



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN  
DE ENERGÍA, A PARTIR DE LOS DESECHOS  
ORGÁNICOS DEL GANADO DEL RANCHO “LOS  
DOS HERMANOS”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:**

**JUAN CARLOS ESPINAL ARELLANO**

**ASESOR:**

**DR. VÍCTOR HUGO HERNÁNDEZ GÓMEZ**

**COASESOR:**

**ING. OMAR OLVERA GARCÍA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR ROSALES  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA, A PARTIR DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL GANADO DEL RANCHO "LOS DOS HERMANOS"**

Que presenta el pasante: **JUAN CARLOS ESPINAL ARELLANO**  
Con número de cuenta: **41200688-7** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"**  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 09 de enero de 2017.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                     | NOMBRE                                  | FIRMA |
|---------------------|---|-------|
| <b>PRESIDENTE</b>   | Ing. Juan De la Cruz Hernández Zamudio  |       |
| <b>VOCAL</b>        | Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez    |       |
| <b>SECRETARIO</b>   | Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez         |       |
| <b>1er SUPLENTE</b> | M. en I. Andres Alfonso Andrade Vallejo |       |
| <b>2do SUPLENTE</b> | Ing. Gilberto Chavarria Ortiz           |       |

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).  
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.  
(Art 127 REP)  
LMCF/ntm\*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios Padre, por ser la luz en mi camino, la esperanza de cada día y el consuelo en los momentos difíciles; así como por haberme permitido lograr todo cuanto me he propuesto, pues en su amor todo es posible. Gracias, abba.

A Jesús, mi buen amigo y buen pastor, quien es la palabra y el camino. Por enseñarme que la fe es alimento del alma, y el amor alimento de la vida. Es, en verdad, mi ejemplo a seguir, aún a sabiendas de que Él es el hombre más grande en la historia de la humanidad, y yo, el más pequeño de todos. Gracias por enseñarme a amar al mundo, gracias por amarme. Gracias, Rabbí.

Al Espíritu Santo, por inspirarme cuando lo he suplicado, lo que debo pensar y lo que debo decir. Por darme agudeza para entender, capacidad para retener, método y facultad para aprender y sutileza para interpretar. Gracias, Espíritu de Amor.

A mi padre y mejor amigo, José Juan, por enseñarme que la vida sabe mejor con una gran sonrisa, por brindarme siempre sus sabios consejos y su apoyo incondicional. Sería un gran honor y una bendición llegar a ser la mitad de buen hombre y padre de lo que él es.

A la mujer que siempre ha creído en mí y a quien siempre amaré: mi madre, Lourdes. He de recordar toda mi existencia su admirable capacidad de pensar antes en los otros y después en uno mismo, de ser fuerte ante la adversidad y conservar un corazón lleno de amor.

A mi hermana, Laura Guadalupe, por su amistad y amor. Por mostrarme día con día que todo depende del cristal con que se mire. Sé que cuento con ella, y ella sabe que siempre estaré ahí para ella.

A mis asesores, profesores y amigos, el Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez y el Ing. Omar Olvera García. De ellos aprendí mucho acerca de ciencia e ingeniería, pero también de la vida. Sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

A mis profesores de mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México; así como de mi segunda casa, la Universidad Nacional de Colombia.

A mis amigos y compañeros de la carrera y del Laboratorio de Investigación en Energías Renovables, a quienes considero mis hermanos. De ellos me llevo un sinnúmero de aprendizajes y anécdotas que siempre me alegraré de recordar.

A mis tíos y primos, por ser mis amigos y compañeros de mil aventuras. Por creer siempre en mí y alentarme para alcanzar mis sueños. Por todas sus enseñanzas y cariño. Por todas las sonrisas y charlas. Por todo lo que hemos vivido.

A la familia Luna Soto, mis grandes amigos. Por abrirme las puertas de su vida y del Rancho “Los Dos Hermanos”. A Don Rubén, Don Cirilo y Don Jorge, quienes con una interminable paciencia y disposición, me apoyaron incondicionalmente en todas las labores concernientes al establo, especialmente con la recolección de los desechos orgánicos. A Doña Carmen, quien me facilitó toda la información relativa al rancho que fue necesaria para la elaboración de esta tesis.

A la MVZ Blanca Estela Luna Soto, por quien siento una gran admiración y respeto. Sin su apoyo incondicional y su filosofía llena de esperanza y lucha, ni esta tesis ni yo seríamos lo que somos.

## DEDICATORIA

A Dios. Como una muestra de mi infinito amor y agradecimiento por todo cuanto hizo, está haciendo y hará por mí. Este es el fruto de más de un año de trabajo duro y esfuerzo, de días sin descanso y noches sin sueño. Es el más grande de mis proyectos y por ello lo entrego humildemente a Dios, para gloria, alabanza y santificación de su nombre.

¡Alabado seas, Dios mío!

“¡Así amó Dios al mundo! Le dio al Hijo Único, para que quien cree en Él no se pierda, sino que tenga vida eterna”.

Juan 3:16.

“El Señor es mi pastor: nada me falta;  
en verdes pastos Él me hace reposar.  
A las aguas de descanso me conduce,  
y reconforta mi alma.  
Por el camino del bueno me dirige,  
por amor de su nombre”.

