	10,00	20,00	19,00
13	Oct	22/10/2013	11:30	50,00	21,40	20,00	20,00	19,00
14	Oct	23/10/2013	15:00	56,00	21,60	20,00	21,00	20,00
15	Oct	25/10/2013	17:20	64,00	19,00	19,00	19,00	19,00
16	Oct	26/10/2013	09:30	73,00	17,90	18,00	18,00	17,00
PROMEDIO				58,63	19,88	18,69	19,31	18,56
MÁXIMO				73,00	22,20	21,00	21,00	20,00
MÍNIMO				50,00	17,80	10,00	18,00	17,00
1	Nov	05/11/2013	11:55	52,00	21,70	20,00	20,00	20,00
2	Nov	06/11/2013	09:20	71,00	19,30	18,00	18,00	18,00
3	Nov	09/11/2013	10:00	61,00	19,50	19,00	19,00	18,00
4	Nov	12/11/2013	16:33	55,00	21,10	20,00	20,00	20,00
5	Nov	13/11/2013	17:14	60,00	20,70	20,00	20,00	20,00
6	Nov	15/11/2013	18:00	63,00	19,50	19,00	19,00	19,00
7	Nov	16/11/2013	09:00	67,00	18,80	18,00	19,00	19,00
8	Nov	19/11/2013	17:00	57,00	22,30	21,00	21,00	21,00
9	Nov	20/11/2013	09:00	69,00	19,80	19,00	19,00	18,00
10	Nov	23/11/2013	12:00	54,00	23,20	23,00	23,00	22,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
11	Nov	30/11/2013	13:00	55,00	24,30	24,00	24,00	23,00
PROMEDIO				60,36	20,93	20,09	20,18	19,82
MÁXIMO				71,00	24,30	24,00	24,00	23,00
MÍNIMO				52,00	18,80	18,00	18,00	18,00
1	Dic	02/12/2013	09:50	61,00	20,90	21,00	21,00	20,00
2	Dic	04/12/2013	13:00	55,00	24,30	24,00	24,00	23,00
3	Dic	06/12/2013	15:00	63,00	23,80	23,00	23,00	23,00
4	Dic	09/12/2013	11:36	53,00	24,50	23,00	23,00	22,00
5	Dic	10/12/2013	11:40	57,00	24,20	23,00	23,00	22,00
6	Dic	11/12/2013	16:30	57,00	23,30	23,00	23,00	22,00
7	Dic	12/12/2013	09:00	62,00	21,30	21,00	21,00	20,00
8	Dic	16/12/2013	17:10	61,00	23,50	23,00	23,00	23,00
9	Dic	17/12/2013	08:30	66,00	22,10	22,00	22,00	21,00
10	Dic	18/12/2013	17:00	56,00	22,80	22,00	22,00	22,00
11	Dic	21/12/2013	09:25	58,00	21,70	21,00	22,00	21,00
12	Dic	24/12/2013	10:45	56,00	23,30	23,00	23,00	21,00
13	Dic	26/12/2013	11:40	52,00	25,00	24,00	25,00	23,00
14	Dic	27/12/2013	09:50	55,00	22,50	22,00	23,00	21,00
15	Dic	28/12/2013	10:00	57,00	23,00	22,00	23,00	21,00
PROMEDIO				57,93	23,08	22,47	22,73	21,67
MÁXIMO				66,00	25,00	24,00	25,00	23,00
MÍNIMO				52,00	20,90	21,00	21,00	20,00
1	Ene	01/01/2014	08:00	67,00	21,30	21,00	21,00	21,00
2	Ene	02/01/2014	12:30	48,00	26,00	25,00	25,00	24,00
3	Ene	04/01/2014	10:45	50,00	24,40	24,00	24,00	23,00
4	Ene	06/01/2014	12:05	53	25,5	25	25	24
5	Ene	09/01/2014	16:07	50	25,5	25,00	24,00	25,00
6	Ene	13/01/2014	11:05	48	26,9	26	25	25
7	Ene	15/01/2014	09:58	60	24,70	24,00	25,00	24,00
8	Ene	17/01/2014	10:45	50	26,1	26	25	26

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
9	Ene	19/01/2014	13:30	45	27,9	27	26	26
10	Ene	22/01/2014	13:20	51,00	25,60	25,00	25,00	26,00
11	Ene	25/01/2014	11:30	49,00	26,80	26,00	25,00	26,00
12	Ene	28/01/2014	13:13	43,00	26,30	25	25	25
13	Ene	29/01/2014	11:20	45	25,10	25,00	25,00	24,00
14	Ene	31/01/2014	12:57	38	26,6	25,00	25,00	25,00
PROMEDIO				49,79	25,62	24,93	24,64	24,57
MÁXIMO				67,00	27,90	27,00	26,00	26,00
MÍNIMO				38,00	21,30	21,00	21,00	21,00
1	Feb	03/02/2014	13:01	47	26,10	25,00	25,00	25,00
2	Feb	07/02/2014	13:22	43	25,7	24	24	24
3	Feb	10/02/2014	12:07	50	25,40	25,00	25,00	24,00
4	Feb	12/02/2014	10:30	57	23,90	23,00	24,00	23,00
5	Feb	14/02/2014	13:00	51	24,50	24,50	25,00	24,50
6	Feb	17/02/2014	12:10	44	24	24	25	24
7	Feb	19/02/2014	12:00	45	25,00	24,00	25,00	23,00
8	Feb	20/02/2014	11:20	54	23,40	22,00	23,00	23,00
9	Feb	21/02/2014	09:05	60	21,70	21,00	22,00	21,00
10	Feb	24/02/2014	12:15	47	25,80	25,00	25,00	24,00
11	Feb	25/02/2014	12:00	53	24,30	24,00	24,00	23,00
12	Feb	26/02/2014	09:30	59	22,7	22	23	22
13	Feb	28/02/2014	11:30	60	24,2	24	24	23
PROMEDIO				51,5384615	24,36	23,65	24,15	23,35
MÁXIMO				60	26,10	25,00	25,00	25,00
MÍNIMO				43,00	21,70	21,00	22,00	21,00
1	Mar	03/03/2014	10:45	52	24,50	24,00	25,00	23,00
2	Mar	05/03/2014	11:45	52	25,40	24,00	25,00	24,00
3	Mar	06/03/2014	10:05	57	23,80	24,00	24,00	23,00
4	Mar	07/03/2014	08:30	61	21,80	22,00	22,00	21,00
5	Mar	11/03/2014	09:22	54	23,50	24,00	24,00	22,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
6	Mar	12/03/2014	09:00	56	22,60	22,00	23,00	22,00
7	Mar	14/03/2014	11:30	57	23,9	24	24	23
8	Mar	18/03/2014	08:15	59	20,70	21,00	21,00	21,00
9	Mar	20/03/2014	08:30	60	21,20	21,00	22,00	21,00
10	Mar	21/03/2014	08:30	58	21,90	22,00	23,00	22,00
11	Mar	24/03/2014	08:30	55	21,20	22,00	22,00	22,00
12	Mar	26/03/2014	10:00	59	21,70	24,00	23,00	22,00
13	Mar	27/03/2014	10:15	57	22,20	24,00	23,00	22,00
14	Mar	31/03/2014	17:30	43	24,60	23,00	24,00	23,00
PROMEDIO				55,7142857	22,79	22,93	23,21	22,21
MÁXIMO				61,00	25,40	24,00	25,00	24,00
MÍNIMO				43,00	20,70	21,00	21,00	21,00
1	Abril	03/04/2014	08:45	71	19,80	19,00	20,00	20,00
2	Abril	07/04/2014	08:25	65	20,00	21,00	20,00	20,00
3	Abril	09/04/2014	17:30	57	22,90	22,00	22,00	22,00
4	Abril	14/04/2014	17:30	59	23,3	21	22	22
5	Abril	16/04/2014	17:30	58	23,20	22,00	22,00	22,00
6	Abril	22/04/2014	08:30	67	19,30	20,00	20,00	20,00
7	Abril	23/04/2014	08:15	69	18,30	19,00	19,00	19,00
8	Abril	24/04/2014	15:40	53	23,70	22,00	22,00	22,00
9	Abril	25/04/2014	17:10	55	22,50	21,00	22,00	22,00
10	Abril	28/04/2014	09:00	58	19,60	20,00	19,00	19,00
11	Abril	29/04/2014	08:30	71	18,40	18,00	18,00	18,00
PROMEDIO				62,0909091	21,00	20,45	20,55	20,55
MÁXIMO				71	23,70	22,00	22,00	22,00
MÍNIMO				53,00	18,30	18,00	18,00	18,00
1	May	02/05/2014	10:45	58	20,60	21,00	21,00	20,00
2	May	06/05/2014	15:30	53	22,30	21,00	21,00	21,00
3	May	07/05/2014	18:40	56	21,70	21,00	21,00	20,00
4	May	09/05/2014	17:20	57	21,5	21	21	21

