

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**EFEECTO DE LAS HECES CANINAS SOBRE LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

FABIÁN IGNACIO ABARZA VILLALOBOS

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**EFFECTO DE LAS HECES CANINAS SOBRE LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

DOG WASTE IMPACT IN BIOGAS PRODUCTION

FABIÁN IGNACIO ABARZA VILLALOBOS

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

**EFFECTO DE LAS HECES CANINAS SOBRE LA PRODUCCIÓN
DE BIOGÁS**

**Memoria para optar al Título Profesional de
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables**

FABIÁN IGNACIO ABARZA VILLALOBOS

Profesora Guía	Calificación
María Teresa Varnero M. Químico Farmacéutico	6,5
Profesores Evaluadores	
Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo	6,5
Marcos Mora G. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,5

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que aportaron para que este trabajo se haya realizado, y de paso, me ayudaron a crecer como persona

Agradezco en especial a todo el equipo de AGRIMED, por su paciencia y amabilidad

Agradezco a la Profesora María Teresa Varnero que me apoyó y me guió en este largo proceso, con su paciencia, conocimiento y cariño

Agradezco a Karina Galleguillos y Javiera Suárez, por haber estado en los momentos críticos de mi formación profesional, ayudarme a montar mis ensayos y medirlos

Agradezco a Javier Franchi, por participar en esta tesis y hacer más liviana la tarea de medir y pensar las aplicaciones del biogás

Agradezco a mis padres, Claudia y Mario, por apoyarme e incentivar me a ser profesional y terminar mis estudios

Agradezco a Daniela por su apoyo y comprensión

Le dedico este trabajo a todos aquellos que puedan usarla para hacer un aporte para un mundo mejor

Totalmente GRACIAS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE CUADROS	5
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	7
GLOSARIO DE SIGLAS	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	15
LA POBLACIÓN CANINA Y SUS IMPACTOS	15
EL BIOGÁS COMO APORTE A LA SOLUCIÓN	16
<i>Etapas Bioquímicas del proceso.....</i>	<i>16</i>
<i>Variables significativas durante el proceso</i>	<i>17</i>
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
MATERIALES Y MÉTODO.....	21
MATERIALES	21
UBICACIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES	21
MÉTODO	24
<i>Poblaciones de Estudio</i>	<i>24</i>
<i>Tratamientos.....</i>	<i>24</i>
<i>Descripción de las Materias Primas</i>	<i>24</i>
Análisis de laboratorio de las materias primas	25
<i>Diseño de los ensayos.....</i>	<i>27</i>
<i>Preparación de las unidades experimentales</i>	<i>28</i>
<i>Infraestructura para el control.....</i>	<i>28</i>
Control de la temperatura	28
Control de contaminación de producciones.....	29
Control del vapor de agua	29
Control del sulfuro de hidrógeno.....	29
Control del volumen de biogás.....	30
Control de inflamabilidad.....	30
Control de fugas en los tarros.....	30
<i>Registro de variables para análisis</i>	<i>30</i>
<i>Repeticiones no consideradas</i>	<i>31</i>
<i>Estimación de la Producción de Biogás.....</i>	<i>32</i>
Ecuación Luna-delRisco Modificada	32
<i>Análisis de la producción de biogás.....</i>	<i>33</i>
<i>Estimación del TRH y Volumen de Biogás a partir de los valores experimentales.....</i>	<i>33</i>

<i>Análisis del efluente y digestato</i>	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
RESULTADOS	37
<i>Descripción del biogás obtenido</i>	37
<i>Estimación del potencial de biogás</i>	41
Estimación mediante el modelo doble exponencial.....	41
<i>Análisis estadístico del biogás</i>	42
Período (en días) en que se inicia de la fase metanogénica	42
Volumen Registrado (97 días) de biogás (presenta capacidad combustible).....	43
Volumen Potencial de Biogás (acumulado cuando tasa es 0,1 L/día)	44
Volumen Potencial de Biogás al TRH estimado	45
Tiempo de Retención Hidráulica estimado en función del modelo (TRH estimado)	46
Rendimiento de Biogás al TRH estimado	47
Rendimiento de Metano al TRH estimado	48
Composición del biogás	49
<i>Contraste del biogás obtenido con la Norma de Biometano</i>	51
<i>Comparación con bienes sustitutos</i>	51
<i>Simulación de requerimientos según demandas de energía</i>	52
Escenario 1	53
Escenario 2	53
Escenario 3	53
<i>Descripción del efluente y digestato obtenido</i>	57
<i>Análisis estadístico del digestato obtenido</i>	58
Porcentaje de Materia Orgánica	58
Estabilidad Biológica	59
Potencial de Hidrógeno	59
Conductividad Eléctrica	60
Fitotoxicidad	60
<i>Contraste del digestato obtenido con Normas y bienes sustitutos</i>	61
CONCLUSIÓN	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXO	67
<i>Registro de la producción diaria de los biodigestores</i>	67
<i>Ajuste de curva para los datos registrados, usando el modelo Luna-delRisco modificado</i>	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DE LA FORMACIÓN DE METANO. FUENTE: AL SEADI ET AL., 2008.....	17
FIGURA 2. A. SANTIAGO DE CHILE. B. CAMPUS ANTUMAPU DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE (LÍNEA AZUL).C. UBICACIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES (LÍNEA AMARILLA: AGRIMED; LÍNEA BLANCA: PLANTA DE BIOGÁS).....	22
FIGURA 3. EL RECINTO: PLANTA DE BIOGÁS.	23
FIGURA 4. UNIDADES EXPERIMENTALES EN FUNCIONAMIENTO.....	23
FIGURA 5. PRESENTACIÓN DE PERROS QUE CONTRIBUYERON CON SUS HECES.	24
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES EN LA PISCINA. LÍNEAS ROJAS: RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.....	29
FIGURA 7. ESQUEMA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES.	30
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO PROMEDIO DIARIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y EL EFECTO DE LA TEMPERATURA CERCANA A 10 °C.....	39
FIGURA 9. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PROMEDIO ACUMULADA POR TRATAMIENTO Y EL EFECTO DE TEMPERATURA CERCANA A 10 °C.....	39
FIGURA 10. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PROMEDIO ACUMULADA (TRATAMIENTOS 100% Y 75% HC).....	40
FIGURA 11. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PROMEDIO ACUMULADA (TRATAMIENTOS 25% Y 0% HC).....	40
FIGURA 12. COMPARACIÓN DE LOS PROMEDIOS DE LOS PERÍODOS, MEDIANTE LA PRUEBA DE TUKEY.	42
FIGURA 13. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS, SEGÚN TRATAMIENTO.	43
FIGURA 14. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE LA PRODUCCIÓN TOTAL DE BIOGÁS COMBUSTIBLE.	44
FIGURA 15. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS AL TRH ESTIMADO.....	45
FIGURA 16. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DEL TRH ESTIMADO.....	46
FIGURA 17. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DEL RENDIMIENTO DE BIOGÁS.....	47
FIGURA 18. COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DEL RENDIMIENTO DE METANO.....	48
FIGURA 19. MATERIA ORGÁNICA DEL DIGESTATO SEGÚN TRATAMIENTO.....	58
FIGURA 20. DESPRENDIMIENTO DE CARBONO SEGÚN TRATAMIENTO, MEDIANTE LA PRUEBA DE TUKEY.	59
FIGURA 21. PROMEDIOS DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO DEL EFLUENTE SEGÚN TRATAMIENTO.....	59
FIGURA 22. PROMEDIO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA SEGÚN TRATAMIENTO.....	60
FIGURA 23. PROMEDIOS DE LOS INDICADORES DE FITOTOXICIDAD DEL EFLUENTE SEGÚN TRATAMIENTO.....	60

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS ^{1/}	16
CUADRO 2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS	26
CUADRO 3. PROPORCIÓN DE HECES CANINAS Y GUANO BOVINO EN LOS BIODIGESTORES.....	28
CUADRO 4. VARIABLES REGISTRADAS Y FRECUENCIA DE REGISTRO.....	31
CUADRO 5. DESCRIPCIÓN DEL BIOGÁS OBTENIDO EN CADA TRATAMIENTO.	37
CUADRO 6. RESUMEN DEL AJUSTE DE CURVA PARA EL MODELO LUNA-DELRISCO MODIFICADO.	41
CUADRO 7. RESUMEN DE ESTIMACIONES DEL MODELO DOBLE EXPONENCIAL.....	41
CUADRO 8. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PERÍODOS (DÍAS)	42
CUADRO 9. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA VOLUMEN DE BIOGÁS	43
CUADRO 10. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL VOLUMEN POTENCIAL DE BIOGÁS	44
CUADRO 11. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL VOLUMEN POTENCIAL DE BIOGÁS AL TRH ESTIMADO.....	45
CUADRO 12. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA VALORES PROMEDIO DE TRH ESTIMADO	46
CUADRO 13. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO DE BIOGÁS POR KG DE MO AL TRH ESTIMADO ..	47
CUADRO 14. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO DE METANO POR KG DE MO AL TRH ESTIMADO	48
CUADRO 15. PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE METANO (CH ₄).....	49
CUADRO 16. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE METANO (CH ₄).....	49
CUADRO 17. PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	49
CUADRO 18. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	49
CUADRO 19. PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE OXÍGENO (O ₂)	49
CUADRO 20. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE OXÍGENO (O ₂).....	49
CUADRO 21. PROMEDIO DE CONTENIDO (PPM) DE SULFURO DE HIDRÓGENO (H ₂ S).....	50
CUADRO 22. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CONTENIDO (PPM) DE SULFURO DE HIDRÓGENO (H ₂ S).....	50
CUADRO 23. PROMEDIO DE CONTENIDO (PPM) DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	50
CUADRO 24. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CONTENIDO (PPM) DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	50
CUADRO 25. CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS ACUMULADO AL TRH ESTIMADO SEGÚN MODELO.....	51
CUADRO 26. COMPARACIÓN DEL BIOGÁS OBTENIDO AL TRH ESTIMADO CON BIENES SUSTITUTOS	51
CUADRO 27. CONSUMOS ENERGÉTICOS DE DISTINTOS ARTEFACTOS.....	52
CUADRO 28. ESCENARIO 1: INVERNADERO.....	54
CUADRO 29. ESCENARIO 2: CASA	55
CUADRO 30. ESCENARIO 3: ILUMINACIÓN	56
CUADRO 31. PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL DIGESTATO, PARTE SÓLIDA.....	57
CUADRO 32. PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL EFLUENTE, PARTE LÍQUIDA.	57
CUADRO 33. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA	58
CUADRO 34. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DESPRENDIMIENTO DE CARBONO	59

ÍNDICE DE FÓRMULAS

FÓRMULA 1. RELACIÓN DE TRH Y VELOCIDAD DE CARGA.....	18
FÓRMULA 2. CÁLCULO RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO	25
FÓRMULA 3. RELACIÓN C/N CON DISTINTOS MATERIALES	25
FÓRMULA 4. CÁLCULO DEL CARBONO ORGÁNICO.....	26
FÓRMULA 5. ECUACIÓN LUNA-DEL RISCO MODIFICADA.....	32
FÓRMULA 6. TRH PARA DISTINTAS CANTIDADES DE MATERIA PRIMA	34
FÓRMULA 7. EXTRAPOLACIÓN DEL VOLUMEN DE BIOGÁS.....	34
FÓRMULA 8. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE GERMINACIÓN.....	35

GLOSARIO DE SIGLAS

%G	: Porcentaje de Germinación
%H ₂ O	: Porcentaje de Contenido de Agua
AGRIMED	: Centro de Estudios de Agricultura y Medio Ambiente
C/N	: Relación Carbono Nitrógeno
CE	: Conductividad Eléctrica
Corg	: Carbono Orgánico
DFPA	: Departamento de Fomento de la Producción Animal, de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile
DM	: Dry Matter (en español, materia seca)
EPA	: Estudiantes por la Protección Animal (agrupación estudiantil)
ERNCC	: Energías Renovables No Convencionales
GB	: Guano Bovino
GL	: Grados de Libertad
HC	: Heces Caninas
IG	: Índice de Germinación
LRO	: Laboratorio de Reciclaje Orgánico, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile
MDF	: Medium Density Fiberboard (en español, Madera Vulcanizada de Densidad Media)
MO	: Materia Orgánica
MOL	: Materia Orgánica Lábil
MOR	: Materia Orgánica Resistente
MS	: Materia Seca
Norg	: Nitrógeno Orgánico
pH	: Potencial de Hidrógeno
R1	: Repetición número 1
R2	: Repetición número 2
RMSD	: Root Mean Square Deviation (en español, la raíz del cuadrado medio del error)
ST	: Sólidos Totales
TRH	: Tiempo de Retención Hidráulico
VGFA	: Volumen de Gas de la Fase de Adaptación

RESUMEN

La población canina es parte de diversos problemas en los espacios antropizados, tales como destrozos de bolsas de basura y la contaminación de sus heces en parques y calles. Los lugares de concentración de perros (hoteles caninos, criaderos de perros y albergues caninos) producen grandes cantidades de heces caninas y, actualmente, la depositan junto con la basura común.

La digestión anaeróbica permite obtener energía a partir de diversos residuos orgánicos y obtener un material semi estabilizado y semi sanitizado el cual puede utilizarse como acondicionador de suelo, luego de terminar su proceso de estabilización. Esto significa que existe un potencial en las heces caninas que podría ser usado en los lugares de concentración canina para satisfacer sus necesidades energéticas, realizar un tratamiento de sus residuos orgánicos y entregarle un material que puede ser usado como enmienda orgánica. Sin embargo, no existe información nacional de cuál es este potencial o si hay una mezcla óptima entre guano bovino y heces caninas.

Se evaluó el efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás a partir de distintas mezclas de heces caninas y guano bovino (100%, 75%, 25% y 0% de heces caninas) mediante biodigestores tipo Batch, con un 10% de ST, sumergidos en una piscina con agua a 30 °C, durante 97 días. Se estimó la producción total de biogás a partir del registro del volumen acumulado usando un modelo cinético.

El análisis de varianza no permite aseverar que exista una diferencia estadísticamente significativa entre la producción de biogás según las distintas proporciones de heces caninas en la mezcla. Pero esto puede ser debido a que el tamaño muestral ($n=2$) y la desviación estándar dentro de cada tratamiento no permite representar adecuadamente cada tratamiento. Sin embargo, se observa una pequeña tendencia que indica que las heces caninas poseen un mayor potencial de biogás que el guano bovino. Además, el análisis de varianza de los días necesarios para producir biogás combustible indica que las heces caninas demoran más días que el guano bovino en, aproximadamente, 10 días más.

PALABRAS CLAVE: Excretas de perro, Digestión anaeróbica, Residuos, Energía.

ABSTRACT

The anaerobic digestion allows obtaining energy from organic waste, such as dog feces, and get a semi sanitized and stabilized material which can be used as soil conditioner after finishing the process of stabilization. However, there is no national information about its potential or if there is an optimal mix of cattle manure and dog faeces.

An impact assessment was conducted about the effect of dog waste on the production of biogas using different mixtures of dog waste and cattle manure (100%, 75%, 25% and 0% of dog waste) by batch type digesters, with 10% of DM, in a pool with water at 30 °C for 97 days. Total biogas production was estimated from the cumulative volume record using a kinetic model.

The analysis of variance shows that there isn't difference in the production of biogas according to the different proportions of dog dung in the mixture. However, data shows a small trend that dog waste has greater biogas potential than cattle manure. In addition, analysis of variance of days required to produce flammable biogas indicates that dog waste takes more days than cattle manure in about 10 days.

KEYWORDS: Dog dung, Anaerobic digestion, Waste, Energy.

INTRODUCCIÓN

La población canina y sus impactos

En Chile, los perros viven en lugares cercanos a las personas por diversas razones: Porque son mascotas de ellas, son animales de comercio o porque se alimentan de sus residuos o su ganado. La situación en Santiago es un buen ejemplo de las consecuencias que genera la irresponsabilidad de las personas con estos animales. En 34 comunas de la Región Metropolitana (Gran Santiago)*, se estimó que la cantidad de perros presentes en la calle era de aproximadamente 214.933 perros, de los cuales 177.513 (82,6%) circulaban libres y pertenecían a las categorías de Callejero, Vagabundo o del Vecindario (Ibarra, et al., 2006). Esta población canina sin control ni personas que se hagan cargo, genera situaciones de riesgo para las personas y sus bienes como:

- Accidentes de tránsito.
- Focos de infección de enfermedades zoonóticas.
- Ataques a personas y/o animales.
- Destrozos de basura a su alcance y dispersión.
- Ruidos molestos en períodos de celo.
- Conflictos entre vecinos.
- Deposición de residuos orgánicos como, cadáveres caninos y heces, en zonas no adecuadas (calles, veredas y plazas).

Si se considera que cada perro que circula deposita en promedio 0,2 kg de heces diarias, entonces se estima que la generación de excremento canino diariamente es de 35.503 kg, solamente en las calles del Gran Santiago, lo cual se multiplicará con un aumento de la población de perros libres sin control reproductivo. Considerando que los perros con dueño están en mejor salud y alimentación que los de la calle, son los que presentan la mayor probabilidad de aparearse con los individuos de la calle y el aumento de la población canina se deberá, en gran parte, a estos perros que son liberados por sus dueños y pasean sin supervisión. Conectando esto último, con la tendencia creciente de la población canina con dueño registrada por Ibarra et al. (2003), se espera que la población canina en las calles también aumente. Esta situación podría repetirse en todas las ciudades de Chile si no se toman medidas para controlar la población canina en las zonas urbanas y sus alrededores, ya sean perros con o sin dueños.

* Comunas: Santiago, Independencia, Conchalí, Huechuraba, Recoleta, Providencia, Vitacura, Lo Barnechea, Las Condes, Ñuñoa, La Reina, Macul, Peñalolén, La Florida, San Joaquín, La Granja, La Pintana, San Ramón, San Miguel, La Cisterna, El Bosque, Pedro A. Cerda, Lo Espejo, Estación Central, Cerrillos, Maipú, Quinta Normal, Lo Prado, Pudahuel, Cerro Navia, Renca, Quilicura, Puente Alto, San Bernardo.

Gran parte del excremento de las ciudades es humano y se gestiona ampliamente, sin embargo, los excrementos animales no son gestionados adecuadamente y están presentes en los espacios públicos (como calles y plazas), lugares de trabajo (como industrias, recintos con guardia canina, perreras, refugios y criaderos) y casas particulares. Aunque, en algunos de los lugares mencionados anteriormente sí se gestionan las heces de animales, puede incorporarse tecnología que mejore el sistema de gestión y le brinde un valor agregado.