Salmo 23:1-3.

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| Resumen .....  | 10        |
| Introducción.....  | 11        |
| Objetivo general .....                                       | 18        |
| Objetivos particulares .....                                 | 18        |
| Metodología de la investigación.....                         | 19        |
| <b>Capítulo 1. Conceptos generales.....</b>                  | <b>20</b> |
| 1.1 Biogás y biomasa.....                                    | 20        |
| 1.2 Composición del biogás.....                              | 20        |
| 1.3 Características del biogás .....                         | 21        |
| 1.4 Digestión de materia orgánica .....                      | 21        |
| 1.4.1 Digestión aeróbica .....                               | 22        |
| 1.4.2 Digestión anaeróbica .....                             | 22        |
| 1.4.2.1 Etapas de la digestión anaeróbica.....               | 22        |
| 1.4.2.1.1 Hidrólisis .....                                   | 23        |
| 1.4.2.1.2 Acidogénesis.....                                  | 23        |
| 1.4.2.1.3 Acetogénesis.....                                  | 24        |
| 1.4.2.1.4 Metanogénesis .....                                | 24        |
| 1.4.2.2 Tipos de digestión anaeróbica .....                  | 24        |
| 1.4.2.2.1 Fermentación anaeróbica.....                       | 25        |
| 1.4.2.2.2 Respiración anaeróbica.....                        | 25        |
| 1.5 Factores determinantes en la producción del biogás ..... | 26        |
| 1.5.1 Composición de la biomasa.....                         | 26        |
| 1.5.2 Relación Carbono/Nitrógeno de la biomasa.....          | 29        |
| 1.5.3 Temperatura.....                                       | 30        |
| 1.5.4 pH del sustrato .....                                  | 32        |
| 1.5.5 Masa seca.....   | 33        |
| 1.5.6 Masa volátil .....                                     | 36        |
| 1.6 Biodigestores .....                                      | 36        |
| 1.6.1 Clasificación de los biodigestores .....               | 37        |
| 1.6.1.1 Por su régimen de carga y descarga.....              | 37        |
| 1.6.1.1.1 Biodigestores continuos.....                       | 37        |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.6.1.1.1 Biodigestores de mezcla completa .....      | 37        |
| 1.6.1.1.1.2 Biodigestores tipo flujo de pistón.....   | 39        |
| 1.6.1.1.2 Biodigestores semi – continuos .....        | 40        |
| 1.6.1.1.2.1 Biodigestores de tipo chino .....         | 40        |
| 1.6.1.1.2.2 Biodigestores de tipo hindú .....         | 41        |
| 1.6.1.1.3 Biodigestores discontinuos .....            | 41        |
| 1.6.1.2 Por su orientación.....                       | 43        |
| 1.6.1.2.1 Biodigestores horizontales.....             | 43        |
| 1.6.1.2.2 Biodigestores verticales.....               | 44        |
| 1.6.1.3 Por su ubicación en el terreno.....           | 45        |
| 1.6.1.3.1 Biodigestores al aire libre .....           | 45        |
| 1.6.1.3.2 Biodigestores semi – subterráneos .....     | 46        |
| 1.6.1.3.3 Biodigestores subterráneos .....            | 46        |
| 1.6.2 Parámetros de funcionamiento .....              | 47        |
| 1.6.2.1 Carga orgánica.....                           | 47        |
| 1.6.2.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH) .....    | 48        |
| 1.6.2.3 Nivel de llenado del biodigestor.....         | 49        |
| 1.6.2.4 Nivel de llenado del depósito de biogás ..... | 50        |
| <b>Capítulo 2. Pruebas experimentales.....</b>        | <b>51</b> |
| 2.1 Preparación de los biodigestores .....            | 52        |
| 2.1.1 Evaluación inicial .....                        | 52        |
| 2.1.2 Sustitución de válvulas y termopares .....      | 53        |
| 2.1.3 Identificación y sellado de fugas .....         | 54        |
| 2.1.4 Evaluación final.....                           | 56        |
| 2.2 Recolección de muestras de excremento .....       | 57        |
| 2.2.1 Limpieza del establo.....                       | 57        |
| 2.2.2 Captación de las muestras.....                  | 57        |
| 2.3 Determinación de la masa seca.....                | 58        |
| 2.3.1 Pesaje de las muestras frescas .....            | 58        |
| 2.3.2 Horneado .....                                  | 59        |
| 2.3.3 Pesaje de las muestras secas .....              | 59        |
| 2.3.4 Cálculos .....                                  | 60        |