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
5	May	13/05/2014	11:10	62	18,80	19,00	19,00	19,00
6	May	15/05/2014	10:20	56	19,50	20,00	20,00	20,00
7	May	19/05/2014	08:30	73	17,00	17,00	17,00	17,00
8	May	20/05/2014	08:20	66	16,70	17,00	17,00	17,00
9	May	21/05/2014	08:20	68	17,10	17,00	17,00	17,00
10	May	27/05/2014	09:00	66	16,80	17,00	17,00	17,00
11	May	28/05/2014	08:20	70,00	16,60	17,00	17,00	17,00
PROMEDIO				62,27	18,96	18,91	18,91	18,73
MÁXIMO				73,00	22,30	21,00	21,00	21,00
MÍNIMO				53,00	16,60	17,00	17,00	17,00
1	Jun	03/06/2014	12:00	57,00	19,60	19,00	19,00	19,00
2	Jun	05/06/2014	04:48	58,00	18,50	17,00	17,00	17,00
3	Jun	10/06/2014	16:00	57,00	19,70	18,00	18,00	18,00
4	Jun	12/06/2014	08:00	75,00	15,20	15,00	15,00	15,00
5	Jun	16/06/2014	09:15	65,00	15,40	16,00	16,00	15,00
6	Jun	17/06/2014	09:00	70,00	14,60	16,00	16,00	15,00
7	Jun	23/06/2014	08:15	87,00	14,90	15,00	15,00	15,00
8	Jun	28/06/2014	09:00	78,00	14,20	14,00	14,00	14,00
9	Jun	30/06/2014	08:40	70,00	14,30	15,00	15,00	15,00
PROMEDIO				68,56	16,27	16,11	16,11	15,89
MÁXIMO				87,00	19,70	19,00	19,00	19,00
MÍNIMO				57,00	14,20	14,00	14,00	14,00
1	Jul	01/07/2014	08:15	74,00	14,40	14,00	14,00	14,00
2	Jul	04/07/2014	08:00	78,00	14,50	14,00	14,00	14,00
3	Jul	08/07/2014	09:20	72,00	13,30	14,00	14,00	14,00
4	Jul	11/07/2014	04:48	59,00	17,30	16,00	16,00	16,00
5	Jul	15/07/2014	08:15	76,00	13,10	14,00	14,00	14,00
6	Jul	17/07/2014	08:05	70,00	12,90	13,00	13,00	14,00
7	Jul	25/07/2014	15:30	55,00	17,30	17,00	17,00	16,00
8	Jul	29/07/2014	08:00	71,00	13,30	14,00	14,00	14,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
9	Jul	31/07/2014	09:30	74,00	13,90	14,00	14,00	14,00
PROMEDIO				69,89	14,44	14,44	14,44	14,44
MÁXIMO				78,00	17,30	17,00	17,00	16,00
MÍNIMO				55,00	12,90	13,00	13,00	14,00
1	Ago	05/08/2014	09:36	50,00	20,30	21,00	21,00	21,00
2	Ago	14/08/2014	17:00	52,00	20,60	19,00	19,00	20,00
3	Ago	20/08/2014	11:15	59,00	17,60	17,00	17,00	16,00
4	Ago	25/08/2014	17:00	58,00	18,40	18,00	18,00	18,00
5	Ago	26/08/2014	11:00	57,00	16,90	17,00	17,00	16,00
6	Ago	28/08/2014	10:55	66,00	15,60	17,00	17,00	16,00
PROMEDIO				57,00	18,23	18,17	18,17	17,83
MÁXIMO				66,00	20,60	21,00	21,00	21,00
MÍNIMO				50,00	15,60	17,00	17,00	16,00
1	Sep	02/09/2014	11:25	77,00	15,70	15,00	15,00	15,00
2	Sep	05/09/2014	16:40	69,00	17,30	17,00	17,00	17,00
3	Sep	16/09/2014	13:20	68,00	18,00	18,00	18,00	18,00
4	Sep	19/09/2014	12:00	67,00	17,00	17,00	17,00	17,00
5	Sep	23/09/2014	16:20	63,00	18,70	18,00	18,00	18,00
PROMEDIO				68,80	17,34	17,00	17,00	17,00
MÁXIMO				77,00	18,70	18,00	18,00	18,00
MÍNIMO				63,00	15,70	15,00	15,00	15,00
1	Oct	03/10/2014	11:00	57,00	19,80	20,00	20,00	20,00
2	Oct	11/10/2014	11:20	55,00	20,10	21,00	21,00	21,00
3	Oct	14/10/2014	17:15	65,00	20,00	20,00	20,00	20,00
4	Oct	24/10/2014	16:45	55,00	21,80	22,00	22,00	22,00
5	Oct	28/10/2014	09:30	67,00	19,00	20,00	20,00	20,00
6	Oct	30/10/2014	16:45	66,00	21,20	21,00	21,00	20,00
PROMEDIO				60,83	20,32	20,67	20,67	20,50
MÁXIMO				67,00	21,80	22,00	22,00	22,00
MÍNIMO				55,00	19,00	20,00	20,00	20,00
1	Nov	01/11/2014	09:50	66,00	18,70	19,00	19,00	19,00
2	Nov	04/11/2014	09:00	73,00	17,00	18,00	18,00	18,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
3	Nov	11/11/2014	11:00	51,00	23,70	23,00	23,00	23,00
4	Nov	12/11/2014	16:23	56,00	23,20	23,00	23,00	23,00
5	Nov	18/11/2014	09:30	74,00	18,70	19,00	19,00	18,00
6	Nov	22/11/2014	11:15	47,00	22,20	23,00	23,00	22,00
7	Nov	24/11/2014	10:45	56,00	20,60	22,00	22,00	21,00
8	Nov	25/11/2014	08:15	69,00	18,50	18,00	18,00	18,00
PROMEDIO				61,50	20,33	20,63	20,63	20,25
MÁXIMO				74,00	23,70	23,00	23,00	23,00
MÍNIMO				47,00	17,00	18,00	18,00	18,00
1	Dic	02/12/2014	17:00	60,00	22,10	23,00	23,00	22,00
2	Dic	05/12/2014	08:15	71,00	19,30	20,00	20,00	19,00
3	Dic	09/12/2014	11:45	54,00	22,00	23,00	23,00	22,00
4	Dic	13/12/2014	10:00	60,00	21,10	22,00	22,00	21,00
5	Dic	18/12/2014	16:40	55,00	22,10	23,00	23,00	22,00
6	Dic	23/12/2014	11:40	50,00	22,40	24,00	24,00	23,00
PROMEDIO				58,33	21,50	22,50	22,50	21,50
MÁXIMO				71,00	22,40	24,00	24,00	23,00
MÍNIMO				50,00	19,30	20,00	20,00	19,00
1	Ene	07/01/2015	11:30	60,00	22,90	24,00	24,00	23,00
2	Ene	13/01/2015	08:00	75,00	19,60	21,00	21,00	20,00
3	Ene	16/01/2015	09:15	73,00	19,70	21,00	21,00	20,00
4	Ene	20/01/2015	07:30	76,00	19,20	20,00	20,00	19,00
5	Ene	27/01/2015	10:25	54,00	24,10	24,00	24,00	24,00
6	Ene	29/01/2015	16:25	59,00	24,70	26,00	26,00	25,00
PROMEDIO				66,17	21,70	22,67	22,67	21,83
MÁXIMO				76,00	24,70	26,00	26,00	25,00
MÍNIMO				54,00	19,20	20,00	20,00	19,00
1	Feb	03/02/2015	08:00	66,00	21,90	23,00	23,00	22,00
2	Feb	06/02/2015	13:35	46,00	27,50	28,00	28,00	27,00
3	Feb	17/02/2015	09:30	60,00	24,20	25,00	25,00	24,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
4	Feb	19/02/2015	16:50	49,00	26,20	27,00	27,00	26,00
PROMEDIO				55,25	24,95	25,75	25,75	24,75
MÁXIMO				66,00	27,50	28,00	28,00	27,00
MÍNIMO				46,00	21,90	23,00	23,00	22,00
1	Mar	03/03/2015	17:20	50,00	24,90	26,00	26,00	26,00
2	Mar	06/03/2015	10:00	57,00	22,30	23,00	23,00	22,00
3	Mar	11/03/2015	17:00	49,00	26,70	27,00	27,00	26,00
4	Mar	19/03/2015	16:00	61,00	24,70	26,00	26,00	25,00
5	Mar	20/03/2015	17:20	57,00	25,90	27,00	27,00	27,00
6	Mar	25/03/2015	16:45	72,00	26,00	27,00	27,00	27,00
PROMEDIO				57,67	25,08	26,00	26,00	25,50
MÁXIMO				72,00	26,70	27,00	27,00	27,00
MÍNIMO				49,00	22,30	23,00	23,00	22,00
1	Abr	07/04/2015	10:00	70,00	24,80	25,00	25,00	25,00
2	Abr	17/04/2015	10:29	57,00	22,50	23,00	23,00	22,00
3	Abr	21-Abr	10:00	67,00	21,00	22,00	22,00	21,00
PROMEDIO				64,67	22,77	23,33	23,33	22,67
MÁXIMO				70,00	24,80	25,00	25,00	25,00
MÍNIMO				57,00	21,00	22,00	22,00	21,00
1	May	05/05/2015	09:00	51,00	23,50	23,00	23,00	22,00
2	May	21/05/2015	08:00	59,00	19,80	20,00	20,00	19,00
PROMEDIO				55,00	21,65	21,50	21,50	20,50
MÁXIMO				59,00	23,50	23,00	23,00	22,00
MÍNIMO				51,00	19,80	20,00	20,00	19,00
1	Jun	02/06/2015	08:00	61,00	17,80	19,00	19,00	18,00
2	Jun	17/06/2015	11:40	62,00	17,80	17,00	17,00	17,00
3	Jun	30/06/2015	16:40	62,00	19,00	19,00	19,00	18,00
PROMEDIO				61,67	18,20	18,33	18,33	17,67
MÁXIMO				62,00	19,00	19,00	19,00	18,00
MÍNIMO				61,00	17,80	17,00	17,00	17,00
1	Jul	14/07/2015	16:00	60,00	19,20	19,00	19,00	19,00