Casos importantes son los lugares de concentración de perros, como las perreras, hospitales veterinarios, recintos con guardia canina y criaderos de perros. Debido a que las heces caninas, se encuentran en gran cantidad y no tienen utilidad inmediata, se pueden acumular o depositar de forma inadecuada, lo que puede generar focos de malos olores e infecciones, y propiciar el desarrollo de vectores, con los consecuentes riesgos para el establecimiento. Es, en estos lugares de concentración de perros, donde se pueden implementar –más fácilmente que en espacios públicos– mejoras o innovaciones para la gestión de las heces caninas.

El biogás como aporte a la solución

La composición del biogás proveniente de sectores agrícolas se puede resumir como una mezcla de gases compuesta, principalmente, por:

Cuadro 1. Composición del Biogás^{1/}.

Gas	Concentración
Metano (CH ₄)	45-75%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-55%
Oxígeno (O ₂)	0.01-2 %
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	10-30000 mg/Nm ³
Nitrógeno Gaseoso (N ₂)	0.01-5 %
Monóxido de Carbono (CO)	Menor a 0.2 %

^{1/}(Deublein y Steinhauser, 2008)

Estas proporciones varían, según la materia prima (Deublein and Steinhauser, 2008), las condiciones ambientales y los microorganismos presentes en la mezcla, entre otros. El poder calorífico del biogás varía entre 5,0-7,5 kWh/Nm³, dependiendo de la concentración de Metano (Deublein and Steinhauser, 2008).

Etapas Bioquímicas del proceso

El proceso de formación de biogás presenta varias etapas simultáneas, las cuales pueden simplificarse en 4: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. En cada etapa interviene un grupo determinado de microorganismos que generan el sustrato para el siguiente grupo de la cadena de degradación (Al Seadi, et al., 2008).

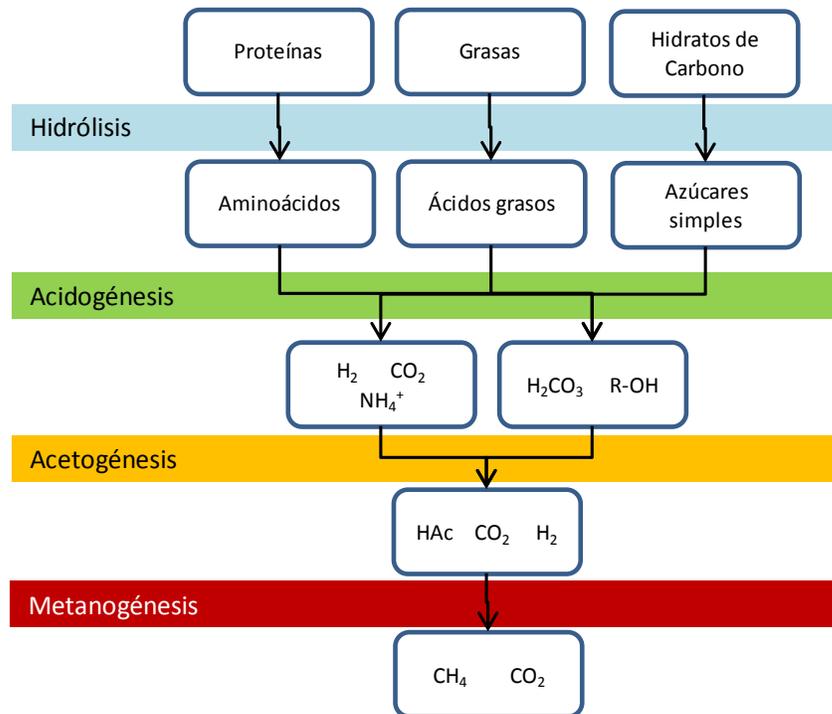


Figura 1. Esquema general de la Formación de Metano. Fuente: Al Seadi et al., 2008

Variables significativas durante el proceso

La producción de biogás requiere de un material orgánico y de un inóculo con los microorganismos necesarios para degradarlo y, finalmente, producir metano. El guano bovino presenta estas características, con un importante contenido de microorganismos metanogénicos, por lo tanto, para la producción de biogás se utiliza, comúnmente, una mezcla de guano bovino y agua. Sin embargo, cualquier sustancia orgánica podría servir para producir biogás, incorporando un inóculo adecuado.

Los factores que deben monitorearse durante el proceso de digestión anaeróbica pueden resumirse como:

- Condición de anaerobiosis: Procurar ausencia total de Oxígeno
- Temperatura: Los microorganismos son sensibles a las variaciones de temperatura, por lo tanto, se debe procurar mantener la temperatura dentro de algún rango biológico: psicrófilo, mesófilo o termófilo
- Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): Este parámetro está relacionado, principalmente, con la temperatura, el tipo de material y el tipo de biodigestor. En el caso de biodigestores de tipo discontinuo (Batch), el TRH es el tiempo transcurrido entre su carga y su descarga, mientras que para los de tipo continuo, se determina según la Fórmula 1 (FAO, 2011):

$$\frac{\text{Volumen del digestor continuo (m}^3\text{)}}{\text{TRH (días)}} = \text{Volumen de carga diaria} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

*Fórmula 1.
Relación de TRH y
Velocidad de carga*

- Potencial de Hidrógeno (pH): El pH necesario para el proceso puede encontrarse entre 5,5 y 8,5 (Al Seadi, et al., 2008) en el cual su óptimo estaría entre 7,0 y 8,0 (Al Seadi, et al., 2008). Según Deublein and Steinhauser (2008), durante la fase Hidrolítica y Acidogénica, el pH óptimo estaría entre 5,2 y 6,3, pero en la etapa de formación de metano el pH óptimo estaría entre 6,7 y 7,5.
- Contenido nutricional: Descrito principalmente, como la relación Carbono y Nitrógeno (C/N). En algunos estudios se consideran como adecuada una relación C/N de 16 (Corace, et al., 2006), mientras otros consideran que 30 es la relación para un ritmo óptimo de producción (Martina, et al., 2007; FAO, 1992).
- Inhibidores del metabolismo microbiano: Algunos compuestos inhibidores de la actividad microbiana son: el Oxígeno (O₂) en concentraciones mayores al 7% (vol/vol) (Deublein and Steinhauser, 2008); el Amoníaco (NH₃) por sobre los 1.500 mg/L (FAO, 2011); Ácidos Volátiles en concentraciones desde 2.000 ppm; Metales Pesados; los Antibióticos; Pesticidas; Desinfectantes o Limpiadores como el Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂), el Cloro (Cl₂), Cianuro de Hidrógeno (HCN).

Las heces caninas se pueden observar como una oportunidad para obtener energía y un digestato que puede usarse como acondicionador de suelos, con valor agregado para la sociedad. La generación de energía puede contribuir a la reducción de costos energéticos en lugares de albergue de perros, o en comunidades organizadas que decidan aprovechar este recurso. Sin embargo, como las heces deben ser manipuladas por personas, deben provenir de animales sanos para evitar infecciones. En el caso de comunidades que deseen usar las heces caninas, deberán mejorar las condiciones de salud de los perros que tengan a cargo como comunidad o particularmente, lo cual sería un avance en las prácticas de tenencia responsable de mascotas. Por otro lado, el biogás generado podría ser purificado y enriquecido para ser comercializado como un sustituto del Gas Natural, este biogás procesado se le llama Biometano y sus características para Chile se describen en la Norma Chilena NCh 3213 (INN, 2010).

Para la producción de biogás se usa comúnmente el guano bovino y agua, evitándose incorporar heces caninas a la mezcla de guano bovino y agua, porque no se conocen sus efectos sobre la producción de biogás (mucho menos se conoce la mezcla óptima que favorezca la producción) y no existe confianza acerca de la inocuidad de los patógenos presentes en las heces caninas, sobre la producción de biogás.

La evaluación de la generación de biogás se puede realizar mediante extrapolaciones sobre la producción de pequeños dispositivos continuos o discontinuos (tipo Batch), o estimando la producción, mediante fórmulas químicas usando la composición química de los residuos usados, como el trabajo de Espinosa et al. (2006).

Respecto del uso de heces caninas para producir biogás, existen pocas experiencias que incursionan con esta materia prima:

- En Cambridge, MA (EE.UU.) existe una experiencia de uso de las heces caninas para la producción de biogás llamada Park Spark Project[†]. Con esta experiencia, se vincula a la comunidad que pasea con su perro en el parque para que deposite las heces de su mascota en un estanque (similar a una fosa séptica) donde luego se produce biogás. Sin embargo, la experiencia se ha publicado por noticias y no en revistas científicas, por lo tanto, no informan acerca de sus resultados técnicos.
- En Argentina, Corace et al. (2010) han realizado investigaciones en este sentido, mezclando residuos madereros, de cocina, de huerta y heces caninas. Sus resultados indican que por cada kilogramo de heces caninas se obtienen 55 gramos de biogás y se pueden obtener resultados más satisfactorios mejorando las condiciones del sustrato.
- En Nigeria (país africano con clima tropical 6,9°N, 7,4°E, 445 m.s.n.m.), Okoroigwe et al., (2010) realizó ensayos, donde evaluó la producción de biogás a partir de tres mezclas: 1) heces caninas y pasto; 2) heces caninas con guano bovino y; 3) heces caninas sin mezclar. Sus conclusiones señalan que las heces caninas no son un inhibidor para el proceso de producción de biogás.

En este contexto, el presente estudio tiene como finalidad evaluar empíricamente el efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás usando una mezcla de heces caninas y guano bovino en diferentes proporciones, debido a que no existe una estimación empírica ni teórica del potencial de producción de biogás a partir de estos residuos, en Chile.

Objetivo General

Evaluar el efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás, usando heces caninas y guano bovino, mediante dispositivos tipo Batch.

Objetivos Específicos

Describir el efecto de distintas proporciones de heces caninas y guano bovino sobre la producción de biogás.

Diagnosticar si existe una proporción en la mezcla de heces caninas y guano bovino que supere la producción de biogás usando solamente guano bovino.

[†] La descripción de este proyecto está en <http://parksparkproject.com/home.html>.

MATERIALES Y MÉTODO

La evaluación empírica de la mezcla del sustrato (heces caninas y guano bovino) se realizó a escala piloto, debido a que fue la escala utilizada por diversas referencias (Okoroigwe et al., 2010; Corace et al., 2010; Abarza y Varnero, 2011).

Materiales

Los materiales que se utilizaron fueron:

- Agua potable.
- Biomasa: heces caninas (HC) y guano bovino (GB).
- 12 tarros metálicos de 63,5 Litros con tapa.
- 1 Piscina redonda de, aproximadamente, 0,9 m³ (1,5 m diámetro y 0,5 m de profundidad).
- 12 Manómetros.
- 1 Termostato eléctrico simple de panel montable JUMO® (TYP EM-1, 16 Amperes).
- 3 Resistencias.
- 1 Contactor monofásico Schneider®, 18 Amperes.
- 1 Termómetro de mercurio graduado en °C.
- 1 Trampa de vapor de agua.
- 1 Trampa de sulfuro de hidrógeno (H₂S).
- 1 Contador de gases, sensibilidad mínima de 0,02 m³/h y máxima de 2,5 m³/h.
- 1 Analizador de gases Dragüer® X-am 7000, que registra CH₄(%), CO₂(%), O₂(%), H₂S (ppm) y CO (ppm).
- 1 Mechero Bunsen.
- 1 Cronómetro.

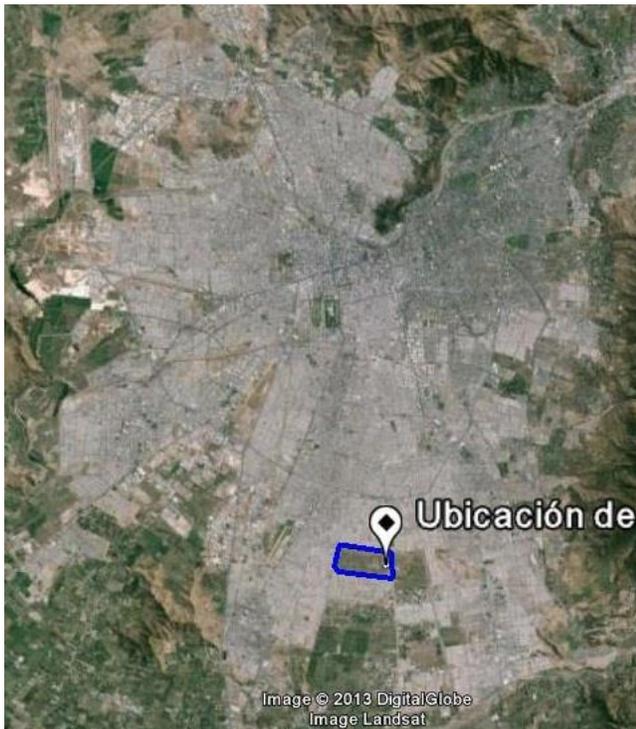
Ubicación de las unidades experimentales

El presente estudio se llevó a cabo en el Campus Antumapu de la Universidad de Chile, lugar donde se encuentran los proveedores de materias primas. El de guano bovino se obtuvo de la Granja Educativa de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias, mientras que las heces caninas, se recolectaron desde los caniles pertenecientes a Estudiantes por la Protección Animal (EPA, agrupación estudiantil) y el Departamento de Fomento de la Producción Animal (DFPA) de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias.

Las actividades experimentales se realizaron en el “Módulo Docente para Análisis Ambiental”, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicado al costado del Centro de Estudios de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED). Este lugar está ubicado en las coordenadas (33° 34' 15,84" S, 70° 37' 59,50" O), presenta un clima templado mesotermal, con veranos calurosos y secos e inviernos fríos y lluviosos, precipitación media anual de 419 mm, período seco entre Septiembre y Abril y temperatura media anual de 15,4 °C (Santibañez y Uribe, 1990).

A continuación se presentan imágenes con la descripción espacial del lugar donde se realizaron las actividades experimentales:

A.



B.



C.



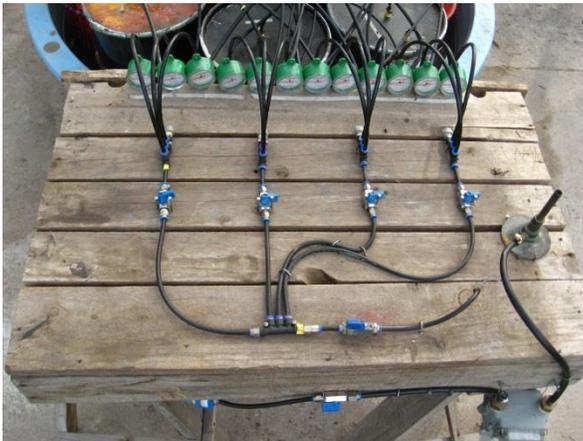
Figura 2. A. Santiago de Chile. B. Campus Antumapu de la Universidad de Chile (línea azul). C. Ubicación de las unidades experimentales (línea amarilla: AGRIMED; línea blanca: planta de biogás).

A continuación se muestran imágenes del recinto donde se ejecutaron los ensayos y las unidades experimentales en funcionamiento.



Figura 3. El recinto: Planta de biogás.

A.



B.



Figura 4. Unidades experimentales en funcionamiento.

Método

Poblaciones de Estudio

Según los conceptos explicados por Canavos (1988), las poblaciones de estudio corresponden a todas las producciones de biogás que se puedan realizar con cada una de las mezclas de heces caninas (HC) y guano bovino (GB), bajo las condiciones ambientales dispuestas, en dispositivos tipo Batch de 63,5 Litros. Por lo tanto, cada mezcla de HC y GB originará una población de datos de producción.

Tratamientos

De todas las poblaciones (posibles mezclas), se estudiaron cuatro (0%, 25%, 75% y 100% de HC), lo cual significó usar cuatro tratamientos para el diseño experimental. Cada tratamiento contó con 3 repeticiones. Para poder realizar los análisis estadísticos habituales, se asumió que estas poblaciones presentan distribución normal con varianzas iguales.

Descripción de las Materias Primas

Las materias primas corresponden a las Heces Caninas y el Guano Bovino. Los perros que entregaron la materia prima para este estudio correspondieron a los perros que están bajo el cuidado de la agrupación EPA (Estudiantes por la Protección Animal) y el DFPA (Departamento de Fomento de la Producción Animal). El guano bovino se obtuvo gracias al permiso de la Granja Educativa “Mundo Granja” de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile. En la Figura 5 se pueden apreciar los perros que brindaron sus excrementos.

A.



Perros bajo el cuidado de EPA

B.



Perros bajo el cuidado de DFPA

Figura 5. Presentación de perros que contribuyeron con sus heces.

Ambas materias primas (heces caninas y guano bovino) se describieron respecto a: Porcentaje de Humedad, Materia Orgánica, Carbono Orgánico, Nitrógeno Orgánico, Materia Orgánica Lábil, Relación Carbono/Nitrógeno, Relación Materia Orgánica Lábil/Materia Orgánica y Potencial de Hidrógeno

Con respecto a la Materia Orgánica Lábil (MOL), se usó la relación observada en la descripción del DFPA (Cuadro 2) para estimar el contenido de MOL en las heces provenientes de EPA. Mientras que, para estimar el contenido de MOL en el guano bovino se utilizó la relación observada en la descripción presentada por FAO (2011).

Los análisis realizados en laboratorio se describen a continuación.

Análisis de laboratorio de las materias primas

Se extrajo una muestra de cada materia prima, para obtener su caracterización acerca del contenido de humedad (%H₂O), materia orgánica (%MO) y potencial de hidrógeno (pH).

También, se determinó la relación Carbono/Nitrógeno para ambas materias primas, usando la siguiente fórmula:

$$C/N = \frac{\% \text{Carbono orgánico}}{\% \text{Nitrógeno total}}$$

*Fórmula 2.
Cálculo Relación
Carbono/Nitrógeno*

El valor de la Relación Carbono/Nitrógeno de una mezcla con un total de k materias primas, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C/N = \frac{\%C_1 * Q_1 + \%C_2 * Q_2 + \dots + \%C_i * Q_i + \dots + \%C_k * Q_k}{\%N_1 * Q_1 + \%N_2 * Q_2 + \dots + \%N_i * Q_i + \dots + \%N_k * Q_k}$$

*Fórmula 3.
Relación
C/N con
distintos
materiales*

Donde:

$\%C_i$: Porcentaje de Carbono orgánico de la materia prima i

$\%N_i$: Porcentaje de Nitrógeno total de la materia prima i

Q_i : Masa de la materia prima i

El contenido de nitrógeno se obtuvo mediante un análisis solicitado a un laboratorio privado (AGROLAB).