|   |           |
|---|-----------|
| 2.4 Determinación de la masa volátil .....                    | 61        |
| 2.4.1 Pesaje las muestras secas .....                         | 61        |
| 2.4.2 Incineración .....                                      | 61        |
| 2.4.3 Pesaje de las muestras incineradas .....                | 62        |
| 2.4.4 Cálculos .....  | 62        |
| 2.5 Determinación de la densidad del excremento .....         | 63        |
| 2.5.1 Pesaje de las muestras frescas .....                    | 63        |
| 2.5.2 Determinación del volumen del recipiente .....          | 64        |
| 2.5.3 Cálculos .....  | 66        |
| 2.6 Determinación de la concentración del sustrato .....      | 66        |
| 2.6.1 Cálculos .....  | 67        |
| 2.7 Llenado de los biodigestores .....                        | 75        |
| 2.7.1 Dosificación de la materia prima .....                  | 75        |
| 2.7.2 Mezclado .....  | 76        |
| 2.7.3 Sellado de los biodigestores .....                      | 76        |
| 2.8 Toma de mediciones .....                                  | 77        |
| 2.8.1 Mediciones de presión .....                             | 77        |
| 2.8.2 Mediciones de temperatura .....                         | 79        |
| 2.8.3 Mediciones de contenido de CH <sub>4</sub> .....        | 80        |
| 2.8.4 Mediciones de pH .....                                  | 82        |
| 2.9 Vaciado de los biodigestores .....                        | 83        |
| 2.9.1 Apertura de los biodigestores .....                     | 83        |
| 2.9.2 Vaciado .....   | 83        |
| 2.9.3 Limpieza .....  | 84        |
| <b>Capítulo 3. Análisis de resultados. ....</b>               | <b>85</b> |
| 3.1 Presión acumulativa .....                                 | 87        |
| 3.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás ..... | 89        |
| 3.3 pH del sustrato .....                                     | 94        |
| 3.4 Porcentaje de metano en el biogás .....                   | 95        |
| 3.5 Digestato .....   | 96        |
| 3.6 Litros de biogás generado .....                           | 99        |
| 3.7 Litros de metano producido .....                          | 105       |

|  |            |
|--|------------|
| 3.8 Litros de metano/kg de excreta.....                            | 108        |
| 3.9 Energía obtenible.....   | 111        |
| <b>Conclusiones.....</b>   | <b>123</b> |
| Referencias .....  | <b>125</b> |
| Bibliografía y fuentes digitales.....                              | <b>128</b> |
| <b>Apéndice 1. Gráficas complementarias. ....</b>                  | <b>130</b> |
| Ap.1.1 Sustratos a base de excretas de cerdo .....                 | 130        |
| Ap.1.1.1 Presión acumulativa.....                                  | 130        |
| Ap.1.1.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás ..... | 131        |
| Ap.1.1.3 pH de los sustratos .....                                 | 132        |
| Ap.1.1.4 Porcentaje de metano en el biogás.....                    | 133        |
| Ap.1.1.5 Producción semanal de biogás.....                         | 134        |
| Ap.1.1.6 Producción semanal de metano .....                        | 135        |
| Ap.1.2 Sustratos a base de excretas de vaca.....                   | 136        |
| Ap.1.2.1 Presión acumulativa.....                                  | 136        |
| Ap.1.2.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás ..... | 137        |
| Ap.1.2.3 pH de los sustratos.....                                  | 138        |
| Ap.1.2.4 Porcentaje de metano en el biogás.....                    | 139        |
| Ap.1.2.5 Producción semanal de biogás.....                         | 140        |
| Ap.1.2.6 Producción semanal de metano .....                        | 141        |
| Ap.1.3 Sustratos a base de excretas de caballo.....                | 142        |
| Ap.1.3.1 Presión acumulativa.....                                  | 142        |
| Ap.1.3.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás ..... | 143        |
| Ap.1.3.3 pH de los sustratos .....                                 | 144        |
| Ap.1.3.4 Porcentaje de metano en el biogás.....                    | 145        |
| Ap.1.3.5 Producción semanal de biogás.....                         | 146        |
| Ap.1.3.6 Producción semanal de metano .....                        | 147        |
| Ap.1.4 Sustratos a base de mezclas de excretas .....               | 148        |
| Ap.1.4.1 Presión acumulativa.....                                  | 148        |
| Ap.1.4.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás ..... | 149        |
| Ap.1.4.3 pH de los sustratos .....                                 | 150        |
| Ap.1.4.4 Porcentaje de metano en el biogás.....                    | 151        |

|   |     |
|---|-----|
| Ap.1.4.5 Producción semanal de biogás.....  | 152 |
| Ap.1.4.6 Producción semanal de metano ..... | 153 |

## Resumen

En el rancho “Los Dos Hermanos” se produce diariamente una cantidad considerable de excretas de vaca, cerdo y caballo, que en conjunto superan los 180 kg de estiércol. Actualmente, estos desechos son empleados como fertilizante, desaprovechando el potencial energético de las excretas y causando molestias como mal olor, ya que son almacenadas al aire libre.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo estimar el potencial de energía que es posible obtener a partir del biogás producido por los desechos orgánicos de cerdo, vaca y caballo, del rancho “Los Dos Hermanos”; para lo cual se llevó a cabo una serie de procedimientos experimentales entre los cuales se incluye la determinación de parámetros como masa seca y volátil de las excretas empleadas, así como la obtención y análisis de biogás a partir de 12 sustratos distintos.

Entre los resultados más destacables se encuentra la obtención de 18.2 litros de metano por kilogramo de estiércol de vaca y la producción de 13.8 litros de metano por kilogramo de excremento de vaca, caballo y cerdo. Tomando en cuenta estos resultados y la cantidad de excretas producidas diariamente en el rancho “Los Dos Hermanos”, se podría obtener el equivalente a 1748.5 kWh cada bimestre y 1530.1 kWh por bimestre, respectivamente.