Tabla 32. Continúa.

N° Ev.	Mes	Fecha	Hora	Hum.Rel. (%)	T.Ab. (°C)	T.T- (°C)	T.To (°C)	T.T+ (°C)
2	Jul	30/07/2015	10:00	61,00	17,40	17,00	17,00	16,00
PROMEDIO				60,50	18,30	18,00	18,00	17,50
MÁXIMO				61,00	19,20	19,00	19,00	19,00
MÍNIMO				60,00	17,40	17,00	17,00	16,00

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Anexo 4. Cálculo del volumen de carga en el biodigestor de 32 litros

Volumen de carga (VC) = ?

Volumen de biodigestor (VB) = 32 l

Porcentaje del volumen de carga en biodigestor (PVC) = 0,80

$$VC = PVC \times VB = 0,80 \times 32 \text{ l} = 25,6 \text{ l} = 25\,600 \text{ ml}$$

Anexo 5. Cálculo del peso total de mezcla estiércol con grass en volumen de carga.

Peso total de mezcla estiércol y grass de una carga del biodigestor= X = ?

Volumen de 1 carga de mezcla estiércol y grass y agua = 950 ml

Peso de mezcla estiércol y grass en volumen de 1 carga = 89 g

Volumen total de 1 carga del biodigestor = 25 600 ml

$$25\,600 \text{ ml (89 g)}$$

$$X = \frac{25\,600 \text{ ml (89 g)}}{950 \text{ ml}} = 2\,398,32 \text{ g} = 2,40 \text{ kg}$$

$$950 \text{ ml}$$

Anexo 6. Cálculo de porcentaje de sólidos en carga de biodigestor

Peso total de la carga del biodigestor (PTC) = X = ?

Porcentaje de sólidos totales en carga de biodigestor (PS) = Y =?

Peso de sólidos totales (ST) presentes en una carga del biodigestor =
2 398,32 g

Peso de volumen de una carga de mezcla estiércol y grass y agua= 869 g

Volumen de 1 carga de mezcla estiércol y grass y agua = 950 ml

Volumen total de 1 carga del biodigestor = 25 600 ml

869 g (25 600 ml)

X = ----- = 23 417,26 g

950 ml

2 398, 32 g

Y = ----- 100 = 10,24%

23 417,26 g

Anexo 7. Evaluación de presión manométrica, volumen y coeficiente de correlación en el proceso de producción de biogás.