El contenido de carbono orgánico se determinó en el Laboratorio de Reciclaje Orgánico (LRO) de la Facultad de Ciencias Agronómicas, mediante la calcinación de la materia orgánica, a 600 °C durante 2 horas:

$$\%Corg = \frac{\%MO}{1,8}$$

*Fórmula 4.
Cálculo del
Carbono
Orgánico*

Donde:

$\%Corg$: Porcentaje de Carbono Orgánico de la muestra

$\%MO$: Porcentaje de Materia Orgánica o Sólidos Volátiles, el cual se calcula mediante

$$\%MO = \frac{\text{masa volatilizada a } 600\text{ }^{\circ}\text{C durante 2 horas}}{\text{masa seca}} * 100$$

masa seca : Masa obtenida después de secar la muestra a 65 °C, hasta peso constante

La caracterización de las materias primas utilizadas en el ensayo, se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Caracterización química de las materias primas

Parámetro	Heces Caninas		Guano Bovino
	DFPA	EPA	
% Contenido de Agua	68,75	73,83	81,03
pH	-	8,00	8,00
% Materia Orgánica	75,59	82,31	87,93
%C Orgánico	41,99	45,73	48,85
%N Orgánico	3,12	2,28	1,45
Relación C/N	13,46	20,06	33,69
%MO resistente	14,20	15,46	74,49
%MO lábil	61,39	66,84	13,44
MO lábil/MO	0,81211		
MO resistente/MO	0,18789		

La comparación de las heces provenientes de EPA y DFPA revela que el contenido de materia orgánica es mayor en las de EPA, aunque no es una diferencia significativa, por lo tanto, no existe razón para esperar un efecto distinto en la producción de biogás usando heces caninas de EPA o DFPA.

Diseño de los ensayos

Para el diseño experimental, se consideró la presencia de distintas fuentes de error (introducido por factores externos a las características intrínsecas de la proporción de HC y que su efecto no puede ser atribuido a los tratamientos), a saber:

- Distribución de la temperatura: El calor será entregado por resistencias eléctricas ubicadas equidistantemente en la piscina (como muestra la Figura 6) y distribuido por el agua. Sin embargo, los tambores contiguos a las resistencias podrían recibir un efecto mayor de temperatura al estar más cercanos en comparación a los demás tarros (los del centro, por ejemplo).
- Características del agua: El agua potable contiene mayor cantidad de cloro en comparación al agua de pozo, por lo tanto, ese cloro podría afectar a los microorganismos.
- Características nutricionales de las heces caninas: Las heces caninas fueron recolectadas de dos poblaciones distintas: población EPA y población DFPA, por lo tanto, podría existir un efecto debido a la población de origen de las heces caninas sobre la producción de biogás. Esto podría verificarse mediante una comparación de la composición de ambas heces.

Con el objetivo de disminuir el error experimental, se tomaron las siguientes medidas sobre las fuentes de error mencionadas anteriormente:

- La temperatura: Las repeticiones de cada unidad experimental se distribuyeron aleatoriamente en el espacio (dentro de la piscina) para evitar sesgos en la variable temperatura y asumir que cada tratamiento (conjunto de 3 repeticiones) estará bajo las mismas condiciones ambientales, porque cada tratamiento posee un tarro cercano a las resistencias. Por lo tanto, se pueden considerar homogéneas (el total de las unidades experimentales de cada tratamiento están afectadas por la misma fuente externa de variación).
- Tipo de agua: Al estar todas las repeticiones de todas las unidades experimentales bajo el mismo tipo de agua, se considera que están afectados por la misma variación externa y, por lo tanto, se pueden considerar homogéneas.
- Fuente de las heces caninas: La unidad experimental con el tratamiento 25% HC posee sólo las heces provenientes del DFPA. Se comparó la caracterización química de ambas heces para determinar si existe diferencia. Los resultados indican que las diferencias no son significativas, entonces no existe razón para esperar un sesgo en los datos de producción de biogás.

Preparación de las unidades experimentales

Se construyó 12 biodigestores tipo Batch usando tarros metálicos de, aproximadamente, 63,5 Litros.

En cada biodigestor, se depositó agua, heces caninas (HC) y guano bovino (GB) según el tratamiento que representa, con el objetivo de obtener un porcentaje de sólidos totales (%ST) cercano al 10%. Además, se dejó un espacio libre dentro de los biodigestores (aproximadamente, 25% del volumen del tarro) para amortiguar la presión generada por los gases.

Finalmente, cada tarro fue adaptado para contener la mezcla y resistir la presión de los gases, sellando las uniones y salidas. A cada tarro se le conectó una manguera de polietileno que permitió el retiro del gas generado. También, se instaló otra manguera para hacer llegar la presión del biodigestor a un manómetro que la informa en kPa.

La descripción de la carga que recibió cada tratamiento se presenta en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Proporción de Heces Caninas y Guano Bovino en los biodigestores.

Trata- miento	Descrip- ción	Heces Caninas (kg)	Guano Bovino (kg)	C/N	pH	H ₂ O materia prima (inicial)	MO (inicial)	MO lábil (inicial)	MO resistente (inicial)	Relación MOR/MOL (inicial)
		Kg		-	-		%			-
1	100% HC	5	0	20,06	8	0,74	82,31	66,84	15,46	0,23
2	75% HC	3,75	1,25	21,87	8	0,76	83,40	56,45	26,95	0,48
3	25% HC	1,25	3,75	22,73	8	0,78	83,55	30,44	55,50	1,82
4	0% HC	0	5	33,69	8	0,81	87,93	13,44	74,49	5,54

Infraestructura para el control

Control de la temperatura

La piscina se llenó de agua hasta el 80-90% y luego, se instaló un termostato eléctrico, que mantuvo el agua a temperatura cercana a los 30 °C, además, se midió la temperatura con un termómetro de mercurio para verificar que la temperatura del agua se condice con la que detecta el termostato.

Como el calor es entregado por resistencias eléctricas ubicadas en 3 puntos de la piscina, se distribuyó aleatoriamente las unidades experimentales para evitar el sesgo en los tratamientos por estar más cerca de las resistencias. Por lo tanto, las unidades experimentales quedaron distribuidas en la piscina, aleatoriamente, como se muestra en la Figura 6.

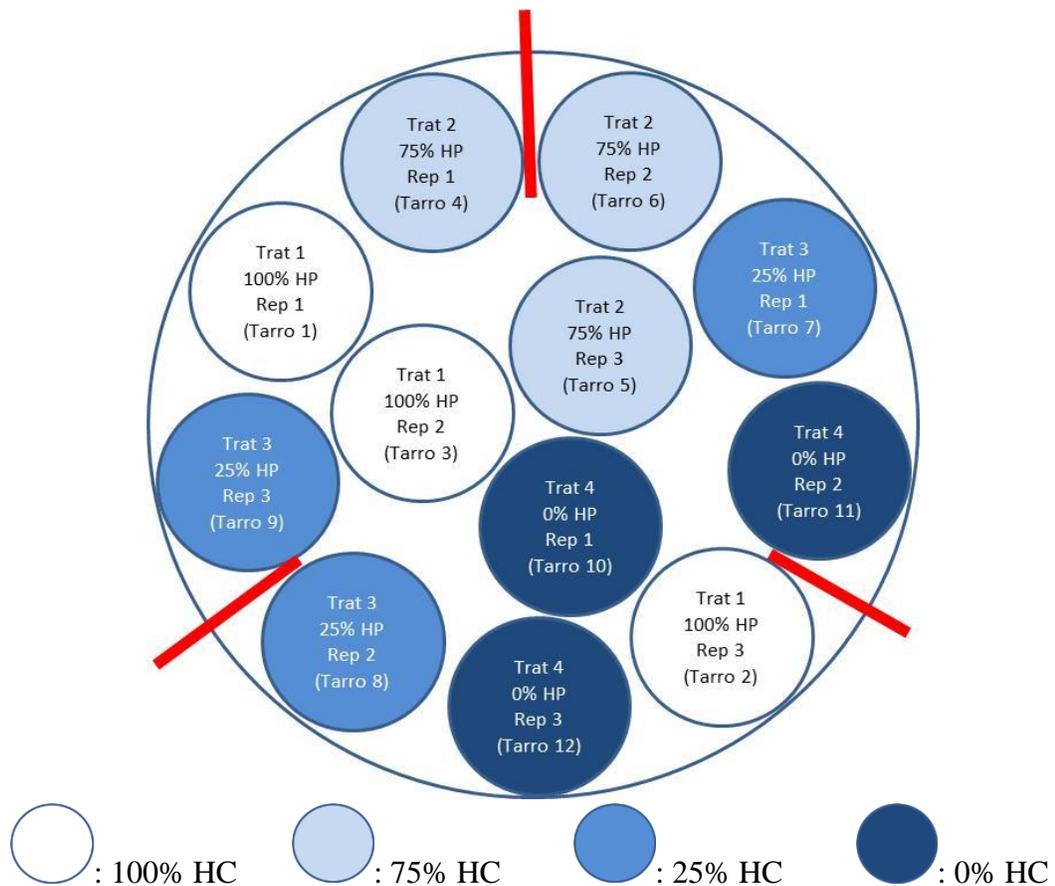


Figura 6. Distribución de las unidades experimentales en la piscina. Líneas rojas: resistencias eléctricas.

Control de contaminación de producciones

La manguera de salida de cada biodigestor se conectó a una válvula, para hacerla independiente de los otros biodigestores (unidades experimentales), de esta forma, la producción de un biodigestor no se mezcla con la de otro. Luego se conectó a una tubería general.

Control del vapor de agua

La tubería general se conectó a una trampa de vapor de agua, para proteger a los equipos que analizan el biogás. La trampa de vapor de agua consiste en un tubo a la sombra (más frío que el biogás) por donde pasa el biogás y hace contacto con sus paredes, entonces, el vapor de agua se enfría y condensa, quedando capturada el agua en estado líquido.

Control del sulfuro de hidrógeno

Posterior al filtro de vapor de agua, se conectó un filtro de sulfuro de hidrógeno (H_2S). Este filtro utilizó virutilla de hierro (Fe elemental) como elemento filtrador, debido a que este metal reacciona con el H_2S , capturando este gas y depositándolo como sulfuro de hierro (III) (Díaz, 2008).

Sin embargo, para utilizar el analizador de gases Dragüer, se mejoró la captura de H_2S , utilizando un desulfurizador comercial de la marca PUXIN®.

Control del volumen de biogás

Posterior a los dos filtros mencionados, se instaló un contador de gas que indica el volumen de gas en m^3 . En este experimento, se detuvo la medición al no detectar cambio en la medición por 3 segundos.

Control de inflamabilidad

Se conectó una manguera desde el contador hasta un mechero bunsen, para realizar pruebas de ignición y comprobar la calidad del biogás generado. En estas pruebas se usó un encendedor tradicional a bencina blanca, con el cual diariamente, se encendió una llama en la boquilla de salida del mechero bunsen y se registró si el gas se encendía.

Control de fugas en los tarros

Paralelamente, se evaluó la hermeticidad del sistema, rociando espuma líquida en las zonas donde es posible encontrar filtraciones de gas.

A continuación se presenta un esquema con las unidades experimentales y sus repeticiones, junto al sistema de tuberías para la toma de muestra de gases:

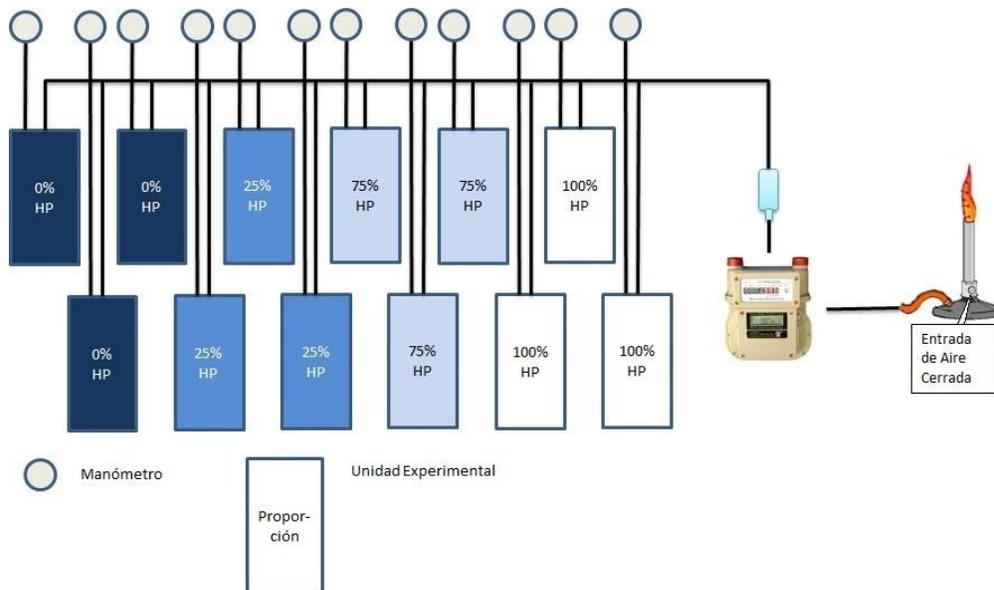


Figura 7. Esquema de las unidades experimentales.

Registro de variables para análisis

Diariamente, se registró la presión y volumen de gas generado por cada biodigestor y el tiempo necesario para vaciar el contenido de gas, dejando salir el gas hasta que el contador no marcara más gas, durante 3 segundos. Paralelamente, se prendió una llama en la salida

del mechero para evaluar si el gas producido era combustible. También, se registró si la temperatura del agua se encontraba cercano a 30 °C.

Se analizó la composición de los gases en 4 ocasiones, dentro de los 10 últimos días de operación del experimento, desde cuando los ensayos contaban con 87 días de ejecución. Los registros se llevaron a cabo en términos de CH₄(%), CO₂(%), O₂(%), H₂S (ppm) y CO (ppm).

Se terminaron las mediciones de producción de biogás al día 97 de puesta en marcha y, posteriormente, se tomó muestras de la parte sólida y líquida del interior de cada biodigestor para analizar sus características.

A continuación se presenta un cuadro resumen con las variables registradas y la frecuencia de registro:

Cuadro 4. Variables registradas y frecuencia de registro

Variable registrada	Instrumento para medición	Frecuencia de medición
Volumen (m ³)	Contador de gases	Diaria
Tiempo de vaciado (minutos)	Cronómetro digital	Diaria
Presión (kPa)	Manómetro	Diaria
Capacidad de ignición (si/no)	Encendedor de bencina	Diaria
CH ₄ (%)	Analizador de gases Dräger X-am 7000	4 días
CO ₂ (%)	Analizador de gases Dräger X-am 7000	4 días
O ₂ (%)	Analizador de gases Dräger X-am 7000	4 días
H ₂ S (ppm)	Analizador de gases Dräger X-am 7000	4 días
CO (ppm)	Analizador de gases Dräger X-am 7000	4 días
Temperatura (°C)	Termómetro de mercurio	1 semana

Repeticiones no consideradas

Se observó que una repetición de cada tratamiento alcanzó una producción de biogás relativamente baja en comparación a las otras unidades del mismo tratamiento, por lo cual, no se consideró los datos provenientes de esas repeticiones. Los biodigestores que presentaron estas producciones bajas (o nulas) fueron: B1, B4, B7 y B10.

Esta situación implica que los 4 tratamientos fueron descritos y analizados con un total de 2 repeticiones cada uno.

Estimación de la Producción de Biogás

Basándose en la muestra de 97 días en que las unidades experimentales desarrollaron la digestión anaeróbica, se estimó el volumen potencial de biogás que generaría cada biodigestor. Esto se realizó mediante una modificación de la ecuación de Luna-delRisco et al. (2011).

Ecuación Luna-delRisco Modificada

La modificación del modelo de Luna-delRisco (Luna-delRisco, et al., 2011) se presenta a continuación (Fórmula 5), y corresponde a la curva ajustada a los datos registrados de volumen de biogás:

$$V = K_1 \left[1 - e^{-K_2 \left(t - \frac{\ln(VGFA+1)}{K_5} \right)} \right] + K_3 \left[1 - e^{-K_4 \left(t - \frac{\ln(VGFA+1)}{K_5} \right)} \right]$$

*Fórmula 5.
Ecuación
Luna-
delRisco
modificada*

Donde:

- V : Volumen estimado de biogás en el tiempo t , en Litros
- t : Tiempo, en días
- K_1 : Volumen de biogás potencial, a partir de la Materia Orgánica Lábil (MOL)
- K_2 : Tasa de degradación de la MOL
- K_3 : Volumen de biogás potencial, a partir de la Materia Orgánica Resistente (MOL)
- K_4 : Tasa de degradación de la MOR
- $VGFA$: Volumen de Gas generado durante la Fase de Adaptación, corresponde al volumen de gas que no se comporta como el modelo de Luna-delRisco
- K_5 : Tasa de producción del VGFA. Esta tasa se relaciona con el VGFA mediante la siguiente expresión:

$$VGMA = e^{K_5 t} - 1$$

La incorporación del término $\frac{\ln(VGFA+1)}{K_5}$ permite estimar el tiempo que demora el consorcio microbiano en adaptarse, asumiendo que degradan el sustrato aeróbico de forma exponencial.

El uso de la ecuación modificada de Luna-delRisco et al. (2011), se llevó a cabo bajo las siguientes restricciones:

- El volumen de biogás a partir de la materia orgánica resistente se calculó siguiendo la siguiente relación, obtenida de a descripción de la materia prima cargada: $K_3 = K_1 \frac{MOR}{MOL}$, de esta forma se mantiene la relación entre la fracción lábil y resistente para la producción de biogás

- El TRH se consideró como el tiempo requerido para alcanzar el 70% del total de biogás generado
- El total de biogás generado, se consideró como el volumen de biogás acumulado, al tiempo en que la tasa de producción es de 0,1 L/día
- Se consideró que la producción de gas presenta comportamiento similar al modelo de Luna-delRisco et al. (2011) a partir del día 20, por lo tanto, el número de datos para el ajuste de curva es 77, para cada biodigestor

Análisis de la producción de biogás

Se analizó el volumen de biogás registrado durante los 97 días de puesta en marcha de las unidades experimentales y se analizó las estimaciones de volumen de biogás potencialmente producido por cada una.

Los resultados obtenidos de los registros y estimaciones se informaron en cuadros respecto a: Volumen registrado, volumen potencial, composición, período en que se inicia la actividad metanogénica y rendimiento por kg de biomasa orgánica.

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza de una vía (unifactorial), y prueba de rangos múltiples de Tukey, según Steel y Torrie (1988), para los siguientes parámetros:

- Días requeridos para el inicio de la actividad metanogénica
- Volumen registrado de biogás (gas combustible)
- Volumen total de biogás (gas combustible)
- Volumen potencial de biogás al TRH estimado
- Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) estimado (tiempo e que debe abrirse el sistema Batch)
- Rendimiento de biogás por kg MO, al TRH estimado
- Rendimiento de metano por kg MO, al TRH estimado
- Contenido de CH₄, CO₂, O₂, H₂S y CO

Adicionalmente, se realizó una comparación con las Normas pertinentes y bienes sustitutos.

Estimación del TRH y Volumen de Biogás a partir de los valores experimentales

Basándose en los resultados de un experimento, se puede estimar parámetros como el TRH y el volumen potencial de biogás en sistemas mayores, pero que se encuentren en similares condiciones, especialmente respecto a la temperatura.

El TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) es el tiempo estimado que requiere un tipo de materia prima para ser degradado anaeróbicamente hasta un nivel determinado y depende, principalmente, de la temperatura del sistema. El TRH en un sistema se puede estimar basándose en las determinaciones experimentales, considerando que la relación entre el TRH y la temperatura es, aproximadamente, inversa. Por lo tanto, para que las

estimaciones no presenten tanto error, se debe pretender que la temperatura del sistema sea similar a las condiciones experimentales donde se calculó el TRH de referencia.

$$TRH_{Q'} = TRH_Q \text{ estimado}$$

*Fórmula 6. TRH
para distintas
cantidades de
materia prima*

Donde:

Q' : Cantidad de materia prima del sistema objetivo

Q : Cantidad de materia prima usada en el experimento (para este caso 5 kg frescos)

$TRH_{Q'}$: Tiempo de Retención Hidráulica para la cantidad de materia prima Q' (mayor)

TRH_Q : Tiempo de Retención Hidráulico estimado para la cantidad de materia prima Q del experimento (5 kg)

Para estimar el volumen de biogás producido por una carga más grande, se asumirá que el sistema objetivo mantendrá las condiciones de temperatura experimentales (cercano a 30 °C), por lo tanto, se puede usar una estimación lineal del volumen de biogás producido, como:

$$V_{Q'} = \frac{Q'}{Q} V_Q$$

*Fórmula 7.
Extrapolación del
Volumen de
Biogás*

Donde:

Q' : Cantidad de materia prima distinta a la del experimento

Q : Cantidad de materia prima usada en el experimento (para este caso 5 kg frescos)

$V_{Q'}$: Volumen de biogás estimado para la cantidad Q' (mayor)

V_Q : Volumen de biogás estimado para la cantidad Q del experimento

Análisis del efluente y digestato

Se describió el efluente y digestato (parte líquida y parte sólida del material residual del interior del biodigestor) respecto de las siguientes características.

- Parte sólida (digestato): Porcentaje de humedad (%H₂O), porcentaje de materia orgánica (%MO), porcentaje de carbono orgánico (%C), porcentaje de Nitrógeno total (%N) y estabilidad biológica, mediante desprendimiento de C-CO₂/gMO/24 h.
- Parte líquida (efluente): Potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), fitotoxicidad mediante el Índice de Germinación (IG).

La fitotoxicidad se evaluó usando el índice de germinación (Zucconi et al, 1981; Varnero et al, 2007):

$$IG = \frac{\%G * \%LR}{100}$$

*Fórmula 8.
Cálculo del
Índice de
Germinación*

Donde:

%G : Porcentaje de germinación, respecto del control

$$\%GR = \frac{N^{\circ} \text{ semillas germinadas en extracto}}{N^{\circ} \text{ semillas germinadas en control}} * 100$$

%LR : Porcentaje del largo radicular, respecto al control

$$\%LR = \frac{\text{Promedio del largo radicular en extracto}}{\text{Promedio del largo radicular en control}} * 100$$

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza de una vía (unifactorial), y prueba de rangos múltiples de Tukey, según Steel y Torrie (1988), para los siguientes parámetros:

- Porcentaje de Materia Orgánica (%)
- Estabilidad Biológica (mgC-CO₂/gMO/24 h)

Se realizó una comparación de promedios para los siguientes parámetros:

- Potencial de Hidrógeno (pH)
- Conductividad Eléctrica (dS/m)
- Porcentaje de Germinación (%G)
- Índice de Germinación (IG)

Adicionalmente, se comparó los resultados obtenidos con la Norma Chilena de Compost (NCh 2880) (INN, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

Descripción del biogás obtenido

Para cada tratamiento se obtuvo, en promedio, los siguientes valores de: volumen registrado, volumen potencial[‡] de biogás, caracterización de su composición, tiempo durante el cual presenta capacidad de ignición y rendimiento.

Cuadro 5. Descripción del biogás obtenido en cada tratamiento.

Parámetro	Tratamientos			
	1 100% HC	2 75% HC	3 25% HC	4 0% HC
Volumen combustible registrado (después de PIFM [§]) (L)	160,15	132,20	156,30	121,05
Volumen Potencial Teórico ^{**} (L)	426,03	353,36	348,46	47,56
Volumen Potencial Teórico ^{**} Combustible (L)	386,23	320,06	336,06	285,11
Volumen de gas al TRH estimado (L)	298,22	247,35	243,92	207,42
TRH estimado (días)	141,82	146,00	195,66	192,67
Período Combustible hasta el TRH estimado (días)	141,82	146,00	195,66	192,67
Rendimiento de gas al TRH (L/kg de MO)	104,29	85,39	84,07	67,95
Rendimiento de CH ₄ al TRH (L/kg de MO)	59,91	51,21	47,23	38,39
CH ₄ (%)	57,60	61,33	56,17	56,77
CO ₂ (%)	41,04	43,75	42,47	41,78
O ₂ (%)	1,36	1,13	1,36	1,44
H ₂ S (ppm)	5,67	4,38	2,75	0,88
CO (ppm)	11,83	21,13	71,88	63,25

En la Figura 8 y Figura 9 se aprecian los días en que los biodigestores fueron sometidos a bajas temperaturas (cercano a 10 °C, simbolizado por flechas celestes hacia abajo) por problemas con el sistema térmico. Se observa, la fuerte correlación entre las temperaturas +/-10 °C y el comportamiento de la producción de biogás. Se advierte, notablemente en la Figura 8, cómo disminuye la producción en los días con temperatura cercana a 10 °C, especialmente los días 35 y 70 del ensayo. Cabe destacar, el mayor impacto sobre los

[‡] Se estimó la producción usando la ecuación modificada de Luna-delRisco et al. (2011) (Fórmula 5)

[§] Período de Inicio de la Fase Metanogénica, a partir del cual se obtiene gas combustible

^{**} Volumen alcanzado cuando la tasa de producción es igual a 0,1 L/día

tratamientos 0%, 25% y 75% de Heces Caninas, con producciones cercanas a cero, mientras que el tratamiento 100% de heces caninas resiste mejor estas condiciones y puede mantener una producción cercana a 1 Litro/día.

El impacto de las bajas temperaturas incide drásticamente sobre la producción de biogás, sin embargo, al restituir la temperatura de trabajo a 30 °C los valores de producción vuelven a la normalidad y continúa la producción como se había observado previamente. Es importante considerar que, durante este experimento, las temperaturas cercanas a 10 °C se mantuvieron por menos de 5 días.

Se advierte similitud en el comportamiento entre pares de tratamientos. El primer par de tratamientos lo componen el de 100% y 75% de Heces Caninas, el segundo par los tratamientos 25% y 0% Heces Caninas. Esto se aprecia en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

En cada par se observa una forma similar en la curva acumulada de producción de biogás, variando las tasas y los valores máximos alcanzados. Durante el período antes del día 50, el primer par presenta una tasa de producción menor que la del segundo par, mientras que después del día 50, la situación se invierte y la tasa de producción de biogás es mayor en los tratamientos 100% y 75% de Heces Caninas, alcanzando mayores volúmenes de biogás acumulado y mostrando una tendencia al alza en contraste con los tratamientos 25% y 0%. Aunque al comparar los volúmenes acumulados por los tratamientos 75% y 25% Heces Caninas, es mayor el de 25%, se observa claramente la tendencia de ambos, que indica un estancamiento para la producción en 25%, mientras que para 75% Heces Caninas indica un crecimiento. Por lo tanto es esperable que se alcancen mayores volúmenes con el par 100% y 75% Heces Caninas.

El comportamiento antes de los 50 días, se explica por la cantidad de inóculo presente en cada tratamiento. El Guano Bovino posee un alto contenido de inóculo, a diferencia de las Heces Caninas, lo cual robustece la producción y en adelante depende del contenido de materia orgánica disponible (Materia Orgánica Lábil) y temperaturas favorables (cercana a 30 °C).

Los valores registrados para las repeticiones en cada día, se describen en el Cuadro Anexo 1 de la sección ANEXO al final de este escrito.

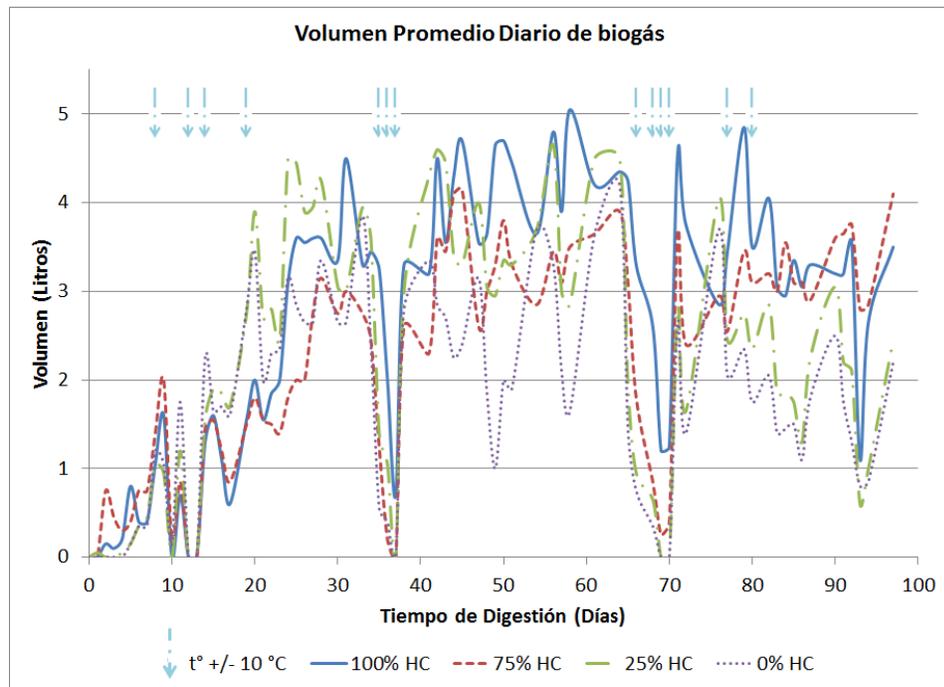


Figura 8. Comportamiento promedio diario de la producción de biogás y el efecto de la temperatura cercana a 10 °C.

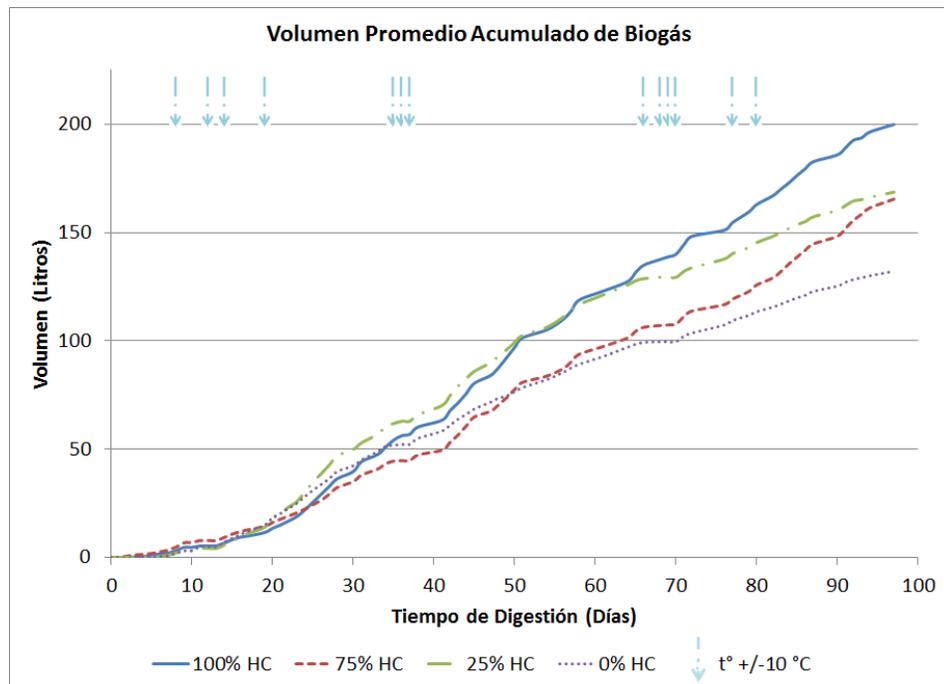


Figura 9. Producción de biogás promedio acumulada por tratamiento y el efecto de temperatura cercana a 10 °C.

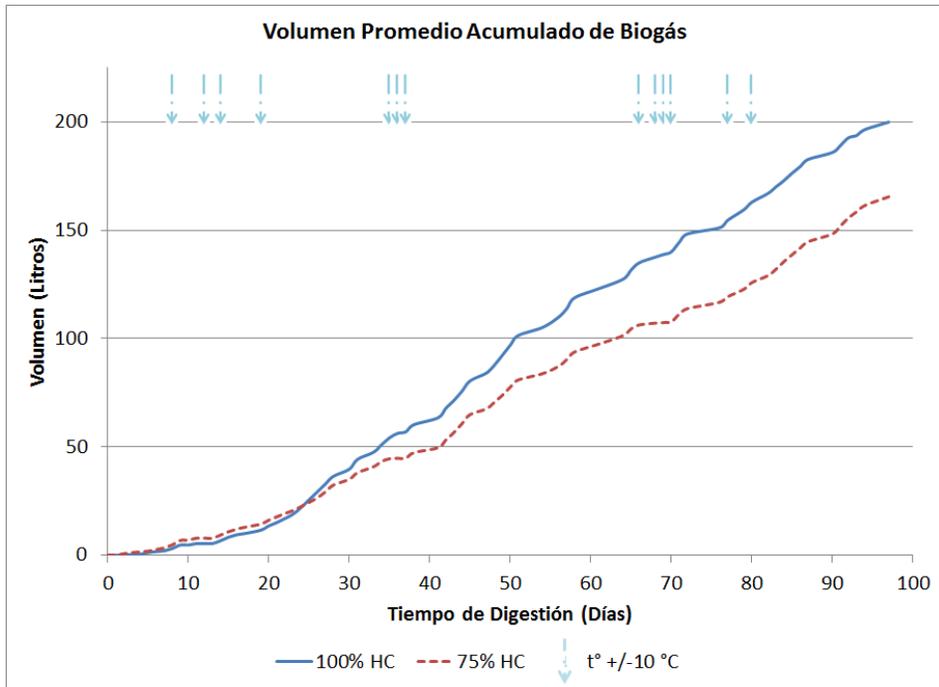


Figura 10. Producción de biogás promedio acumulada (tratamientos 100% y 75% HC).

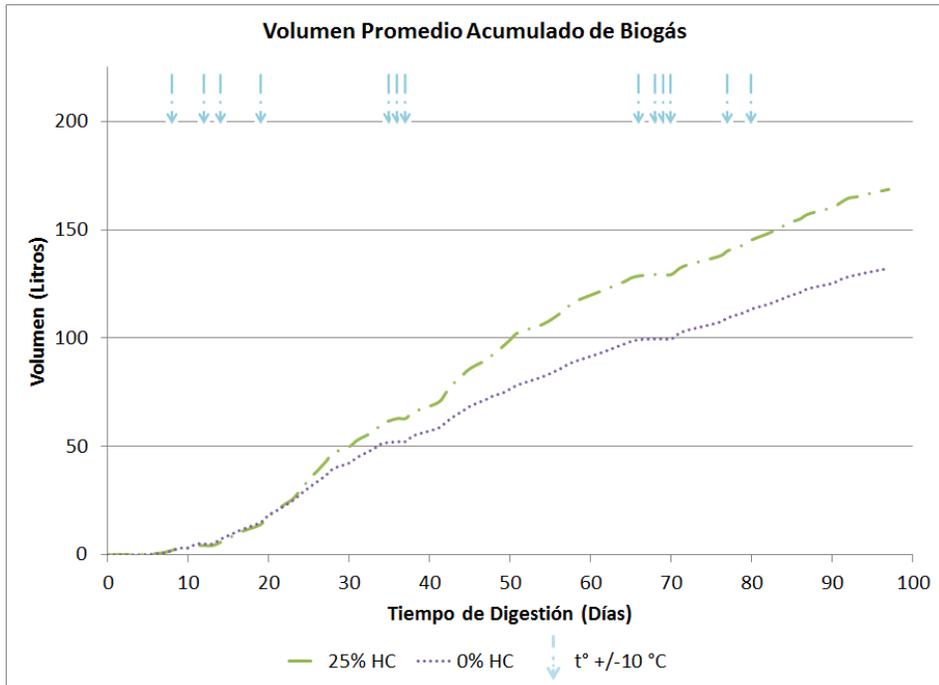


Figura 11. Producción de biogás promedio acumulada (tratamientos 25% y 0% HC).

Estimación del potencial de biogás

Estimación mediante el modelo doble exponencial

Los resultados del ajuste de curva usando la ecuación modificada de Luna-delRisco (Fórmula 5) se presentan en el Cuadro 6:

Cuadro 6. Resumen del ajuste de curva para el modelo Luna-delRisco modificado.

Tratamiento	Descripción Tratamiento	N° BD	R2	K1	K2	K3	K4	K5	VGFA (Litros)
1	100% HC	2	0,991	379,74	0,0060	87,86	0,0053	0,1393	11,30
		3	0,998	334,68	0,0096	77,43	0,0096	0,1638	15,80
2	75% HC	5	0,985	346,24	0,0077	165,30	0,0031	0,1694	18,00
		6	0,994	162,02	0,0098	77,35	0,0049	0,2231	14,40
3	25% HC	8	0,997	274,62	0,0233	500,70	0,0002	0,1953	23,80
		9	0,985	135,46	0,0032	246,98	0,0032	0,1954	12,00
4	0% HC	11	0,992	40,49	0,0262	224,39	0,0040	0,2703	14,50
		12	0,996	57,03	0,0356	316,07	0,0048	0,2323	22,40

Cabe destacar el nivel de ajuste de curva a los datos de cada biodigestor, el cual supera el 98% para todos los conjuntos de datos. Esto permite confiar en las estimaciones de producción y realizar los análisis estadísticos con tranquilidad.

En el siguiente cuadro, se presenta un resumen de las estimaciones obtenidas mediante el uso del modelo.

Cuadro 7. Resumen de estimaciones del modelo doble exponencial.

Tratamiento	Descripción Tratamiento	N° BD	Volumen Medido	Biogás al TRH estimado	TRH estimado	Biogás Teórico tasa=0,1	Tiempo Final tasa=0,1
			Litro	Litro	días	Litro	días
1	100% HC	2	186,60	315,26	210	450,37	584
		3	213,30	281,18	137	401,69	400
2	75% HC	5	207,40	338,60	206	483,71	631
		6	123,60	156,11	147	223,02	388
3	25% HC	8	240,60	241,97	97	345,67	674
		9	96,80	245,87	334	351,25	795
4	0% HC	11	102,30	168,12	218	240,17	555
		12	162,20	246,72	203	352,45	577

Se puede revisar el detalle del ajuste de curva para cada biodigestor en el anexo correspondiente.