Con base en estos resultados se ejemplificó el cálculo del potencial de la energía eléctrica generable para autoabastecimiento del rancho “Los Dos Hermanos”, obteniendo como resultado una capacidad de generación cuatro veces mayor al consumo promedio del rancho.

## Introducción

El ser humano depende de equipos que requieren de electricidad para su funcionamiento a modo de cubrir sus necesidades, lo cual ha causado la necesidad de generar electricidad con recursos naturales. Según el Balance Nacional de Energía (SENER, 2015), en México más del 90% de la generación de electricidad se realiza a través de quema de combustibles, lo que ha originado una gran cantidad de gases de efecto invernadero, mismos que crean problemas en nuestro medio ambiente.

Por tal motivo, es necesario buscar alternativas que permitan generar electricidad sin emitir gases de efecto invernadero. Una opción para ello puede ser la utilización del metano contenido en el biogás, recurso energético que ha sido empleado a gran escala en mataderos, granjas y rellenos sanitarios en países desarrollados.

A nivel mundial se han realizado diversos estudios y propuestas, entre las cuales se encuentran:

Amarely y Pound (1980) observaron que la variación en la alimentación de dos novillos (hierba/melaza o caña de azúcar picada) puede influenciar en la generación de metano. Encontraron que la dieta a base de melaza/hierba produce mayor cantidad de metano y sugieren que esto es debido a que se tiene una mayor relación carbono - nitrógeno que la dieta a base de caña de azúcar.

San Thy, Preston y Ly (2003) observaron la producción de biogás, mediante la descomposición de materia fecal de cerdo, con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días en biodigestores continuos de 510 litros. En el primer experimento, la cantidad de materia fecal fue de 5.1 kg/día, mezclado con 46, 20 o 12 litros de agua con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días respectivamente. En un segundo experimento las proporciones de materia fecal y agua se mantuvieron constantes para dar un contenido de sólidos totales de 60 g/litro. Obtuvieron una producción de 1.04, 1.20 y 1.12 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de efluente y que el tiempo de retención óptimo está entre 10 y 20 días.

K. J. Chae y et al (2008) observaron el comportamiento de la generación de biogás al variar la temperatura del estiércol de cerdo en el proceso de degradación. Tomaron valores de 25 °C, 30 °C y 35 °C con cuatro cargas de alimentación al 5 %, 10 %, 20 % y 40 %. Observaron una reducción en la concentración de metano del 3% entre el de la temperatura de 35 °C y la de 30

°C y una diferencia del 17.4 % entre la de 35 °C y el de 25 °C. Obtuvieron valores de 327, 389 y 403 ml de CH<sub>4</sub>/g de sustrato respectivamente.

Lansing, Botero y Jay (2008) estudiaron siete biodigestores de bajo costo en Costa Rica empleando como sustrato al agua residual de los animales, y encontraron que se podía obtener biogás con una concentración del 66% de metano mejorando la calidad de las aguas residuales para ganado.

Atem, Indiveri y Llamas (2010) llenaron 20 biodigestores discontinuos de PET con capacidad de 4 litros con residuos de tomate de la industria local y fluido ruminal como inóculo. Después de mantener la temperatura constante durante 118 días iniciaron la medición del biogás generado durante otros 34 días, obteniendo 0.10 m<sup>3</sup> de biogás por kg con un 50% de metano.

Ferrer y et al (2011) estudiaron la producción de biogás en digestores domésticos ubicados a gran altura, operando bajo condiciones psicrófilas. Utilizaron un volumen útil de estiércol de vaca entre 2.4 m<sup>3</sup> y 7.5 m<sup>3</sup> en pruebas de 60 y 90 días. Obtuvieron temperaturas entre 20°C y 25°C y una producción de 0.35 m<sup>3</sup> por kg, con una concentración del 65% de CH<sub>4</sub>.

Lee, Hyub y Lee (2012) encontraron que se incrementaba la generación de biogás, a partir de la fermentación de Laminaria japónica, al emplear un cultivo mixto de Clostridium butyricum y Erwinia tasmaniensis, llegando a tener niveles de hidrógeno y metano de 327,47% y 354,99% respectivamente.

Ak y et al (2013) realizaron un estudio en el cual duplicaron la producción de biogás que se genera por la degradación anaeróbica del lodo activado producido durante el tratamiento biológico de residuos líquidos y sólidos, al combinar el proceso de degradación con un tratamiento moderado con ozono (1.33 mg O<sub>3</sub>/g).

González y et al (2013) realizaron un estudio para determinar la capacidad de una planta de generación de energía eléctrica empleando metano generado por la degradación de residuos de cerdo y una planta fotovoltaica. Realizaron experimentos con tres biodigestores continuos alimentándolos con 150, 200 y 250 ml de sustrato al día, durante 40, 30 y 24 días respectivamente. Encontraron una producción máxima de 22.53 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de sustrato, con un contenido de metano del 75%.