Tabla 33.

Datos de presión y volumen de biogás en los tratamientos T-, To y T+ según número de evaluación, fecha, lapso simple y lapso acumulado dados en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

N°Eval,	Fecha	Lapso simp, (días)	Lapso acum, (días)	Presión(cm c.a.)			Volumen (cm ³)		
				T-	To	T+	T-	To	T+
0	05/11/2012-05/11/2012	0	0	0	0	0	0	0	0
1	05/11/2012-29/11/2012	24	24	11,25	28	37,85	385	871,5	1161,5
2	29/11/2012-07/02/2013	70	94	7,5	20,5	31,5	261,5	645,25	968,25
3	07/02/2013-05/03/2013	26	120	7,5	28	28,375	259,75	877,5	872,25
4	05/03/2013-25/03/2013	20	140	7,5	27,75	28,125	152,5	946,25	855
5	25/03/2013-18/04/2013	24	164	6,125	23	27	111,25	630	881,75
6	18/04/2013-16/05/2013	28	192	5,625	25,25	27,5	120,75	652	890
7	16/05/2013-05/06/2013	20	212	6	20,25	22	101	566	638,25
8	05/06/2013-25/06/2013	20	232	5,25	13,125	29,75	95,75	402,5	641,25
9	25/06/2013-15/07/2013	20	252	6	15	31,375	210,75	490	793,75
10	15/07/2013-29/07/2013	14	266	4,125	11,25	26	103,25	261,25	678,75
11	29/07/2013-19/08/2013	21	287	5	14	28,875	111,75	468,75	635
12	19/08/2013-05/09/2013	17	304	4,375	10	25	94,5	262,5	580
13	05/09/2013-19/09/2013	14	318	4,875	10,25	28,125	121,25	337,5	538,75
14	19/09/2013-03/10/2013	14	332	0	14	29,75	0	280	587,5
15	03/10/2013-17/10/2013	14	346	0	17	29	0	480,25	670,25

Tabla 33. Continúa.

N°Eval,	Fecha	Lapso simp, (días)	Lapso acum, (días)	Presión(cm c.a.)			Volumen (cm ³)		
				T-	To	T+	T-	To	T+
16	17/10/2013-06/11/2013	20	366	0	16,25	23,625	0	509,5	449,25
17	06/11/2013-20/11/2013	14	380	0	19,125	27,125	0	453,5	591,25
18	20/11/2013-04/12/2013	14	394	0	22,25	28	0	659,25	690
19	04/12/2013-18/12/2013	14	408	0	17,5	26,375	0	547,5	590
20	18/12/2013-01/01/2014	14	422	0	13,75	23,25	0	416,25	471,25
21	01/01/2014-15/01/2014	14	436	0	17,125	27,325	0	535	607,5
22	15/01/2014-29/01/2014	14	450	0	15	27	0	443,75	690
23	29/01/2014-12/02/2014	14	464	0	14,875	28	0	543,75	543,75
24	12/02/2014-26/02/2014	14	478	0	18,375	25	0	537,5	512,5
25	26/02/2014-12/03/2014	14	492	0	18,375	21,625	0	487,5	473,75
26	12/03/2014-26/03/2014	14	506	0	17,25	24	0	432,5	555
27	26/03/2014-09/04/2014	14	520	0	19	29	0	528,75	551,25
28	09/04/2014-23/04/2014	14	534	0	13,375	19,25	0	358,75	450
29	23/04/2014-07/05/2014	14	548	0	0	25,75	0	0	668,75
30	07/05/2014-21/05/2014	14	562	0	0	22,25	0	0	427,5
31	21/05/2014-03/06/2014	13	575	0	0	20,5	0	0	785
32	03/06/2014-17/06/2014	14	589	0	0	10,75	0	0	460
33	17/06/2014-01/07/2014	14	603	0	0	18,126	0	0	460
34	01/07/2014-15/07/2014	14	617	0	0	17,25	0	0	410
35	15/07/2014-29/07/2014	14	631	0	0	15,5	0	0	437,5
36	29/07/2014-14/08/2014	16	647	0	0	26,25	0	0	703,75
37	14/08/2014-28/08/2014	14	661	0	0	10,875	0	0	401,25
38	28/08/2014-16/09/2014	19	680	0	0	16,75	0	0	311,25
39	16/09/2014-30/10/2014	14	694	0	0	27,5	0	0	495

Tabla 33. Continúa.

N°Eval,	Fecha	Lapso simp, (días)	Lapso acum, (días)	Presión(cm c.a.)			Volumen (cm ³)		
				T-	To	T+	T-	To	T+
40	30/10/2014-14/10/2014	14	708	0	0	26,75	0	0	446,25
41	14/10/2014-28/10/2014	14	722	0	0	21,75	0	0	521,25
42	28/10/2014-11/11/2014	14	736	0	0	26,5	0	0	758,75
43	11/11/2014-25/11/2014	14	750	0	0	18,25	0	0	438,75
44	25/11/2014-09/12/2014	14	764	0	0	24,75	0	0	653,75
45	09/12/2014-23/12/2014	14	778	0	0	26,5	0	0	701,25
46	23/12/2014-07/01/2015	15	793	0	0	26,25	0	0	721,25
47	07/01/2015-20/01/2015	13	806	0	0	15,5	0	0	350
48	20/01/2015-03/02/2015	14	820	0	0	21,25	0	0	462,5
49	03/02/2015-17/02/2015	14	834	0	0	22	0	0	547,5
50	17/02/2015-03/03/2015	14	848	0	0	25	0	0	720
51	03/03/2015-19/03/2015	16	864	0	0	24,75	0	0	552,5
52	19/03/2015-07/04/2015	19	883	0	0	25,75	0	0	550
53	07/04/2015-21/04/2015	14	897	0	0	17,75	0	0	425
54	21/04/2015-05/05/2015	14	911	0	0	18,25	0	0	450
55	05/05/2015-21/05/2015	16	927	0	0	14	0	0	337,5
56	21/05/2015-02/06/2015	12	939	0	0	17,875	0	0	387,5
57	02/06/2015-17/06/2015	15	954	0	0	16	0	0	350
58	17/06/2015-30/06/2015	13	967	0	0	19,25	0	0	362,5
59	30/06/2015-14/07/2015	14	981	0	0	17	0	0	387,5
60	14/07/2015-30/07/2015	16	997	0	0	18,5	0	0	400

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Tabla 34. Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación de un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento T- para la producción de biogás

Y (Presión) (cm c.a.)	Y (volumen) (cm ³)	X (tiempo) (días)
11,25	385	24
7,5	261,5	94
7,5	259,75	120
7,5	152,5	140
6,125	111,25	164
5,625	120,75	192
6	101	212
5,25	95,75	232
6	210,75	252
4,125	103,25	266
5	111,75	287
4,375	94,5	304
4,875	121,25	318

Fuente: Elaboración propia, 2013.