Análisis estadístico del biogás

A continuación se presenta el análisis de varianza y la prueba de rangos múltiples de Tukey, para las variables analizadas:

Período (en días) en que se inicia de la fase metanogénica

Cuadro 8. Análisis de Varianza para los Períodos (días)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	293,00	3	97,67	43,41	0,00	6,59
Error	9,00	4	2,25			
Total	302,00	7				

Como se puede observar, existe una diferencia significativa entre los tratamientos, por lo tanto, se realizó una comparación de rangos múltiples entre tratamientos mediante la prueba de Tukey. Los resultados de la prueba se presentan a continuación en la Figura 12:

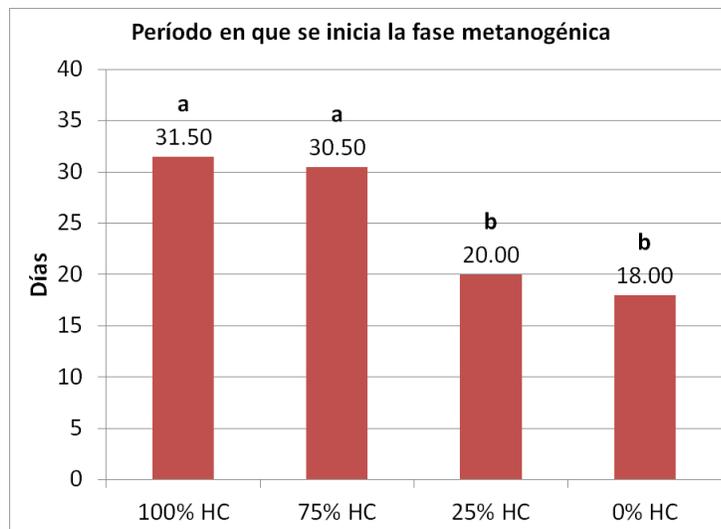


Figura 12. Comparación de los promedios de los Períodos, mediante la Prueba de Tukey.

Volumen Registrado (97 días) de biogás (presenta capacidad combustible)

Cuadro 9. Análisis de varianza para Volumen de biogás

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	2136,27	3	712,09	0,18	0,90	6,59
Error	15597,89	4	3899,47			
Total	17734,16	7				

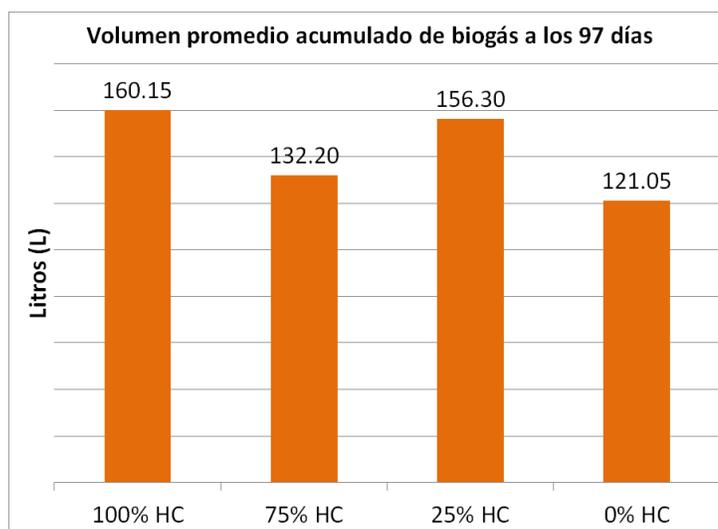


Figura 13. Comparación de promedios de la producción de biogás, según tratamiento.

El análisis de varianza arroja que, a los 97 días de puesta en marcha, no hay diferencias estadísticamente significativas de la producción de biogás combustible entre los tratamientos.

Volumen Potencial de Biogás (acumulado cuando tasa es 0,1 L/día)

El análisis siguiente se basa en las estimaciones de producción de biogás (presenta capacidad combustible), usando la ecuación de la Fórmula 5, asumiendo como volumen total, aquel volumen alcanzado cuando la tasa de producción es igual a 0,1 L/día.

Cuadro 10. Análisis de Varianza para el Volumen Potencial de Biogás

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	10596,54	3,00	3532,18	0,34	0,80	6,59
Error	41478,48	4,00	10369,62			
Total	52075,02	7,00				

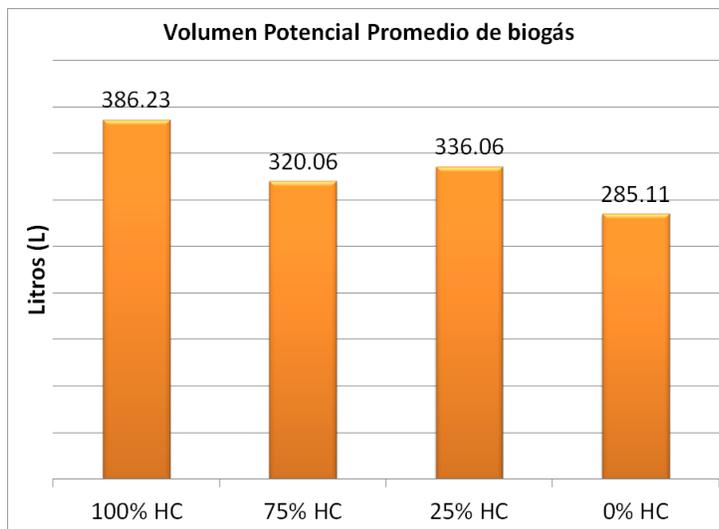


Figura 14. Comparación de promedios de la producción total de biogás combustible.

Como se puede apreciar, no existe diferencia estadísticamente significativa respecto a la producción de biogás combustible según tratamiento. Sin embargo, es importante destacar que el reducido tamaño de muestra y una desviación estándar elevada dentro de los tratamientos pueden dificultar la representación de cada tratamiento y la diferenciación entre ellos.

Otro aspecto importante, corresponde a una tendencia positiva a aumentar el potencial de producción a medida que aumenta el contenido de heces caninas en la mezcla.

Volumen Potencial de Biogás al TRH estimado

El análisis siguiente se basa en las estimaciones de producción de biogás, usando la ecuación de la Fórmula 5, asumiendo que el TRH estimado corresponde al período en que el 70% del volumen total se ha producido.

Cuadro 11. Análisis de Varianza para el Volumen Potencial de Biogás al TRH estimado

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	4215,34	3,00	1405,11	0,28	0,84	6,59
Error	20329,88	4,00	5082,47			
Total	24545,22	7,00				

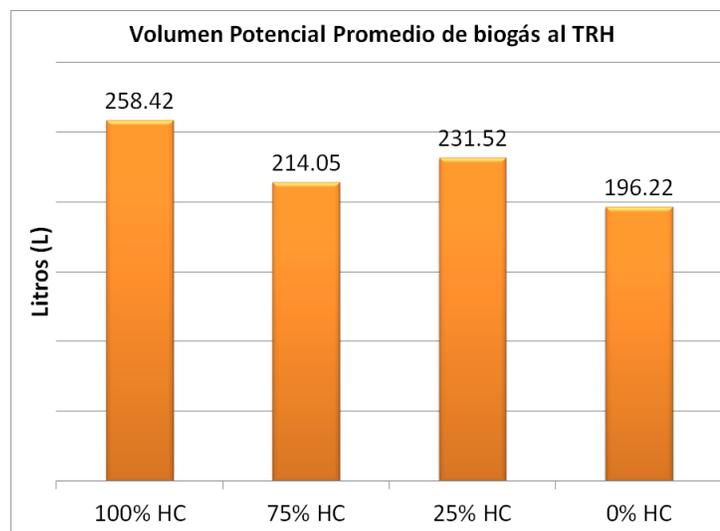


Figura 15. Comparación de promedios de la producción de biogás al TRH estimado.

Del análisis de varianza se desprende que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, respecto al volumen de biogás al TRH estimado, asumiendo que corresponde al 70% del volumen promedio total.

A pesar de las diferencias observadas en la producción de biogás por tratamiento, el tamaño muestral y las diferencias dentro de cada tratamiento, no permiten aseverar estadísticamente que exista una diferencia de producción de biogás entre los tratamientos. Por lo tanto, no se justifica realizar la prueba de Tukey para identificar similitudes y diferencias entre los tratamientos. Sin embargo, gracias a la comparación de promedios, se puede observar una tendencia a aumentar el volumen de biogás a medida que crece la proporción de heces caninas en la mezcla de la materia prima.

Tiempo de Retención Hidráulica estimado en función del modelo (TRH estimado)

El análisis siguiente se basa en las estimaciones de producción de biogás, usando la ecuación de la Fórmula 5, asumiendo como TRH, aquel período necesario para producir el 70% del volumen de biogás potencial estimado (mencionado anteriormente).

Cuadro 12. Análisis de varianza para Valores promedio de TRH estimado

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	2961,95	3,00	987,32	0,12	0,94	6,59
Error	32762,03	4,00	8190,51			
Total	35723,97	7,00				

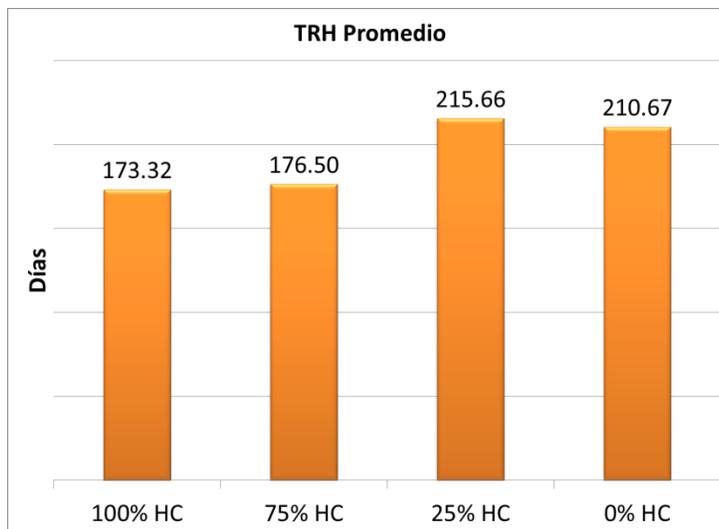


Figura 16. Comparación de promedios del TRH estimado.

El análisis de varianza indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa de TRH estimado entre los tratamientos. Sin embargo, gracias a la comparación de promedios, se observa una tendencia a la baja a medida que se aumenta la proporción de heces caninas en la mezcla de la materia prima. Esto se explica, gracias a que el TRH se considera como el tiempo para degradar el 70% de la materia orgánica, independiente de si es lábil o resistente. Como el guano bovino posee mayor contenido de material lignocelulósico, entonces la degradación tardará más tiempo.

Rendimiento de Biogás al TRH estimado

El análisis siguiente se basa en las estimaciones de producción de biogás, usando la ecuación de la Fórmula 5 y el contenido de Materia Orgánica (MO) que fue cargado en cada biodigestor.

Cuadro 13. Análisis de varianza para el Rendimiento de biogás por kg de MO al TRH estimado

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	1326,50	3,00	442,17	0,74	0,58	6,59
Error	2387,41	4,00	596,85			
Total	3713,91	7,00				

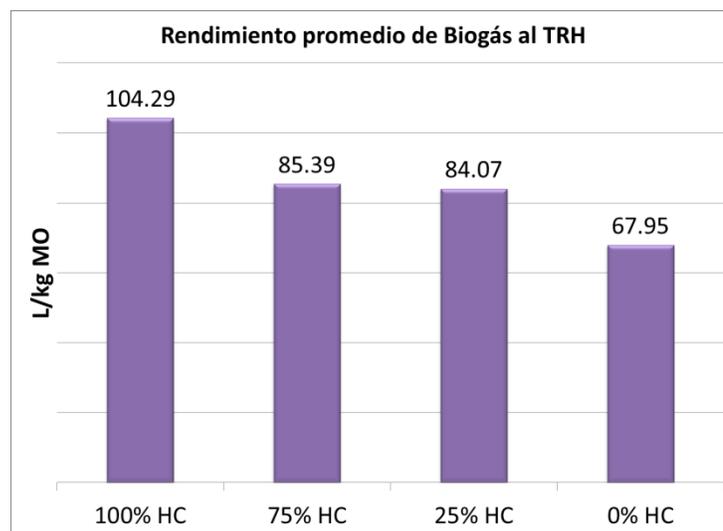


Figura 17. Comparación de promedios del Rendimiento de biogás.

El análisis de varianza indica que no existe diferencia estadísticamente significativa del rendimiento de biogás entre los tratamientos. Sin embargo, esto podría deberse al tamaño muestral reducido y una desviación típica elevada dentro de cada tratamiento. Se menciona esta posible causa de homogeneidad, debido a que al comparar los promedios (Figura 17) se observa una clara tendencia al aumento del rendimiento, a medida que crece la proporción de heces caninas en la mezcla de materias primas.

Rendimiento de Metano al TRH estimado

El análisis siguiente se basa en las estimaciones de producción de biogás, usando la ecuación de la Fórmula 5, el porcentaje de metano determinado a partir del día 87 de puesta en marcha y el contenido de Materia Orgánica (MO) que fue cargado en cada biodigestor.

Cuadro 14. Análisis de varianza para el Rendimiento de metano por kg de MO al TRH estimado

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	1326,50	3,00	442,17	0,74	0,58	6,59
Error	2387,41	4,00	596,85			
Total	3713,91	7,00				

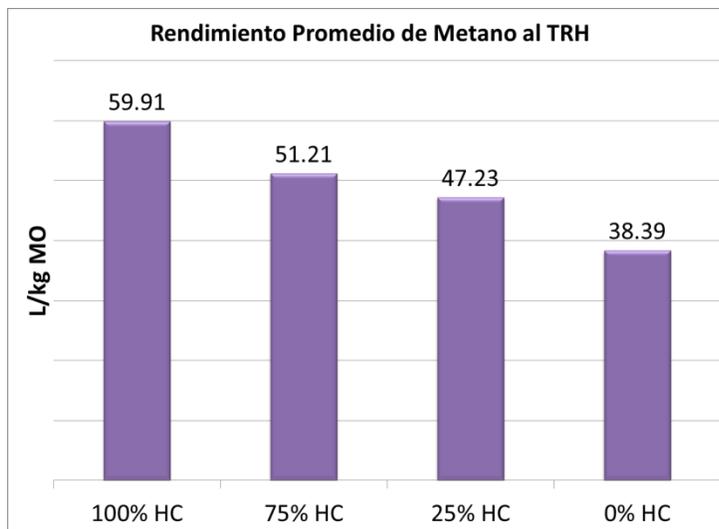


Figura 18. Comparación de promedios del Rendimiento de metano

Los resultados del análisis del rendimiento de metano son similares a los obtenidos para el rendimiento de biogás, lo cual es obvio, debido a que la única diferencia en los datos es la multiplicación por el porcentaje de metano.

Composición del biogás

Cuadro 15. Promedio del Porcentaje de Metano (CH₄)

	100% HC	75% HC	25% HC	0% HC
R1	54,93	57,66	55,33	58,24
R2	60,26	65,00	57,01	55,30
Promedio	57,60	61,33	56,17	56,77

Cuadro 16. Análisis de varianza para Porcentaje de Metano (CH₄)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	32,19	3	10,73	0,92	0,51	6,59
Error	46,90	4	11,72			
Total	79,09	7				

Cuadro 17. Promedio del Porcentaje de Dióxido de Carbono (CO₂)

	100% HC	75% HC	25% HC	0% HC
R1	43,78	41,49	43,32	40,32
R2	38,31	46,00	41,63	43,24
Promedio	41,04	43,75	42,47	41,78

Cuadro 18. Análisis de varianza para Porcentaje de Dióxido de Carbono (CO₂)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	7,92	3	2,64	0,34	0,80	6,59
Error	30,79	4	7,70			
Total	38,71	7				

Cuadro 19. Promedio del Porcentaje de Oxígeno (O₂)

	100% HC	75% HC	25% HC	0% HC
R1	1,29	0,85	1,35	1,43
R2	1,43	1,40	1,36	1,45
Promedio	1,36	1,13	1,36	1,44

Cuadro 20. Análisis de varianza para Porcentaje de Oxígeno (O₂)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	0,11	3	0,04	0,93	0,50	6,59
Error	0,16	4	0,04			
Total	0,27	7				

Cuadro 21. Promedio de Contenido (ppm) de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

	100% HC	75% HC	25% HC	0% HC
R1	1,67	5,75	2,50	0,00
R2	9,67	3,00	3,00	1,75
Promedio	5,67	4,38	2,75	0,88

Cuadro 22. Análisis de varianza para Contenido (ppm) de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	25,77	3	8,59	0,92	0,51	6,59
Error	37,44	4	9,36			
Total	63,21	7				

Cuadro 23. Promedio de Contenido (ppm) de Monóxido de Carbono (CO)

	100% HC	75% HC	25% HC	0% HC
R1	11,00	17,25	50,75	87,00
R2	12,67	25,00	93,00	39,50
Promedio	11,83	21,13	71,88	63,25

Cuadro 24. Análisis de varianza para Contenido (ppm) de Monóxido de Carbono (CO)

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	5379,74	3	1793,25	3,50	0,13	6,59
Error	2052,08	4	513,02			
Total	7431,82	7				

Como se puede observar, no existen diferencias significativas entre los tratamientos, respecto a la composición del biogás. Por lo tanto, no tiene sentido realizar una comparación por la prueba de Tukey.

Contraste del biogás obtenido con la Norma de Biometano

Se utilizó la NCh 3213 (INN, 2010) para comparar la calidad del biogás obtenido por cada tratamiento en este estudio.

Ninguno de los tratamientos cumple con las exigencias de la NCh 3213, debido a que los rangos de composición y poder calorífico descritos por la norma sólo pueden alcanzarse con procesos de purificación y/o enriquecimiento altamente efectivos. Lo anterior se entiende cuando se considera que los procesos biológicos generan, además del CH₄, una cantidad de gases inertes, propios del metabolismo microbiano, en cantidades importantes (principalmente en el caso del CO₂), los cuales sólo son permitidos por la NCh 3213 en un nivel máximo de 4,5 %mol.

Obviamente, alcanzar niveles aceptables según la NCh 3213 no es un objetivo de este estudio, sin embargo, es una referencia actual.

Comparación con bienes sustitutos

A pesar de no cumplir con las especificaciones de la NCh 3213, la calidad del biogás obtenido por todos los tratamientos permite usarlo para distintas actividades como, calefacción, cocción de alimentos, iluminación, entre otros. A continuación, se presenta en el Cuadro 25 las características del biogás acumulado por cada tratamiento al TRH estimado y en el Cuadro 26 se muestra la comparación con algunos bienes sustitutos.