Vera y et al (2014) estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de las excretas de ganado bovino y porcino de la región de Ciénega de Chapala, Michoacán. Basándose en censos del INEGI y valores promedio calcularon la cantidad total de estiércol y de biogás obtenibles, así como la energía eléctrica generable a partir de la misma. Los resultados suponen un ahorro de energía eléctrica del 4.3%, equivalente para 2013 a \$MX 18,300,000 tomando como base un costo de \$MX 2.236/kWh.

Vera y et al (2015) estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos urbanos que permita generar energía eléctrica para la región de Ciénega de Chapala, Michoacán.

González y González (2014) realizaron pruebas de producción de biogás con diversos sustratos, cuyos resultados resaltan que los desechos orgánicos del conejo alcanzan concentraciones de metano superiores al 70%, en tanto que la poda de pasto y desechos de comida la producción fue mínima. Adicionalmente, los investigadores señalan que los desechos de conejo lograron producir 0.708 litros de biogás por cada kilogramo de excremento, en tanto que los desechos de vaca alcanzaron una producción de 0.26 L/kg, con porcentajes de metano similares a los alcanzados por el biogás producido por los desechos cunícolas.

Abdeshahian y et al (2016) determinaron que en el año 2012 el potencial de generación de biogás a partir de estiércol, sangre y contenido de rumen obtenidos de granjas y mataderos de Malasia era de 4589.49 millones de metros cúbicos por año, con lo cual se podría generar  $8.27 \times 10^9$  kWh por año.

Taseli y Kilkis (2016) propusieron dos escenarios (uno de ellos con tres niveles) para generar energía eléctrica y reducir las desventajas ambientales de un hospital universitario con 900 camas. Con la intención de obtener suficiente biogás se propuso emplear los desechos del hospital y crear un establo para 6000 cabezas de ganado lechero; lo cual permitiría que los alumnos del departamento de agricultura cuenten con una granja didáctica. El escenario base contempla tres máquinas para trigeneración cuya capacidad combinada sería de 5.65 MW.

Chan, Xia y Murphy (2016) realizaron una investigación cuyos resultados indican que el biogás producido a partir del estiércol líquido de cerdo en México tiene potencial para producir  $21 \times 10^{15}$  Joules anualmente. Se agregó pasto elefante (*pennisetum purpureum*) para mejorar el

rendimiento de las excretas de cerdo. Los investigadores sostienen que el precio de la energía eléctrica generada in – situ sería de \$US 0.129/kWh.

Uddin y et al (2016) estimaron que el estiércol ganadero de Pakistán puede producir 35.625 millones de kWh diarios, con lo cual se podría superar la crisis energética de dicho país, en el cual la indisponibilidad de energía eléctrica puede durar entre 14 y 20 horas al día. El Consejo Pakistaní de Tecnologías Renovables, PCRET por sus siglas en inglés (Pakistan Council of Renewable Technologies), ya ha instalado 4109 plantas de biogás a lo largo del país, con lo cual se logran ahorros mensuales promedio de 37.925 millones de rupias pakistaníes en términos de queroseno, madera, gas l.p. y biofertilizante.

Ríos y Kaltschmitt (2016) sugieren que México tiene un potencial considerable para usar biogás de desechos orgánicos como una fuente renovable para generar electricidad. Los resultados de su investigación muestran un potencial teórico promedio de 167.9 TWh/año, un potencial técnico promedio de 10.2 TWh/año y un potencial económico promedio de 6.4 TWh/año.

Bundhoo, Mauthoor y Mohee (2016) realizaron una investigación para determinar el potencial energético de la República de Mauricio a partir de la descomposición anaeróbica de biomasa y distintos desechos disponibles en la ya mencionada isla. Sus resultados indican que la energía neta disponible alcanza los 4685 TJ/año, de los cuales 2174 TJ/año corresponden a energía eléctrica y 2511 TJ/año a energía térmica, representando 12.6% del consumo energético final de la República de Mauricio. Los residuos de la caña de azúcar (3790 TJ/año) son la principal fuente de biogás a larga escala disponibles en dicho país.

Piwowar, Dzikuc y Adamczyk (2016) llevaron a cabo una investigación para mostrar el desarrollo actual del mercado de biogás agrícola en Polonia, en la cual indican que de 2011 a 2014, la producción de biogás aumentó 127.39 millones de metros cúbicos. Debido a la gran área de suelo agrícola, la relativamente alta población de ganado bovino y porcino y a la bien desarrollada industria alimenticia de Polonia, su mayor fuente de energía renovable es la biomasa agrícola. Actualmente, la capacidad total de las plantas de biogás en Polonia es 244,156,466 m<sup>3</sup>/año.

Silva dos Santos, Barros y Filho (2016) presentaron un método para analizar la viabilidad económica y energética de la generación de energía mediante biogás producido en plantas



anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos municipales en Brasil. Los resultados indicaron viabilidad económica únicamente para ciudades cuya población supere los 300,000 habitantes y que el potencial energético pueda suministrar alrededor del 0.25% de los residuos fósiles, de acuerdo con el Ministerio Brasileño de Ciencia y Tecnología. Este potencial energético representa toda la energía que pueda ser producida a partir de desechos en Brasil para 2020.