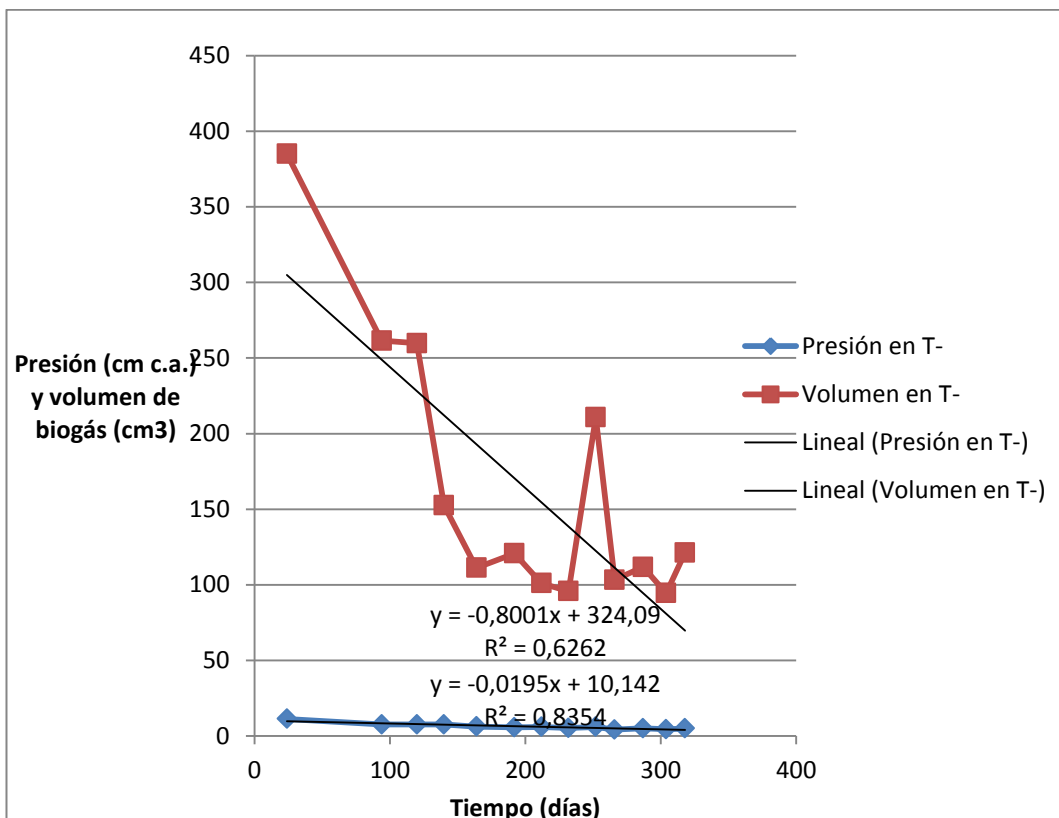


Figura 15: Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en el tratamiento T- para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en T-.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en T-	0,8987958
--	-----------

Tabla 35.

Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento To para la producción de biogás.

Y (Presión)(cm c.a.)	Y (volumen)(cm ³)	X (tiempo)(días)
28	871,5	24
20,5	645,25	94
28	877,5	120
27,75	946,25	140
23	630	164
25,25	652	192
20,25	566	212
13,125	402,5	232
15	490	252
11,25	261,25	266
14	468,75	287
10	262,5	304
10,25	337,5	318
14	280	332
17	480,25	346
16,25	509,5	366
19,125	453,5	380
22,25	659,25	394
17,5	547,5	408
13,75	416,25	422
17,125	535	436
15	443,75	450
14,875	543,75	464
18,375	537,5	478
18,375	487,5	492
17,25	432,5	506
19	528,75	520
13,375	358,75	534

Fuente: Elaboración propia, 2015.

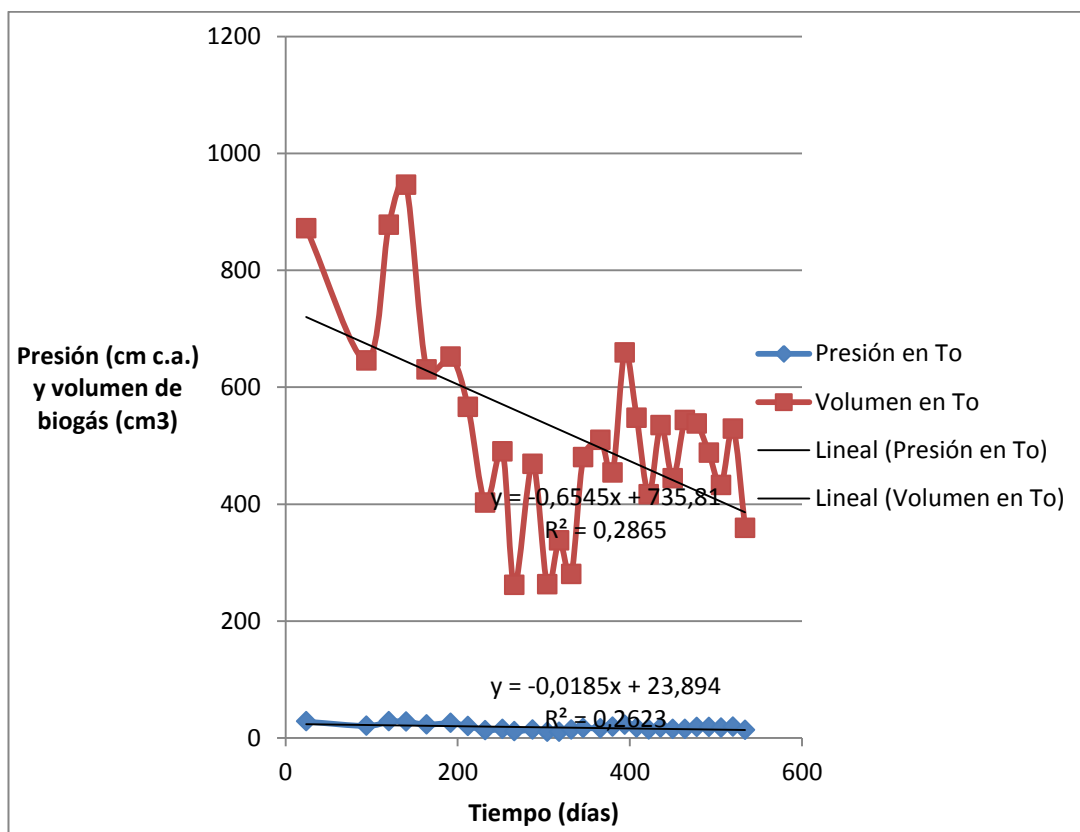


Figura 16: Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación en el proceso de biodigestión en el tratamiento To para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en To.

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en To	0,935885633
--	-------------

Tabla 36.