Cuadro 25. Características del biogás acumulado al TRH estimado según modelo

Tratamiento	Descripción Tratamiento	CH ₄	Biogás al TRH	TRH	Poder Calorífico Inferior	Energía acumulada al TRH estimado
			estimado			estimado
		%	Litro	días	kJ/L	MJ
1	100% HC	57,60	298,22	173,32	18,90	5,62
2	75% HC	61,33	247,35	176,50	20,12	4,87
3	25% HC	56,17	243,92	215,66	18,43	4,50
4	0% HC	56,77	207,42	210,67	18,63	3,84

Cuadro 26. Comparación del biogás obtenido al TRH estimado con bienes sustitutos

Tratamiento	Descripción Tratamiento	Biogás al TRH	Poder Calorífico Inferior	Energía acumulada al TRH	Gas Natural ^{8/}	Gas Licuado ^{8/}	Diesel ^{8/}	Fuel Oil ^{8/}	Kerosen ^{8/}
		estimado	Inferior	al TRH	Natural ^{8/}	Licuado ^{8/}	Diesel ^{8/}	Fuel Oil ^{8/}	Kerosen ^{8/}
		Litro	kJ/L	MJ	Litro	Kg		Litro	
1	100% HC	298,22	18,90	5,62	159,59	0,12	0,16	0,14	0,16
2	75% HC	247,35	20,12	4,87	138,20	0,11	0,14	0,12	0,14
3	25% HC	243,92	18,43	4,50	127,65	0,10	0,13	0,11	0,13
4	0% HC	207,42	18,63	3,84	109,17	0,08	0,11	0,10	0,11

^{8/} (Staffell, 2011)

Cuadro 26. Comparación del biogás obtenido al TRH estimado con bienes sustitutos (continuación)

Tratamiento	Descripción Tratamiento	Hidrógeno	Carbón	Leña	Leña Pino	Residuos
		^{8/}	Antracita	(Acacia dealbata)	Radiata	Forestales
		Litro	^{8/}	(20% H ₂ O) ^{9/}	(10 años)	Pino
					(20% H ₂ O) ^{9/}	(20% H ₂ O)
1	100% HC	559,28	0,22	0,415	0,345	0,795
2	75% HC	484,33	0,19	0,355	0,295	0,685
3	25% HC	447,355	0,175	0,33	0,275	0,635
4	0% HC	382,575	0,145	0,285	0,235	0,54

^{8/} (Staffell, 2011); ^{9/} (Pinilla y Hernández, 2010)

Cuadro 26. Comparación del biogás obtenido al TRH estimado con bienes sustitutos (continuación)

Tratamiento	Descripción Tratamiento	Briqueta	Pelet	Tablero de	MDF ^{10/}	Tablero
		(9,36 %H ₂ O) ^{10/}	(8 %H ₂ O) ^{10/}	Partícula		Contrachapado ^{10/}
				^{10/}		
1	100% HC	0,315	0,3	0,355	0,325	0,405
2	75% HC	0,275	0,26	0,31	0,28	0,35
3	25% HC	0,255	0,235	0,285	0,255	0,325
4	0% HC	0,215	0,205	0,24	0,22	0,275

^{10/} (Pérez, 2010)

Simulación de requerimientos según demandas de energía

Los requisitos se refieren a la cantidad de animales y volumen de digestor para generar un flujo diario de biogás que permita suplir la energía demandada por cada escenario propuesto. Se consideró que cada perro deposita un promedio de 0,19 kg/día de heces, mientras que los bovinos depositan un promedio de 7 kg/día de guano fresco. La demanda de cada escenario fue calculada según el siguiente cuadro de consumo energético:

Cuadro 27. Consumos energéticos de distintos artefactos

Fuente	Equipo	Potencia	Uso	Cantidad	Electricidad	Biogás
		W	h/día	Artefactos	diaria	m ³ /día
				-	kWh/día	
01	Cocina 2 fogones (0,42 m ³ /h)	2105	2,00	1		0,84
1	Calefont a gas (2,2 m ³ /h)	11028	1,00	1		2,20
2	Ampolleta (25 W)	25	4,00	3	300,00	
3	Ventilación Invernadero 10m ² (tipo: 24°C, 175 m ³ /m ² h)	2	24,00	1	56,00	
1	Generador Eléctrico (600W) (0,8 m ³ Biogás/kWh)					

Escenario 1

Esta situación podría graficarse con una casa rural que posee el invernadero tipo *single glass* descrito en el cuadro de consumo energético y un generador eléctrico a biogás para alimentar el ventilador.

Escenario 2

En este escenario se considera el consumo de un hogar donde se usa la cocina, tres ampolletas y un calefont, según lo descrito en el Cuadro 27. Este escenario también considera el uso de un generador eléctrico a biogás.

Escenario 3

Este escenario considera una demanda exclusiva para iluminación y considera el uso de 10 ampolletas durante 12 horas/día. También se considera el uso de un generador eléctrico a biogás.

Cuadro 28. Escenario 1: Invernadero

Tratamiento	N° Biodigestor	N° Animales		Total anual de Residuo Fresco Ton/año	Mezcla para carga (10% ST) m ³ /día	Volumen Digestor m ³	TRH estimado (70%)	Biogás al TRH estimado	%CH ₄
		Perros	Bovinos				Días	m ³ /año	
100% HC	2	10,3	0,0	259,34	0,03	6,49	210	16352,00	54,93
	3	11,5	0,0	290,77	0,03	4,74	137	16352,00	60,26
75% HC	5	7,2	0,1	241,47	0,02	3,58	206	16352,02	57,66
	6	15,6	0,1	523,73	0,04	5,53	147	16352,02	65,00
25% HC	8	3,4	0,3	337,90	0,02	1,68	97	16352,02	55,33
	9	3,3	0,3	332,53	0,02	5,72	334	16352,00	57,01
0% HC	11	0,0	0,5	486,32	0,04	8,31	218	16352,00	58,24
	12	0,0	0,4	331,39	0,03	5,26	203	16352,02	55,30

Cuadro 28. Escenario 1: Invernadero (continuación)

Tratamiento	Biodigestor	N° Animales		Poder Calorífico Inferior			Equivalencia del Biogás generado			
		Perros	Bovinos	GJ/año	MM BTU/año	kcal/año	Gas Natural ^{8/} m ³ /año	Gas Licuado ^{8/} kg/año	Diesel ^{8/} Litro/año	Fuel Oil ^{8/}
100% HC	2	10,3	0,0	294,71	279,61	70404,43	8367,77	6368,04	8200,14	7516,27
	3	11,5	0,0	323,31	306,75	77236,32	9179,76	6985,98	8995,86	8245,63
75% HC	5	7,2	0,1	309,35	293,50	73901,46	8783,41	6684,35	8607,44	7889,61
	6	15,6	0,1	348,74	330,87	83311,03	9901,76	7535,44	9703,39	8894,16
25% HC	8	3,4	0,3	296,84	281,63	70911,39	8428,03	6413,90	8259,18	7570,39
	9	3,3	0,3	305,89	290,22	73074,69	8685,14	6609,56	8511,15	7801,34
0% HC	11	0,0	0,5	312,49	296,48	74651,39	8872,54	6752,18	8694,79	7969,67
	12	0,0	0,4	296,72	281,52	70884,42	8424,82	6411,46	8256,04	7567,51

^{8/} (Staffell, 2011)

Cuadro 29. Escenario 2: Casa

Tratamiento	N° Biodigestor	N° Animales		Total anual de Residuo Fresco	Mezcla para carga (10% ST)	Volumen Digestor	TRH estimado (70%)	Biogás al TRH estimado	%CH ₄
		Perros	Bovinos						
100% HC	2	55,8	0,0	1406,93	0,17	35,19	210	88709,62	54,93
	3	62,6	0,0	1577,43	0,19	25,69	137	88709,60	60,26
75% HC	5	39,0	0,4	1309,96	0,09	19,42	206	88709,60	57,66
	6	84,6	0,8	2841,22	0,20	30,00	147	88709,60	65,00
25% HC	8	18,2	1,5	1833,09	0,09	9,14	97	88709,62	55,33
	9	17,9	1,5	1803,97	0,09	31,02	334	88709,62	57,01
0% HC	11	0,0	2,8	2638,26	0,21	45,06	218	88709,62	58,24
	12	0,0	1,9	1797,80	0,14	28,52	203	88709,62	55,30

Cuadro 29. Escenario 2: Casa (continuación)

Tratamiento	Biodigestor	N° Animales		Poder Calorífico Inferior			Equivalencia del Biogás generado			
		Perros	Bovinos	GJ/año	MM BTU/año	kcal/año	Gas Natural ^{8/}	Gas Licuado ^{8/}	Diesel ^{8/}	Fuel Oil ^{8/}
							m ³ /año	kg/año	Litro/año	
100% HC	2	55,8	0,0	1598,82	1516,91	381944,08	45395,17	34546,63	44485,75	40775,77
	3	62,6	0,0	1753,96	1664,10	419007,01	49800,21	37898,95	48802,54	44732,55
75% HC	5	39,0	0,4	1678,23	1592,25	400915,05	47649,93	36262,54	46695,34	42801,08
	6	84,6	0,8	1891,91	1794,98	451961,90	53716,99	40879,70	52640,86	48250,77
25% HC	8	18,2	1,5	1610,33	1527,83	384693,98	45722,00	34795,35	44806,04	41069,34
	9	17,9	1,5	1659,46	1574,44	396430,28	47116,90	35856,90	46172,99	42322,29
0% HC	11	0,0	2,8	1695,26	1608,41	404983,86	48133,52	36630,56	47169,24	43235,46
	12	0,0	1,9	1609,72	1527,25	384547,65	45704,61	34782,12	44788,99	41053,72

^{8/} (Staffell, 2011)

Cuadro 30. Escenario 3: Iluminación

Tratamiento	N° Biodigestor	N° Animales		Total anual de Residuo Fresco Ton/año	Mezcla para carga (10% ST) m ³ /día	Volumen Digestor m ³	TRH estimado (70%) días	Biogás al TRH estimado m ³ /año	%CH ₄
		Perros	Bovinos						
100% HC	2	551,3	0,0	13893,28	1,66	347,53	210	876000,00	54,93
	3	618,1	0,0	15577,03	1,86	253,66	137	876000,00	60,26
75% HC	5	385,0	3,5	12935,77	0,93	191,78	206	876000,00	57,66
	6	835,0	7,5	28056,77	2,02	296,21	147	876000,00	65,00
25% HC	8	179,6	14,6	18101,60	0,93	90,23	97	876000,00	55,33
	9	176,7	14,3	17814,02	0,92	306,35	334	876000,09	57,01
0% HC	11	0,0	27,9	26052,63	2,04	444,92	218	876000,09	58,24
	12	0,0	19,0	17753,11	1,39	281,68	203	876000,09	55,30

Cuadro 30. Escenario 3: Iluminación (continuación)

Tratamiento	Biodigestor	N° Animales		Poder Calorífico Inferior			Equivalencia del Biogás generado			
		Perros	Bovinos	GJ/año	MM BTU/año	kcal/año	Gas Natural ^{8/} m ³ /año	Gas Licuado ^{8/} kg/año	Diesel ^{8/} Litro/año	Fuel Oil ^{8/}
100% HC	2	551,3	0,0	15788,19	14979,31	3771665,71	448273,50	341145,04	439293,06	402657,30
	3	618,1	0,0	17320,24	16432,87	4137659,75	491772,96	374249,00	481921,08	441730,27
75% HC	5	385,0	3,5	16572,39	15723,33	3959003,08	470539,09	358089,60	461112,60	422657,15
	6	835,0	7,5	18682,48	17725,31	4463086,59	530450,89	403683,67	519824,16	476472,34
25% HC	8	179,6	14,6	15901,86	15087,16	3798820,69	451500,95	343601,20	442455,85	405556,32
	9	176,7	14,3	16387,00	15547,44	3914716,09	465275,46	354083,87	455954,41	417929,14
0% HC	11	0,0	27,9	16740,58	15882,90	3999181,93	475314,47	361723,76	465792,31	426946,58
	12	0,0	19,0	15895,82	15081,42	3797376,08	451329,25	343470,53	442287,60	405402,10

^{8/} (Staffell, 2011)

Descripción del efluente y digestato obtenido

La descripción del efluente y digestato de cada tratamiento se presenta en los cuadros y figuras siguientes:

Cuadro 31. Promedio de los parámetros químicos y biológicos del digestato, parte sólida.

Tratamiento	Descripción	Contenido de H ₂ O Digestato	Carbono	Nitrógeno	C/N	Materia	C-CO ₂ (mg)
			Orgánico	Total		Orgánica Digestato	MO (g) 24 h
			%		-	%	mg/g base seca
1	100% HC	80,93	31,84	4	7,96	57,31	2,01
2	75% HC	84,16	40,43	2,4	16,85	72,77	1,32
3	25% HC	86,24	42,98	2,2	19,54	77,36	0,58
4	0% HC	82,61	43,44	1,55	28,02	78,19	0,72

Cuadro 32. Promedio de los parámetros químicos y biológicos del efluente, parte líquida.

Tratamiento	Descripción	pH	C.E.	Rabanito	Rabanito	Lechuga	Lechuga
		Efluente	Efluente	Germinación	Índice de Germinación	Germinación	Índice de Germinación
			dS/m			%	
1	100% HC	7,3	7,82	0	0	0	0
2	75% HC	7,5	5,98	3,7	0	0	0
3	25% HC	6,96	3,8	0	0	0	0
4	0% HC	7,19	3,25	66,67	11,65	8,33	0,04

Como se puede observar en el Cuadro 31, el porcentaje de MO que queda por degradar es mayor a medida que aumenta el contenido de guano bovino en la mezcla, sin embargo, el nivel de estabilidad biológica indica que la disponibilidad de la MO es menor. Por lo tanto, aunque el contenido de MO del digestato sea menor a medida que aumentan las heces caninas, los tratamientos con mayor proporción de heces caninas poseen un potencial mayor de producción de biogás. Esto es coherente con las estimaciones del potencial de biogás obtenidas con el modelo Luna-delRisco modificado (Figura 14) y con las tendencias observadas en la Figura 9.

De todas formas, los resultados obtenidos del material proveniente de los biodigestores indican que, aunque posee un elevado porcentaje de MO y su relación C/N es aceptable en los tratamientos 1, 2 y 3, el material de todos los tratamientos es altamente fitotóxico y debe ser tratado previamente para ser usado en cultivos. Los valores de pH, CE y desprendimiento de C-CO₂ están dentro de los parámetros de calidad estipulados por la Norma Chilena de Compost NCh 2880 (INN, 2004). Sin embargo, para la relación C/N, el tratamiento 100% HC no alcanza el rango exigido por la norma. El aspecto más crítico se da al evaluar la fitotoxicidad, debido a que ningún tratamiento supera las exigencias de la norma, lo cual debe ser debido al contenido de sustancias orgánicas en suspensión y diluidas en la parte líquida del material residual del proceso de biodigestión.

Análisis estadístico del digestato obtenido

A continuación se presentan análisis de varianza para los datos obtenidos de Materia Orgánica, Estabilidad Biológica, mientras que se realizó una comparación de promedios para otros parámetros.

Porcentaje de Materia Orgánica

Cuadro 33. Análisis de varianza para Porcentaje de Materia Orgánica

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	564,24	3	188,08	67,48	0,00	6,59
Error	11,15	4	2,79			
Total	575,38	7				

Se determinó la importancia de las diferencias entre los tratamientos mediante las pruebas de Tukey y Duncan y sus resultados se pueden apreciar en las siguientes figuras.

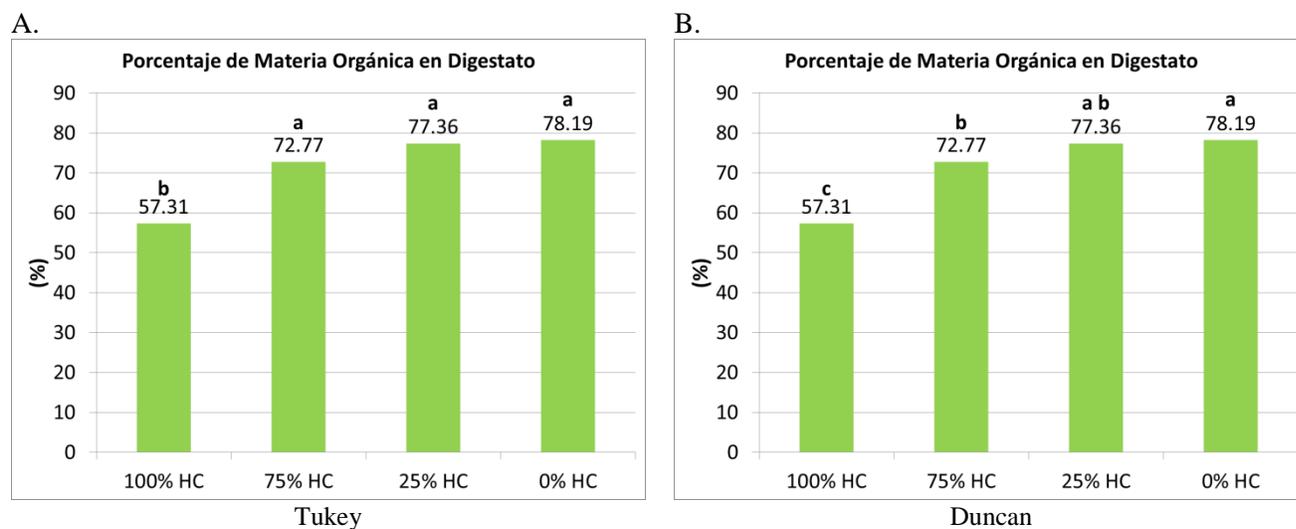


Figura 19. Materia Orgánica del Digestato según Tratamiento.

Estabilidad Biológica

Cuadro 34. Análisis de varianza para Desprendimiento de Carbono

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F	p-valor	F crítico
Tratamientos	3,80	3	1,27	13,72	0,00	4,07
Error	0,74	8	0,09			
Total	4,54	11				

Como se puede observar, existen diferencias de desprendimiento de carbono entre los tratamientos, por lo tanto se realizó la prueba de Tukey. El resultado de esta prueba se presenta en la siguiente figura.

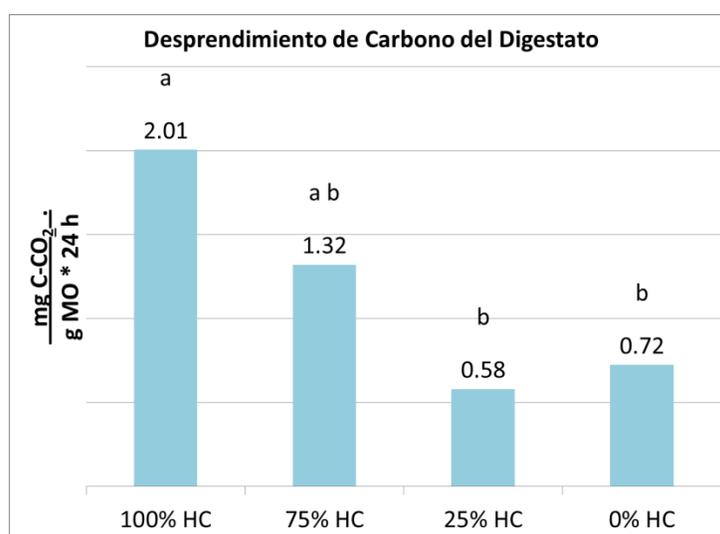


Figura 20. Desprendimiento de Carbono según tratamiento, mediante la Prueba de Tukey.