Ware y Power (2016) evaluaron el potencial de recuperación de energía de los subproductos orgánicos de un matadero de ganado bovino en Irlanda. En su estudio se analizó el potencial de producción de metano de distintos fluidos, así como el de la mezcla de ellos y se determinó que es viable combinar los desechos, ya que el rendimiento de metano no disminuye. Adicionalmente, la mezcla de desechos tiene potencial de recuperación de energía suficiente para subsidiar al 100% la demanda energética del matadero.

Khan y Martin (2016) evaluaron el estatus actual de la tecnología de biodigestores en áreas rurales de Bangladesh, la cual abarca 75% de la población. Debido a la falta de conocimiento técnico, los altos costos de instalación y operación, disponibilidad de materia prima y las limitadas aplicaciones finales, sólo se obtiene el 1% del potencial total de biogás, estimado en 14.5 millones de m<sup>3</sup>/año.

De acuerdo con los estudios realizados a nivel mundial, los países con economías emergentes poseen una gran cantidad de desechos orgánicos procedentes de distintas fuentes, sin embargo, no cuentan con la infraestructura necesaria para explotar al máximo su potencial energético, debido a que los proyectos de esta índole suelen ser planeados a gran escala y a que los estudios realizados contemplan regiones considerablemente extensas o sumamente pobladas. No obstante, se debe tomar en cuenta que en muchas ocasiones los desechos orgánicos no se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo y ancho de las áreas consideradas, lo cual dificulta las labores de recolección y tratamiento de los desechos y puede causar la exclusión de cierta cantidad de materia prima.

Si bien los estudios realizados a gran escala muestran resultados alentadores, los pequeños proyectos para aprovechar el biogás y generar electricidad con él no han sido contemplados como una alternativa para el autoabasto energético; de hecho, a pequeña escala, en los ranchos

ganaderos el biogás suele emplearse como combustible para estufas y calentadores de agua, o incluso no se aprovecha el biogás producido por las excretas de sus animales.

Tal es el caso del rancho “Los Dos Hermanos”, propiedad que se dedica principalmente a la siembra de maíz y que obtiene ingresos adicionales a través de la compra, cría y venta de ganado bovino y porcino. En este rancho también se cuenta en menor cantidad con ganado equino, ovino y cunícola, así como con aves para autoconsumo. El rancho es abastecido eléctricamente a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para realizar actividades como la preparación de alimentos y el alumbrado, ya que las labores de ganadería y agricultura se realizan de manera manual y con ayuda de un tractor, siendo su demanda eléctrica aproximadamente de 132.22 kWh bimestrales.

En el rancho “Los Dos Hermanos”, la captación del biogás producido gracias a la fermentación del estiércol del ganado podría beneficiar a una familia agropecuaria tanto económica como confortablemente, ya que cubrir la totalidad o una parte de la demanda eléctrica del rancho mediante autoabasto eléctrico permitiría un ahorro económico al reducir el importe a pagar del periodo facturado por CFE; al tiempo que la producción de biogás dentro de un biodigestor eliminaría la presencia de olores fétidos en el ambiente causados durante la fermentación de las excretas. No obstante, antes de que un sistema que permita la generación de energía eléctrica sea sugerido, es necesario estimar el potencial energético del rancho, lo cual permitirá conocer la parte de la demanda eléctrica que se podrá satisfacer mediante la implementación de un sistema de autoabasto.

Tal panorama ha dado origen al presente trabajo de investigación, el cual surge con la finalidad de estimar, de manera experimental, el potencial de energía que es posible obtener a partir del biogás producido por los desechos orgánicos del ganado del rancho “Los Dos Hermanos”, el cual se encuentra ubicado en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan, Zumpango, Estado de México, y así sentar las bases para diseñar un sistema de generación de energía eléctrica que permita satisfacer su demanda eléctrica total o parcialmente.

Para fundamentar la investigación propuesta, en el capítulo uno se tratan los conceptos generales que conciernen al biogás, entre los cuales se incluyen los factores que determinan su producción, tales como la temperatura, el pH, la dilución del sustrato, la masa seca y volátil, entre otros; así

como las principales características y ventajas que determinan la elegibilidad de distintos tipos de biodigestores en función de las condiciones bajo las cuales han de operar.

Por tratarse de un caso de estudio particular, y con la finalidad de permitir que los experimentos llevados a cabo sean reproducibles, es necesario que la metodología empleada durante la fase experimental sea detallada, lo cual se lleva a cabo en el segundo capítulo. En dicha sección se incluye la puesta en operación de los biodigestores utilizados, la determinación de la concentración de los sustratos y su preparación, el llenado de los reactores y el proceso empleado para realizar la medición de la temperatura dentro de ellos, así como la presión contenida en su interior, el pH del sustrato y el porcentaje de metano presente en el biogás producido. Cabe mencionar que el biogás será producido y captado dentro de los biodigestores que forman parte del equipo del Laboratorio de Investigación en Energías Renovables de la FES – Cuautitlán.

El tercer capítulo corresponde al análisis de los resultados obtenidos durante la fase experimental y que son presentados en el apéndice 1, entre los cuales se incluyen parámetros como presión acumulativa, pH del sustrato y porcentaje de metano, entre otros. También se establece una línea base de energía obtenible a partir del biogás producido mediante la degradación de los desechos orgánicos del ganado del rancho “Los Dos Hermanos”. Adicionalmente, con base en los resultados expuestos y analizados en dicho capítulo, se ejemplifica la elección de un sistema de generación de energía eléctrica para el rancho “Los Dos Hermanos”.