Datos de presión manométrica y volumen de biogás obtenidos en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en el tratamiento T+ para la producción de biogás

Y (Presión) (cm c.a.)	Y (volumen) (cm ³)	X (tiempo) (días)
37,85	1161,5	24
31,5	968,25	94
28,375	872,25	120
28,125	855	140
27	881,75	164
27,5	890	192
22	638,25	212
29,75	641,25	232
31,375	793,75	252
26	678,75	266
28,875	635	287
25	580	304
28,125	538,75	318
29,75	587,5	332
29	670,25	346
23,625	449,25	366
27,125	591,25	380
28	690	394
26,375	590	408
23,25	471,25	422
27,325	607,5	436
27	690	450
28	543,75	464
25	512,5	478
21,625	473,75	492
24	555	506

Tabla 36. Continúa.

Y (Presión) (cm c.a.)	Y (volumen) (cm³)	X (tiempo) (días)
29	551,25	520
19,25	450	534
25,75	668,75	548
22,25	427,5	562
20,5	785	575
10,75	460	589
18,126	460	603
17,25	410	617
15,5	437,5	631
26,25	703,75	647
10,875	401,25	661
16,75	311,25	680
27,5	495	694
26,75	446,25	708
21,75	521,25	722
26,5	758,75	736
18,25	438,75	750
24,75	653,75	764
26,5	701,25	778
26,25	721,25	793
15,5	350	806
21,25	462,5	820
22	547,5	834
25	720	848
24,75	552,5	864
25,75	550	883
17,75	425	897
18,25	450	911
14	337,5	927
17,875	387,5	939
16	350	954
19,25	362,5	967

Tabla 36. Continúa.

Y (Presión) (cm c.a.)	Y (volumen) (cm ³)	X (tiempo) (días)
17	387,5	981
18,5	400	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

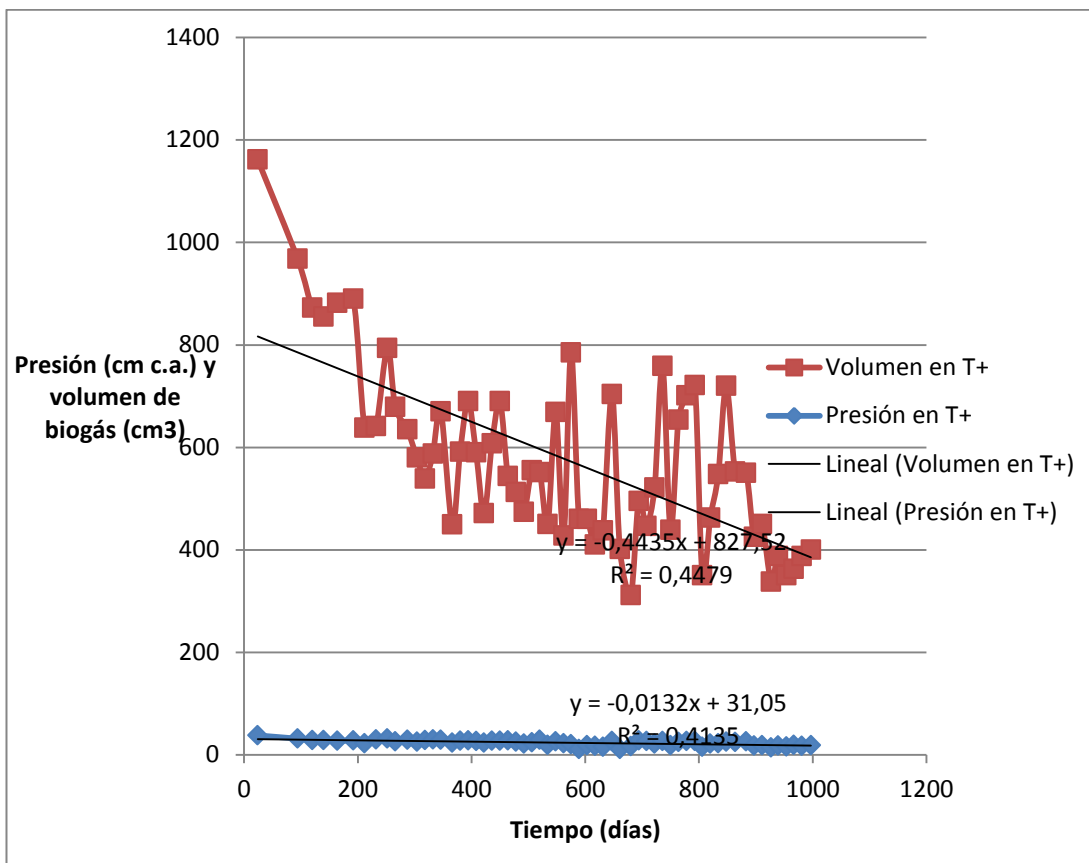


Figura 17: Curvas de datos de presión manométrica y volumen parcial de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en el tratamiento T+ para la producción de biogás. Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en el tratamiento T+.

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Coeficiente de correlación entre Presión y volumen parcial de biogás en el tratamiento T+	0,743972567
---	-------------

Tabla 37.

Datos de presión manométrica de biogás obtenida en cada evaluación en un determinado tiempo del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás.

Y (Presión) (cm c.a.)			X (tiempo) (días)
R-	Ro	R+	
11,25	28	37,85	24
7,5	20,5	31,5	94
7,5	28	28,375	120
7,5	27,75	28,125	140
6,125	23	27	164
5,625	25,25	27,5	192
6	20,25	22	212
5,25	13,125	29,75	232
6	15	31,375	252
4,125	11,25	26	266
5	14	28,875	287
4,375	10	25	304
4,875	10,25	28,125	318
	14	29,75	332
	17	29	346
	16,25	23,625	366
	19,125	27,125	380
	22,25	28	394
	17,5	26,375	408
	13,75	23,25	422
	17,125	27,325	436
	15	27	450
	14,875	28	464
	18,375	25	478
	18,375	21,625	492
	17,25	24	506

Tabla 37. Continúa.

R-	Y (Presión) (cm c.a.)		X (tiempo) (días)
	Ro	R+	
	19	29	520
	13,375	19,25	534
		25,75	548
		22,25	562
		20,5	575
		10,75	589
		18,126	603
		17,25	617
		15,5	631
		26,25	647
		10,875	661
		16,75	680
		27,5	694
		26,75	708
		21,75	722
		26,5	736
		18,25	750
		24,75	764
		26,5	778
		26,25	793
		15,5	806
		21,25	820
		22	834
		25	848
		24,75	864
		25,75	883
		17,75	897
		18,25	911
		14	927
		17,875	939
		16	954
		19,25	967

Tabla 37. Continúa.

Y (Presión) (cm c.a.)			X (tiempo) (días)
R-	Ro	R+	
		17	981
		18,5	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Tabla 38.

Coeficiente de correlación entre curvas de presión manométrica de biogás en los tratamientos T₋, T_o y T₊ del proceso de biodigestión

CURVAS DE PRESIÓN DE BIOGÁS EN TRATAMIENTOS:	COEFICIENTE DE CORRELACION
T- y To	0,7735359
T- y T+	0,72959427
To y T+	0,33368985

Fuente: Elaboración propia, 2015.