Potencial de Hidrógeno

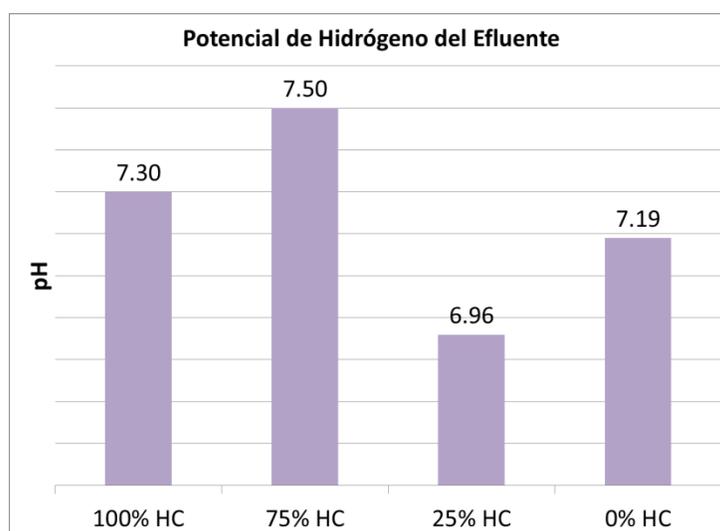


Figura 21. Promedios del Potencial de Hidrógeno del efluente según tratamiento

Conductividad Eléctrica

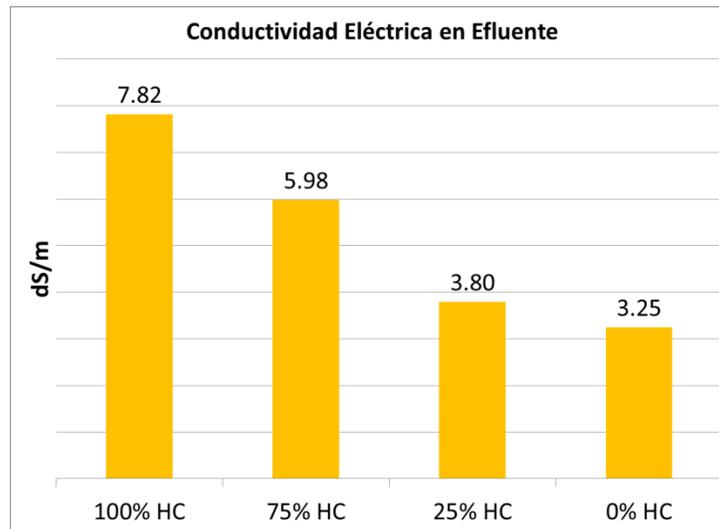
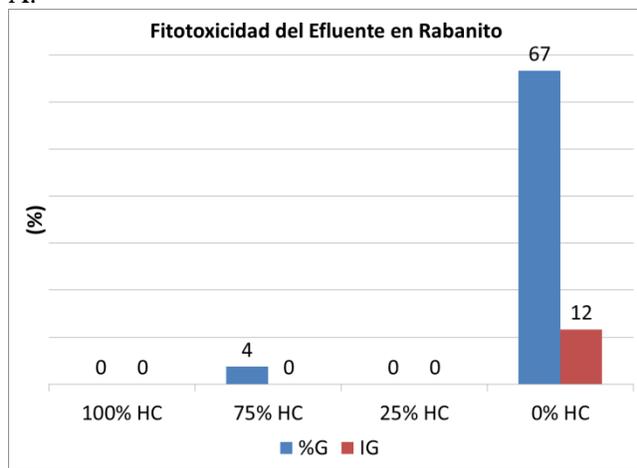


Figura 22. Promedio de la Conductividad Eléctrica según tratamiento

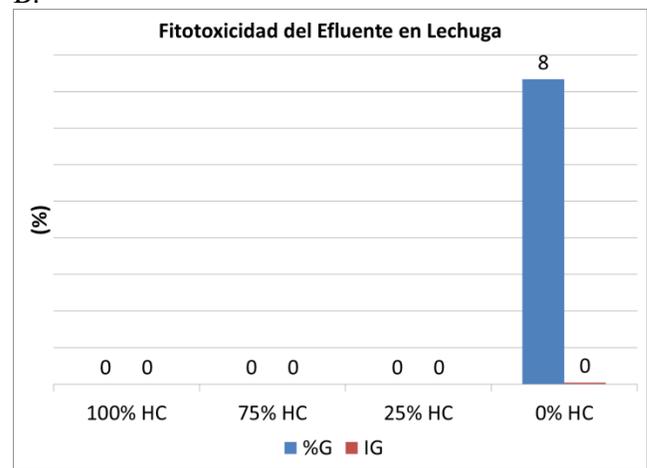
Fitotoxicidad

A.



Rabanito

B.



Lechuga

Figura 23. Promedios de los indicadores de fitotoxicidad del Efluente según tratamiento

Contraste del digestato obtenido con Normas y bienes sustitutos

Se utilizó la Norma Chilena Oficial NCh 2880 (INN, 2004), sobre las especificaciones para compost, para evaluar la calidad del efluente de cada tratamiento. Adicionalmente, se utilizó el índice de germinación (IG), según Zucconi et al. (1981), para evaluar la fitotoxicidad del efluente.

El digestato se genera mediante un proceso anaeróbico, por lo tanto, no puede clasificarse como compost, sin embargo, se utiliza la NCh 2880 como referencia para evaluar si es posible alcanzar calidad de enmienda orgánica de suelos.

Se observa que el digestato no cumple con los requisitos de la NCh 2880, principalmente respecto al parámetro de fitotoxicidad, por lo tanto no puede ser catalogado como enmienda orgánica. Sin embargo, debido a que posee un contenido de nitrógeno interesante, se espera que al ser estabilizado (mediante compostaje y/o vermicompostaje), pueda transformarse en un sustrato con propiedades fertilizantes, que podría ser incorporado al suelo, luego de disminuir la fitotoxicidad al diluirlo o mezclarlo con otro sustrato.

CONCLUSIÓN

En base al análisis de varianza realizado para los volúmenes de biogás estimado, no se puede aseverar estadísticamente que el potencial de las heces caninas es mayor que el del guano bovino, pero si se puede afirmar que las heces caninas aumentan el período para que se inicie la actividad metanogénica.

Sin embargo, el análisis del material residual y la pequeña tendencia observada en los gráficos, permiten afirmar que es posible obtener volúmenes de biogás mayor en la medida que se aumente la proporción de heces caninas en la mezcla que se carga a un biodigestor.

Respecto a la determinación de una proporción óptima para la producción de biogás, se puede decir que, según lo observado en este estudio, una proporción de 25% heces caninas, permite disminuir el tiempo de producción de gas no inflamable hasta niveles similares a los alcanzados por un sustrato 0% heces caninas (sólo guano bovino), sin embargo, las heces caninas le entregarán un potencial mayor de producción de biogás.

Si el objetivo es obtener biogás en el menor tiempo posible, se recomienda aumentar la cantidad de inóculos metanogénicos, lo cual se puede lograr mediante el aumento de guano bovino en la mezcla o agregando un líquido con inóculos (agua de guano bovino o agua de otro biodigestor en funcionamiento). Al contrario, si el tiempo que demore el proceso para generar biogás no es importante, se recomienda usar un sustrato 100% heces caninas, debido a que posee mayor potencial de producción de biogás. Por otro lado, las características microbiológicas de las heces caninas le permiten enfrentar mejor las condiciones de bajas temperaturas, evitando producciones nulas y permitiendo el manejo del proceso a temperaturas bajas, con la disminución de costos que eso significa.

Extrapolando estos resultados y aplicándolos en el uso de biodigestores continuos, se recomienda el uso de una mezcla 25% heces caninas al iniciar el procesos de digestión anaeróbica, para favorecer el desarrollo y aclimatación de los microorganismos metanogénicos. En función del TRH del sistema continuo, podría usarse volúmenes de carga con 100% de heces caninas, con un 8% de ST, debido al mayor potencial que presenta y la resistencia a bajas temperaturas que poseen sus microorganismos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarza, F. y Varnero, M.T. 2011. Evaluación de la producción potencial de biogás a partir de heces caninas. In 62° Congreso Agronómico de Chile 3° Congreso Internacional de Agricultura en Zonas Áridas Resumen de Trabajos. Iquique: Sociedad Agronómica de Chile - Universidad Arturo Prat. p.237. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/117105392/62-Congreso-agronomico-chile>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. and Janssen, R. 2008. Biogas Handbook. Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg. Disponible en: http://www.wip-munich.de/images/stories/6_publications/books/annex2-39_wp4_d4.1_master-handbook.pdf. Visitado el 19 de Noviembre de 2013.
- Canavos, G., 1988. Probabilidad y Estadística Aplicaciones y métodos. McGraw-Hill.
- Corace, J., Aeberhard, M., Martina, P., Ventín, A. y Garcia Solá, E. 2006. Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, (T-034), p.4. Disponible en: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/07-Tecnologicas/2006-T-034.pdf>. Visitado el 19 de Noviembre de 2013.
- Corace, J., Martina, P., García Solá, E. y Aeberhard, M.R. 2010. Optimización del rendimiento de un biorreactor a partir de la utilización de diferentes sustratos orgánicos. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Disponible en: http://www.unne.edu.ar/unnevieja/investigacion/com2010/HA-Web/wHA-007_009.pdf. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. 1st ed. Weinheim: WILEY-VCH. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527621705>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Díaz, M. 2008. Eliminación del sulfuro de hidrógeno en el biogás. Energía y tú, (41). Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo05.htm>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Espinosa, M. d., Lopez, M., Pellón, A., Mayarí, R. y Fernández, A. 2006. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás. Revista CENIC Ciencias Biológicas, 38(1). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221557003>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- FAO. 1992. Biogas processes for sustainable development. Israel: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E00.HTM>. Visitado el 23 de Noviembre de 2013.
- FAO. 2011. Manual de Biogás. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Disponible en: http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual_biogas.pdf. Visitado el 23 de Noviembre de 2013.
- Ibarra, L., Espínola, F. y Echeverría, M. 2006. Una prospección a la población de perros existente en las calles de la ciudad de Santiago, Chile. Avances en Ciencias Veterinarias, 21(1-2), pp.33-39. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/veterinaria/2010/1/CC124/1/material_docente/objeto/12476&ei=cw4DT6StAYXg

- 0QHD14yGAg&usg=AFQjCNHgVZwXuExpe6j7MsYhXG_qrLUHkg&sig2=VK7JEUxW Fzd1vRd5_0QAYw. Visitado el 23 de Septiembre del 2013.
- Ibarra, L., Morales, M.A. y Acuña, P., 2003. Aspectos demográficos de la población de perros y gatos en la ciudad de Santiago, Chile. *Avances en Ciencias Veterinarias*, 18(1-2), pp.13-20. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/animalwelfare/Ibarra_2003_demografia.pdf. Visitado el 1 de Octubre de 2013.
- INN. 2004. *Compost - Clasificación y Requisitos*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. 2010. *Biometano - Especificaciones*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- Luna-delRisco, M., Normak, A. and Orupõld, K. 2011. Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia. *Agronomy Research*, 9(1-2), pp.331-42. Disponible en: <http://agronomy.emu.ee/vol091/p9106.pdf>. Visitado el 2 de Marzo de 2014.
- Martina, P., Garcia Solá, E., Corace, J., Bucki Wasserman, B. y Aeberhard, R. 2007. Análisis cualitativo y cuantitativo de la producción de biogás en un reactor tipo Batch cargado con aserrín de Algarrobo Chasqueño. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, pp.35-39. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2007/2007-t006-a006.pdf>. Visitado el 19 de Noviembre de 2013.
- Okoroigwe, E.C., Ibeto, C.N. and Okpara, C.G. 2010. Comparative study of the potential of dog waste for biogas production. *Trends in Applied Sciences Research*, 5(1), pp.71-77. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3923/tasr.2010.71.77>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Pérez, S. 2010. *Valorización de residuos sólidos de madera en el sector construcción y domiciliario proyecto de título*. Santiago, Chile: Universidad Andrés Bello. Disponible en: <http://www.chileresiduos.cl/chileresiduos/userfiles/file/Valorizaci%C3%B3n%20madera%20RESCON.pdf>. Visitado el 13 de Marzo de 2014.
- Pinilla, J. y Hernández, G. 2010. Poder calorífico de Acacia dealbata Link crecida en Chile. *Ciencia e Investigación Forestal, CIFOR*, 16(3), pp.353-79. Disponible en: <http://biblioteca1.infor.cl:81/DataFiles/26554-2.pdf>. Visitado el 13 de Marzo de 2014.
- Santibáñez, F. y Uribe, J.M., 1990. *Atlas Agroclimático de Chile Regiones V y Metropolitana*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agroclimatología, Depto. de Ingeniería y Suelos.
- Staffell, I. 2011. *The energy and fuel data sheet*. University of Birmingham, U.K., p.1. Disponible en: http://www.claverton-energy.com/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet.pdf. Visitado el 13 de Marzo de 2014.
- Steel, R. y Torrie, J., 1988. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. McGraw-Hill.
- Varnero, M.T., Rojas, C. y Orellana, R. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1), pp.28-37. Disponible en: <http://ref.scielo.org/znkm2x>. Visitado el 23 de Septiembre de 2013.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and De Bertoldi, M., 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22(2), pp.54-57.

ANEXO

Registro de la producción diaria de los biodigestores

Cuadro Anexo 1. Detalle de la producción diaria de los biodigestores

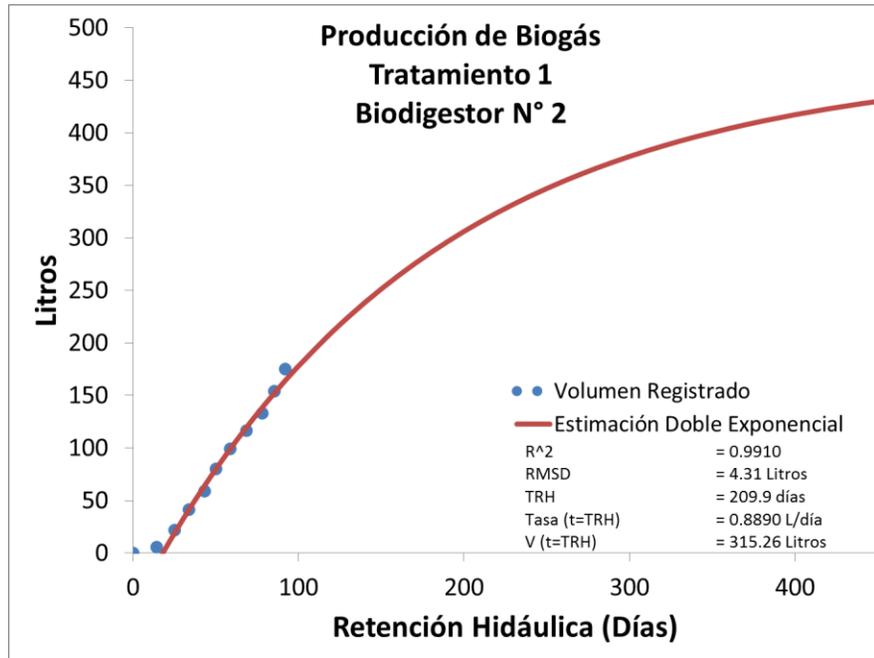
Número de Medición	Días de puesta en marcha	Días con temp. +/-10 °C	Volumen Diario por Tratamiento							
			1		2		3		4	
			B2	B3	B5	B6	B8	B9	B11	B12
	Días		Litro							
1	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
3	2		0,00	0,30	1,10	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
4	3		0,00	0,20	0,80	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
5	4		0,00	0,40	0,60	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
6	5		0,50	1,10	0,60	0,20	0,10	0,20	0,10	0,20
7	6		0,20	0,60	0,90	0,60	0,40	0,30	0,40	0,30
8	7		0,10	0,70	1,00	0,50	0,50	0,40	0,30	0,40
9	8	1	1,00	1,10	1,60	1,20	1,30	0,80	1,20	1,20
10	9		1,40	1,80	2,90	1,10	0,90	1,00	1,10	1,00
11	10		0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,10	0,20
12	11		0,70	0,70	0,60	1,10	1,40	1,00	1,60	1,90
13	12	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	13		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	14	1	1,30	1,30	1,40	1,50	1,70	1,40	2,40	2,10
16	15		1,60	1,60	1,70	1,40	2,30	1,50	0,90	2,40
17	16		1,10	1,10	1,10	1,30	2,10	1,60	1,30	2,10
18	17		0,50	0,70	0,60	1,10	2,10	1,30	1,20	2,00
19	19	1	1,40	1,70	1,00	2,00	4,20	1,30	1,80	3,80
20	20		1,50	2,50	1,70	1,90	6,80	1,00	2,10	4,80
21	21		1,20	1,90	0,90	2,20	4,60	0,80	0,90	3,10
22	22		1,50	2,20	1,00	2,00	4,60	1,00	1,50	3,10
23	23		1,80	2,20	1,00	1,80	4,10	0,80	1,80	2,90