Los gráficos complementarios concernientes a los resultados obtenidos se incluyen en el apéndice número uno, de modo que en él puede consultarse la información referente a cada uno de los sustratos analizados.

## **Objetivo general**

Estimar el potencial de energía que es posible obtener a partir del biogás producido por los desechos orgánicos de cerdo, vaca y caballo, del rancho “Los Dos Hermanos”, en San Bartolo Cuautlalpan.

## **Objetivos particulares**

- Obtener biogás a partir de los desechos orgánicos producidos por los cerdos, vacas y caballos del rancho “Los Dos Hermanos”.
- Cuantificar el porcentaje máximo de metano presente en el biogás generado.
- Determinar la relación particular de litros de metano/kg de desechos orgánicos que se puede obtener a partir de los desechos de cerdo, vaca y caballo.
- Estimar el potencial de energía que es posible obtener a partir del biogás producido por los desechos orgánicos de cerdo, vaca y caballo.
- Determinar la relación particular de Wh/kg de desechos orgánicos que se puede obtener a partir de los desechos de cerdo, vaca y caballo.

## **Metodología de la investigación**

- Revisión de antecedentes del tema.
- Recopilación de la bibliografía pertinente para profundizar en el tema.
- Puesta en funcionamiento de los biodigestores.
- Determinación de la masa seca y volátil de los desechos orgánicos.
- Determinación de los sustratos.
- Preparación de los sustratos.
- Llenado de los biodigestores.
- Medición de: la presión del biogás generado, la temperatura del sustrato, el porcentaje máximo de metano presente en el biogás y el pH del sustrato.
- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos.
- Estimar el potencial de energía que es posible obtener a partir del biogás producido.

# Capítulo 1. Conceptos generales.

## 1.1 Biogás y biomasa

El biogás es una mezcla de gases producidos por la digestión anaeróbica de la biomasa, la cual puede definirse como un contenedor de energía solar almacenada gracias a los procesos de fotosíntesis de las plantas (Al Seadi y et al, 2008). Bajo este concepto, toda materia vegetal es biomasa, y por consiguiente, también lo son la materia animal y sus desechos orgánicos, ya que según la ley de la conservación de la energía, la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

## 1.2 Composición del biogás

Los principales componentes del biogás son el dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ), siendo este último componente el que contiene la energía del biogás y que representa entre el 55 y 70% del mismo. El porcentaje de metano presente en el biogás es un indicador de su calidad y es deseable que tal valor sea lo más alto posible, ya que únicamente podrá emplearse como combustible si contiene un mínimo de 45% de metano; el gas licuado de petróleo (L.P.) contiene aproximadamente 98% del ya mencionado compuesto.

El resto del biogás corresponde a una serie de gases cuyas proporciones varían notablemente, tal como se aprecia en la tabla 1.1.

| Componente | Metano ( $\text{CH}_4$ ) | Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) | Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) | Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) | Dinitrógeno ( $\text{N}_2$ ) | Sulfuro de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) |
|------------|--------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|---|
| Porcentaje | 55 – 70                  | 25 – 50                              | 1 – 5                                  | 0 – 0.05                   | 0 – 5                        | 0 – 0.5                                       |

Tabla 1.1. Componentes del biogás (Deublein y Steinhauer, 2008).

Los datos presentados en la tabla 1.1 permiten concluir que alrededor del 95% del biogás suele corresponder al metano y dióxido de carbono, razón por la cual suele considerarse que la presencia de otros gases es despreciable, aunque estas proporciones se alcanzan generalmente a partir de la quinta semana desde que comienza la producción de biogás.

### 1.3 Características del biogás

Algunas características del biogás pueden variar para cada caso en particular debido a que las propiedades de dicho combustible están en función de la concentración de sus componentes, especialmente el metano. La tabla 1.2 detalla las características del biogás para un contenido de metano entre 55 y 70%.

| Contenido energético         | Equivalencia de combustible                       | Límites de explosión         | Temperatura de ignición   |
|------------------------------|---|------------------------------|---|
| 6.0 – 6.5 kWh/m <sup>3</sup> | 0.6 – 0.65 L de petróleo/m <sup>3</sup> de biogás | 6 – 12% de biogás en el aire | 650 – 750 °C  |
| Presión crítica              | Temperatura crítica                               | Densidad normal              | Olor  |
| 75 – 89 bar                  | -82.5 °C  | 1.25 kg/m <sup>3</sup>       | Huevos podridos. Tras desulfurizar el biogás su olor es casi imperceptible. |

Tabla 1.2. Características del biogás (Deublein y Steinhauser, 2008).

### 1.4 Digestión de materia orgánica

En esta sección se tratan los temas relacionados con la digestión de materia orgánica, haciendo hincapié en la digestión anaeróbica y sus etapas, así como sus variedades, de acuerdo con Al Seadi y et al (2008) y el Ministerio de Energía de Chile y et al (2011).