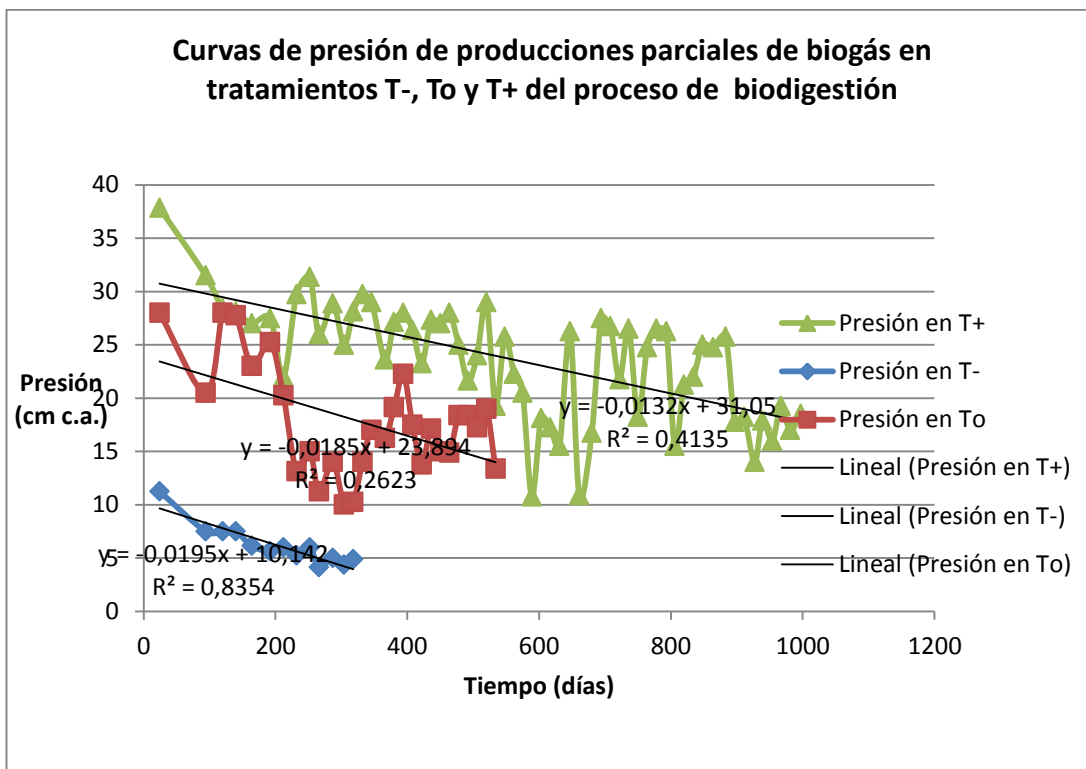


Figura 18: Curvas de datos de presión manométrica de producciones parciales de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Tabla 39.

Datos de volumen biogás obtenida en cada evaluación en un determinado tiempo en el proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás

Y (volumen) (cm ³)			X (tiempo) (días)
R-	Ro	R+	
385	871,5	1161,5	24
261,5	645,25	968,25	94
259,75	877,5	872,25	120
152,5	946,25	855	140
111,25	630	881,75	164
120,75	652	890	192
101	566	638,25	212
95,75	402,5	641,25	232
210,75	490	793,75	252
103,25	261,25	678,75	266
111,75	468,75	635	287
94,5	262,5	580	304
125,25	337,5	538,75	318
	280	587,5	332
	480,25	670,25	346
	509,5	449,25	366
	453,5	591,25	380
	659,25	690	394
	547,5	590	408
	416,25	471,25	422
	535	607,5	436
	443,75	690	450
	543,75	543,75	464
	537,5	512,5	478
	487,5	473,75	492
	432,5	555	506

Tabla 39. Continúa.

Y (volumen) (cm ³)			X (tiempo) (días)
R-	Ro	R+	
	528,75	551,25	520
	358,75	450	534
		668,75	548
		427,5	562
		785	575
		460	589
		460	603
		410	617
		437,5	631
		703,75	647
		401,25	661
		311,25	680
		495	694
		446,25	708
		521,25	722
		758,75	736
		438,75	750
		653,75	764
		701,25	778
		721,25	793
		350	806
		462,5	820
		547,5	834
		720	848
		552,5	864
		550	883
		425	897
		450	911
		337,5	927
		387,5	939
		350	954
		362,5	967

Tabla 39. Continúa.

Y (volumen) (cm ³)			X (tiempo) (días)
R-	Ro	R+	
		387,5	981
		400	997

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Tabla 40.

Coeficiente de correlación de curvas de volumen parciales de biogás de los tratamientos T-, To y T+ en el proceso de biodigestión para la producción de biogás

CURVAS DE VOLUMEN PARCIALES DE BIOGÁS EN TRATAMIENTOS:	COEFICIENTE DE CORRELACION
T- y To	0,62883638
T- y T+	0,81310817
To y T+	0,68376831

Fuente: Elaboración propia, 2015.

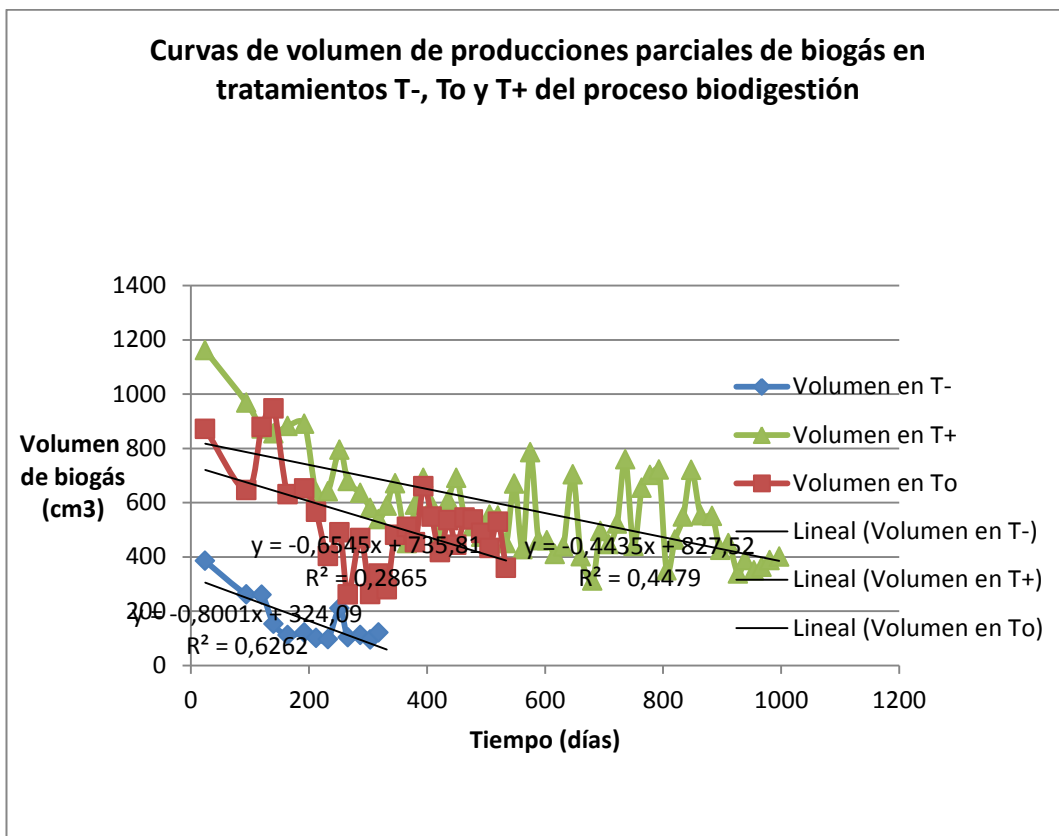


Figura 19: Curvas de datos de volumen parciales de biogás versus el tiempo de evaluación del proceso de biodigestión en los tratamientos T-, To y T+ para la producción de biogás

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Anexo 8. Figuras de diferentes etapas del proceso de biodigestión para la producción de biogás.