Número de Medición	Días de puesta en marcha	Días con temp. +/-10 °C	Volumen Diario por Tratamiento							
			1		2		3		4	
			B2	B3	B5	B6	B8	B9	B11	B12
Días		Litro								
24	24		2,50	3,70	1,40	2,20	7,70	1,30	2,40	3,90
25	25		3,20	4,00	2,00	2,00	7,80	1,10	2,60	3,10
26	26		2,80	4,30	2,00	2,00	6,60	1,20	2,40	2,90
27	27		2,70	4,50	3,30	2,20	6,90	1,00	2,50	2,80
28	28		2,80	4,40	4,10	2,20	7,40	1,10	2,80	3,90
29	30		2,90	3,80	3,60	1,90	5,20	0,90	2,00	3,30
30	31		3,90	5,10	4,00	2,00	4,70	1,30	2,30	3,00
31	33		2,70	3,90	3,40	2,10	6,20	1,70	2,70	5,00
32	34		2,80	4,10	2,80	2,10	6,30	0,90	2,90	1,90
33	35	1	3,00	3,50	0,70	1,80	2,20	0,60	0,70	0,40
34	36	1	1,50	2,50	0,10	0,30	1,30	0,80	0,00	0,80
35	37	1	0,30	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	38		2,40	4,20	3,30	1,90	4,50	1,50	2,60	3,00
37	41		2,70	3,70	2,60	2,00	7,30	1,30	1,80	4,90
38	42		3,20	5,80	4,20	3,00	7,50	1,70	2,60	3,10
39	43		3,00	4,10	4,30	2,60	7,30	1,60	2,50	2,90
40	44		3,10	5,50	5,30	2,90	5,20	1,60	2,00	2,50
41	45		3,70	5,70	5,20	3,10	4,90	1,70	2,60	2,20
42	47		2,60	4,50	3,30	1,90	6,70	1,30	2,80	3,50
43	48		3,30	4,00	4,00	2,00	4,20	1,90	1,60	2,10
44	49		4,60	4,70	4,50	2,10	3,30	2,60	0,60	1,40
45	50		4,00	5,40	4,90	2,70	4,80	1,90	2,00	2,00
46	51		3,60	5,30	4,10	2,50	4,70	1,90	1,70	2,10
47	54		3,10	4,20	3,40	2,30	6,20	1,20	2,40	5,00
48	56		4,20	5,40	4,70	2,20	7,60	1,70	2,80	3,80
49	57		2,80	5,00	4,10	2,10	5,00	1,00	1,80	2,40
50	58		4,90	5,20	4,90	2,10	3,80	1,90	1,40	1,90
51	61		3,60	4,80	4,90	2,40	6,60	2,40	2,40	4,90
52	64		3,30	5,40	4,90	2,90	7,30	1,70	2,80	5,60
53	65		4,50	4,00	4,60	1,60	2,00	1,90	0,90	2,00
54	66	1	3,90	2,70	2,80	0,80	1,40	0,50	0,00	1,50
55	68	1	2,30	2,90	1,20	0,50	0,80	0,50	0,00	0,70
56	69	1	1,70	0,70	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00

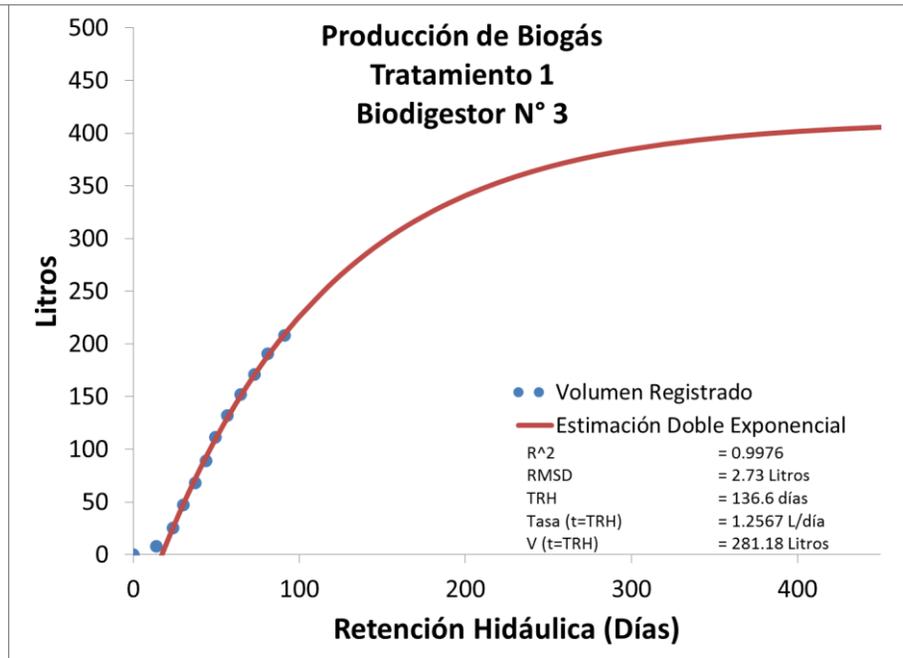
Número de Medición	Días de puesta en marcha	Días con temp. +/-10 °C	Volumen Diario por Tratamiento									
			1		2		3		4			
			B2	B3	B5	B6	B8	B9	B11	B12		
Días		Litro										
57	70	1	1,40	1,10	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
58	71		4,10	5,00	5,00	2,30	3,20	2,40	2,30	3,00		
59	72		3,80	3,70	3,20	1,60	1,70	1,60	1,10	1,70		
60	76		1,70	4,00	3,80	2,10	6,10	2,00	1,70	5,70		
61	77	1	2,20	4,70	2,90	2,20	2,70	2,20	1,20	2,90		
62	79		4,70	5,00	4,40	2,50	2,70	2,80	1,60	3,10		
63	80	1	2,20	4,80	4,00	2,20	2,10	2,60	1,00	2,50		
64	82		3,50	4,60	3,90	2,50	2,40	3,30	1,30	2,80		
65	83		3,60	2,50	4,10	1,90	1,70	2,00	0,80	2,00		
66	84		3,20	2,70	4,90	2,20	1,70	2,00	1,00	1,90		
67	85		4,60	2,10	4,30	1,90	1,60	1,90	1,10	1,90		
68	86		4,40	1,70	4,50	1,70	1,50	1,10	0,90	1,30		
69	87		4,60	2,00	3,50	2,30	2,30	2,20	1,20	2,40		
70	90		4,00	2,40	4,20	3,00	2,90	3,20	2,10	2,90		
71	91		4,90	1,50	5,00	2,30	2,30	2,10	1,10	2,40		
72	92		5,20	1,90	5,10	2,40	1,90	2,30	0,90	1,70		
73	93		1,70	0,50	4,30	1,30	0,50	0,70	1,10	0,50		
74	94		4,40	0,90	4,50	1,20	0,80	1,20	0,70	1,00		
75	97		5,00	2,00	5,20	3,00	2,00	2,90	1,90	2,50		

Ajuste de curva para los datos registrados, usando el modelo Luna-delRisco modificado

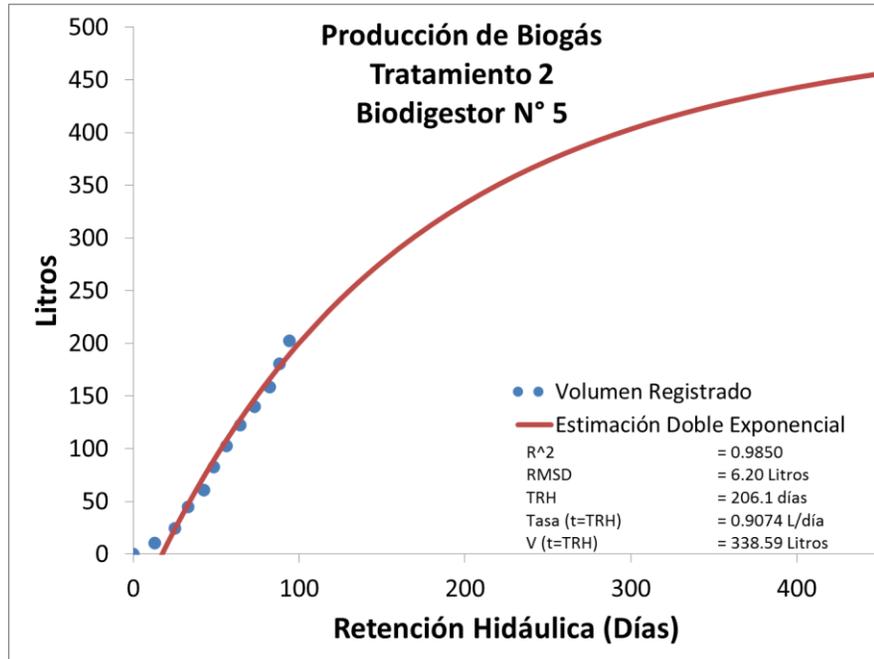
A.



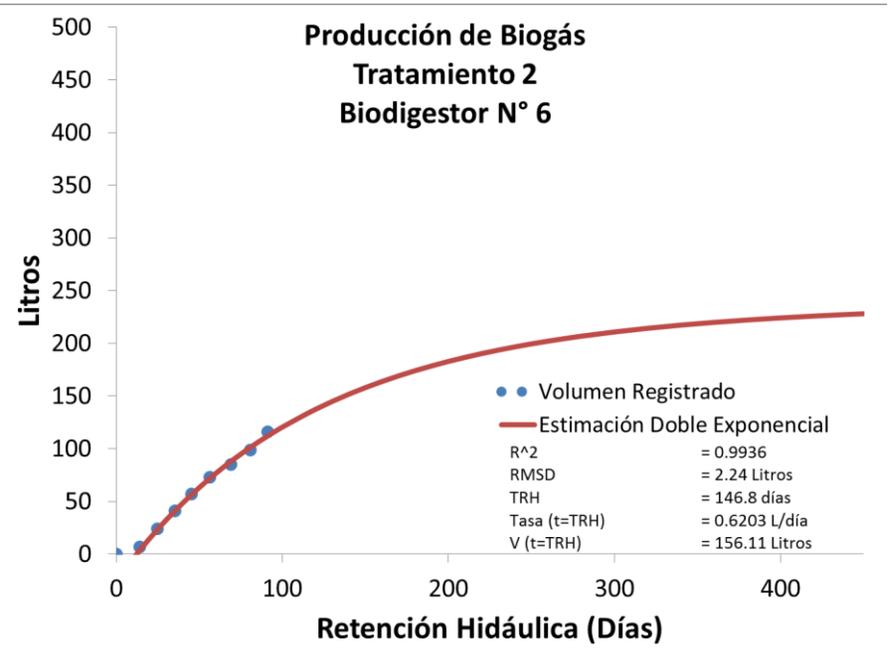
B.



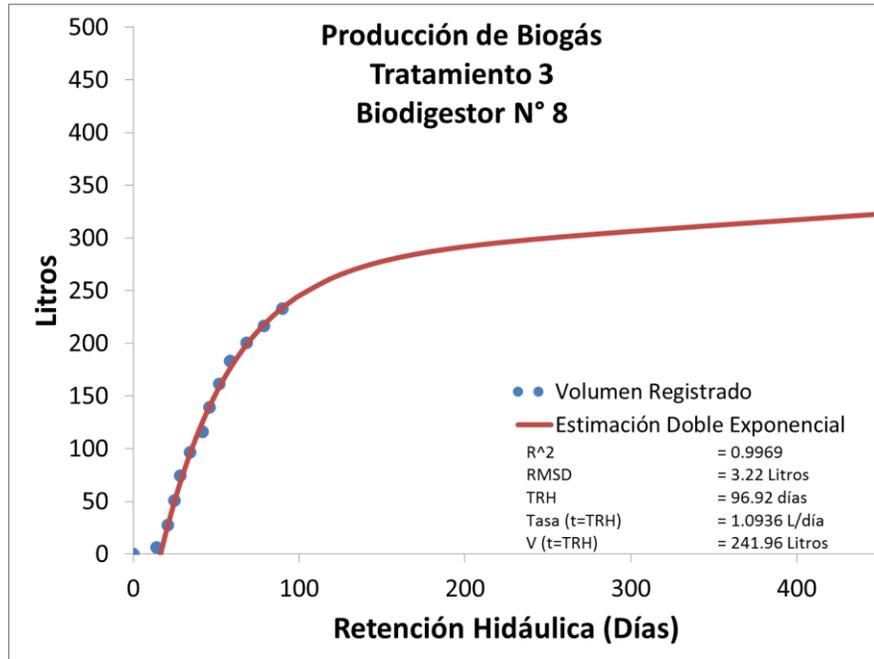
C.



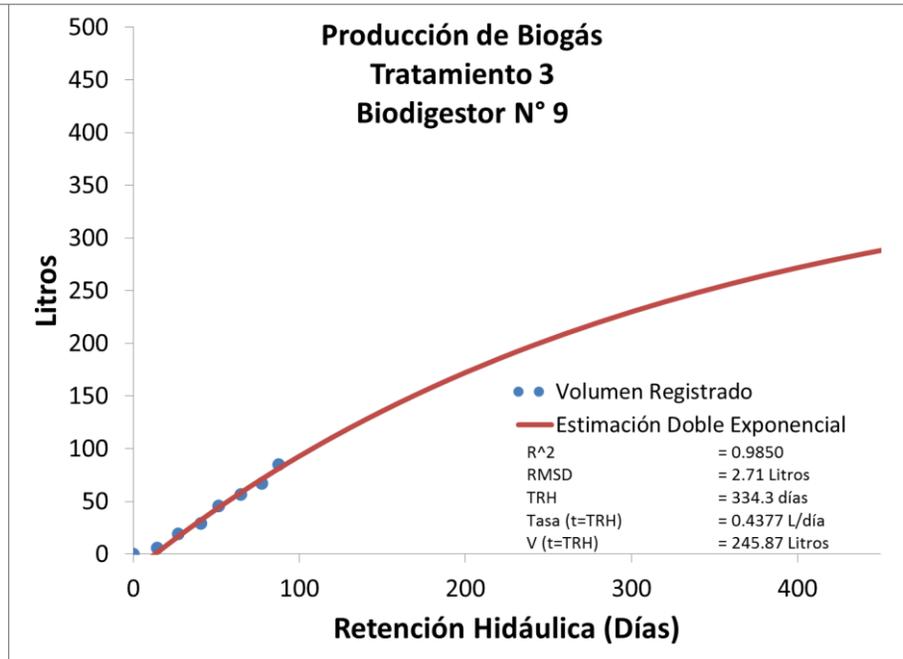
D.



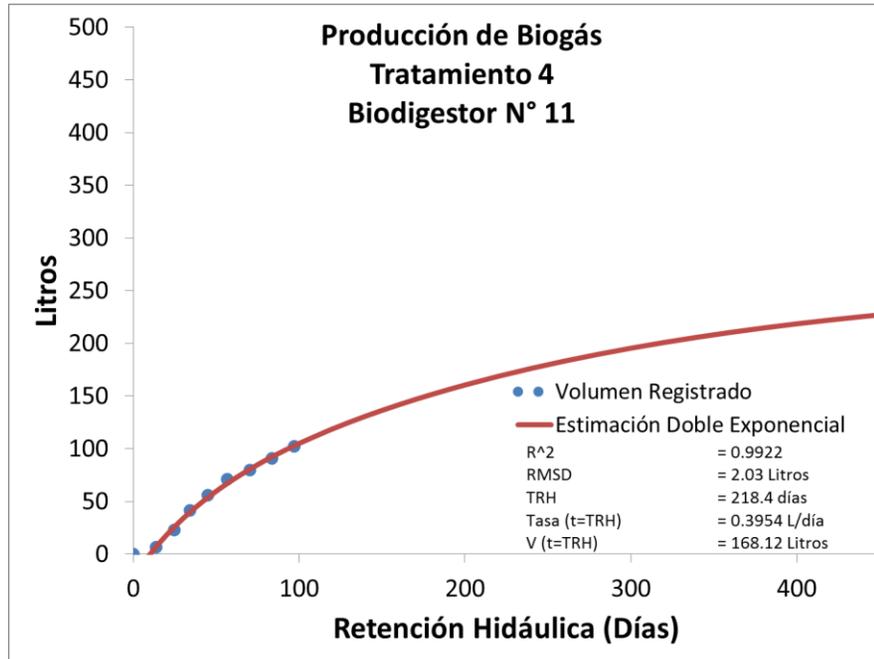
E.



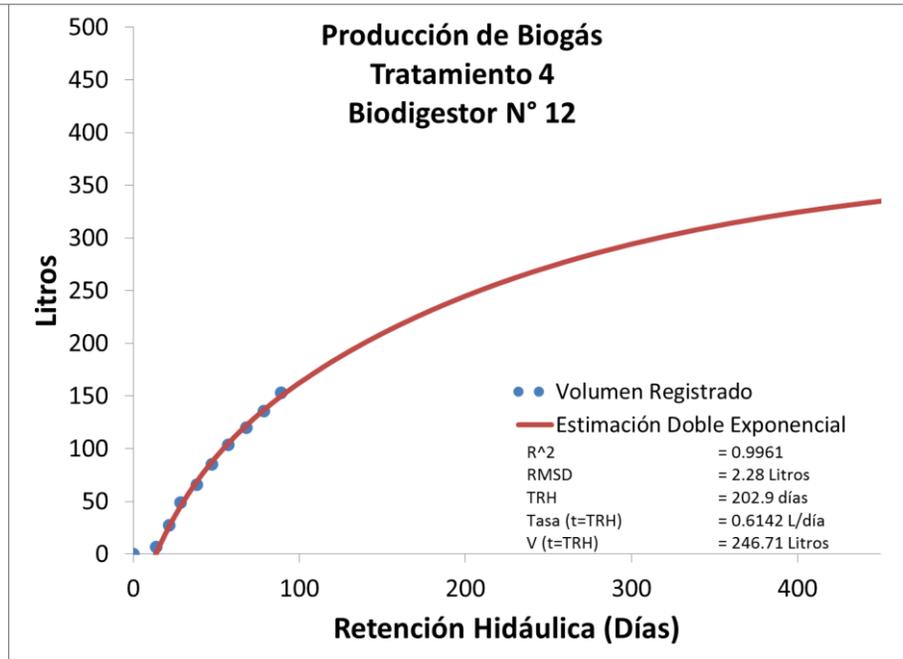
F.



G.



H.



Resumen de las estimaciones usando la modificación del modelo doble exponencial.

Cuadro Anexo 2. Resultado de las estimaciones usando el modelo doble exponencial.

Tratamiento	Descripción Tratamiento	N° BD	Volumen medido	Biogás al TRH estimado	TRH est.	Tasa de Producción al TRH estimado	Rendimiento Biogás al TRH est	Rendimiento Metano al TRH est
			Litro		días	L/día	L/kg MO	
1	100% HC	2	186,60	315,26	210	0,89	110,25	60,56
		3	213,30	281,18	137	1,26	98,33	59,26
2	75% HC	5	207,40	338,60	206	0,91	116,88	67,39
		6	123,60	156,11	147	0,62	53,89	35,03
3	25% HC	8	240,60	241,97	97	1,09	83,39	46,14
		9	96,80	245,87	334	0,44	84,74	48,31
4	0% HC	11	102,30	168,12	218	0,40	55,08	32,08
		12	162,20	246,72	203	0,61	80,82	44,70

Cuadro Anexo 2. Resultado de las estimaciones usando el modelo doble exponencial (continuación).

Tratamiento	Descripción Tratamiento	N° BD	Volumen Medido	Biogás Teórico	Rendimiento tasa=0,1	Tiempo Final
			97 días	tasa=0,1	tasa=0,1	tasa=0,1
			Litro		L/kg MO	días
1	100% HC	2	186,60	450,37	77,18	584
		3	213,30	401,69	68,83	400
2	75% HC	5	207,40	483,71	81,82	631
		6	123,60	223,02	37,72	388
3	25% HC	8	240,60	345,67	58,37	674
		9	96,80	351,25	59,32	795
4	0% HC	11	102,30	240,17	38,55	555
		12	162,20	352,45	56,58	577