Figura 20: Corral de crianza de cuyes de donde se obtuvo el substrato estiércol de cuy.



Figura 21: Césped de jardín de donde se obtuvo el grass.



Figura 22: Substrato grama americana seca amontonada después de haber sido expuesta al sol



Figura 23: Fermentadores discontinuos cilíndricos con sus respectivos tamizadores con los que se obtendrían las longitudes del substrato que en ellos fermentarían.



Figura 24: Vista superior del interior del fermentador discontinuo del substrato de 0,2 cm



Figura 25: Vista superior del interior del fermentador discontinuo para el substrato de 0,4 cm



Figura 26: Vista superior del interior del fermentador discontinuo para el substrato de 0.6 cm



Figura 27: Biodigestores listos para ser cargados y funcionar



Figura 28: Componentes del biodigestor: cilindro, cincho y tapa



Figura 29: Cilindro del biodigestor con un caño en su parte inferior lateral para toma de muestra.



Figura 30: Biodigestor sin tapa vista desde arriba



Figura 31: Cincho del biodigestor para el ajuste hermético



Figura 32: Tapa del biodigestor en su parte externa con el termómetro y la llave de paso de descarga de biogás en el instalado



Figura 33: Tapa del biodigestor en su parte interna con el termómetro y la llave de paso de descarga de biogás en el instalado



Figura 34: Biodigestores contruidos para la experimentación



Figura 35: Grass, procedente del césped cortado, reducido a un tamaño más pequeño con ayuda de tijera podadora



Figura 36: Grass reducido en tamaño que es colocado en tamizador de 0.6



Figura 37: Grass reducido en tamaño que es tamizado en tamizador de 0.6 cm



Figura 38: Grass no tamizado en el tamizador de 0,6 cm es colocado en un primer montículo.



Figura 39: Grass tamizado en tamizador de 0,6 cm colocado en tamizador de 0,4 cm



Figura 40: Grass tamizado en tamizador de 0,6 cm tamizado en tamizador de 0,4 cm



Figura 41: Grass no tamizada de 0,4 cm colocado en un segundo montículo que constituyó el grass con longitud de 0.6 cm



Figura 42: Grass tamizado en tamizador de 0,4 cm colocado en tamizador de 0,2 cm



Figura 43: Grass tamizado en tamizador de 0,4 cm tamizado en tamizador de 0,2 cm dando origen al tercer montículo que constituyó el grass con longitud de 0,2 cm.



Figura 44: Grass no tamizado en tamizador de 0,4 cm colocado en un cuarto montículo que constituyó el grass con longitud de 0,4 cm.



Figura 45: Grass de 0,6 cm colocado en bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 46: Grass de 0,4 cm colocado en bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 47: Grass de 0,2 cm que es colocado en una bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 48: Grass de 0,2; 0,4 y 0,6 cm, de izquierda a derecha, con sus respectivos tamizadores listos para ser utilizado en la carga para la prefermentación.



Figura 49: Estiércol de cuy seco procedente de un corral de cuyes.



Figura 50: Estiércol de cuy no tamizado con tamizador de 0,6 cm que es colocado en un primer montículo



Figura 51: Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm y que es colocado en un segundo montículo.



Figura 52: Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm y que es colocado en tamizador de 0,4 cm.



Figura 53: Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,6 cm que es tamizado en tamizador de 0,4 cm originando un tercer montículo.



Figura 54: Estiércol de cuy no tamizado en tamizador de 0,4 cm y que es colocado en un cuarto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0,6 cm.



Figura 55: Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,4 cm que es colocado en tamizador de 0,2 cm.



Figura 56: Estiércol de cuy tamizado con tamizador de 0,4 cm que es tamizado en tamizador de 0,2 cm originando un quinto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0,2 cm.



Figura 57: Estiércol de cuy no tamizado en tamizador de 0,2 cm es colocado en un sexto montículo que constituyó el estiércol con longitud de 0.4 cm.



Figura 58: Estiércol de cuy con longitud de 0,6 cm es colocado en bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 59: Estiércol de cuy con longitud de 0,4 cm colocado en bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 60: Estiércol de cuy con longitud de 0,2 cm colocado en bolsa de polietileno de primer uso.



Figura 61: Estiércol de cuy con longitud de 0,2; 0,4 y 0,6 cm, de izquierda a derecho, listo para ser utilizado en la carga para la fermentación.



Figura 62: Balde con capacidad de 5 litros utilizado para medir los volúmenes tanto de estiércol como de grass necesarios hasta completar la carga en el fermentador cilíndrico como así mismo en el biodigestor.



Figura 63: Fermentadores cilíndricos discontinuos listos para ser utilizados en la prefermentación.



Figura 64: Fermentadores cilíndricos discontinuos cargados con el sustrato para la prefermentación.



Figura 65: Biogás conducido desde el biodigestor al mechero Bunsen, listo para ser quemado.



Figura 66: Biogás proveniente del biodigestor que está siendo prendido en el mechero Bunsen.



Figura 67: Biogás proveniente del biodigestor encendido en el mechero Bunsen originando una llama de buena calidad.

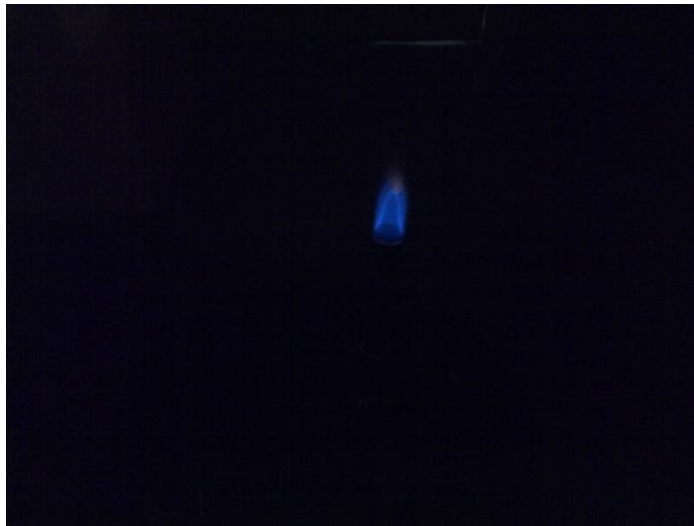


Figura 68: Llama azul característica del biogás obtenido de buena calidad dentro de un ambiente totalmente oscuro.