La descomposición de los residuos orgánicos se efectúa gracias a la acción de distintos microorganismos presentes en la biomasa, y cuya proliferación y efectos en la degradación de la materia orgánica están en función de la presencia de oxígeno en el medio en el que la descomposición se lleva a cabo. Debido a que el oxígeno juega un rol fundamental en los productos de la biodigestión, es posible clasificarla en función de su presencia o ausencia, dando lugar a la distinción entre digestión aeróbica y digestión anaeróbica, respectivamente.

### **1.4.1 Digestión aeróbica**

Se conoce como digestión anaeróbica a la degradación de materia orgánica que se lleva a cabo en presencia de oxígeno. Esta degradación ha sido empleada para simplificar el manejo de desechos como lodos, los cuales son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular.

La digestión aeróbica presenta diversas ventajas dentro de las cuales destacan la facilidad de operación del sistema, bajo capital de inversión comparada con la digestión anaeróbica, no genera olores molestos y reduce la cantidad de coliformes fecales y por lo tanto, de organismos patógenos. El proceso presenta también sus desventajas, entre las que se suelen mencionar los altos costos de operación causados por los altos consumos de energía, la falta de parámetros y criterios claros para el diseño y la dificultad que presentan los lodos digeridos aeróbicamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío.

### **1.4.2 Digestión anaeróbica**

La digestión anaeróbica es el proceso de descomposición de la materia orgánica debido a microorganismos que se ven afectados de manera negativa por la presencia de oxígeno, es decir, es aquella degradación que se da en ausencia de oxígeno. Esta digestión transforma en metano más del 90% de la energía disponible por oxidación directa, mientras que sólo un 10% de la energía es empleada para el crecimiento bacteriano, en comparación con el 50% que se consumiría en un sistema aeróbico.

#### **1.4.2.1 Etapas de la digestión anaeróbica**

Como productos de la digestión anaeróbica se tienen el biogás y el digestato, el cual corresponde al sustrato tras ser digerido y puede ser utilizado como abono. Ambos productos son el resultado de cuatro etapas que conforman la digestión anaeróbica y cuyos nombres son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas están íntimamente ligadas entre sí por medio de una serie de catabolizaciones, es decir, una serie de descomposiciones en moléculas



sencillas a partir de moléculas más complejas. La figura 1.1 presenta las etapas de la digestión anaeróbica.

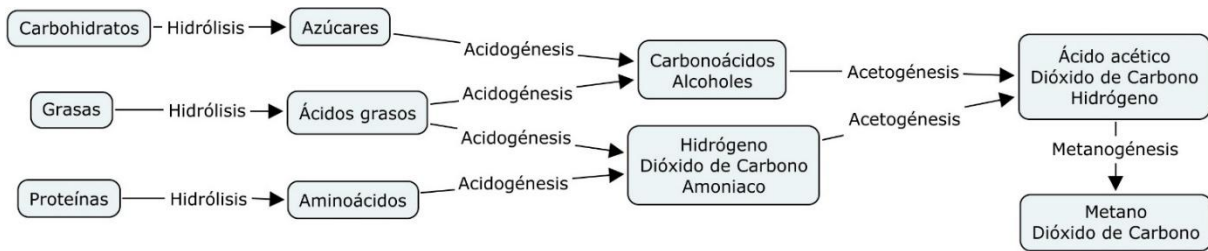


Figura 1.1. Etapas de la digestión anaeróbica (Al Seadi y et al, 2008).

Las etapas mostradas en la figura 1.1 suceden simultáneamente dentro del biodigestor y ocurren al ritmo de la velocidad de la etapa más lenta.

### 1.4.2.1.1 Hidrólisis

Durante la hidrólisis, la materia orgánica compleja es catabolizada partiendo de polímeros a monómeros y oligómeros, de modo que polímeros como carbohidratos, lípidos, ácidos nucleicos y proteínas son convertidos en glucosa, glicerol, purinas y piridinas. Este proceso es posible gracias a que los microorganismos hidrolíticos expelen enzimas hidrolíticas, las cuales convierten los polímeros en compuestos solubles.

### 1.4.2.1.2 Acidogénesis

Durante el proceso de la acidogénesis, los compuestos solubles producidos durante la hidrólisis son convertidos en compuestos que deben ser oxidados durante la acetogénesis y en sustratos metanogénicos gracias a la acción de bacterias acidogénicas, las cuales, también se encargan de eliminar todo residuo de oxígeno presente en el sistema. Los azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos son degradados en acetato, dióxido de Carbono e Hidrógeno, los cuales son sustratos metanogénicos y componen 70% del producto de la acidogénesis, mientras que el 30% restante corresponde a ácidos grasos volátiles (los cuales serán abreviados como AGV) y alcoholes, los cuales requieren sufrir el proceso de la acetogénesis antes de convertirse en sustratos metanogénicos.

### **1.4.2.1.3 Acetogénesis**

La acetogénesis es la etapa de la degradación anaeróbica en el cual los productos reducidos de la acidogénesis, tales como ácidos grasos volátiles y alcoholes, son convertidos en sustancias metanogénicas como acetato e Hidrógeno, cuya producción incrementa la presión parcial de Hidrógeno, inhibiendo el metabolismo de las bacterias acetogénicas. Sin embargo, durante la metanogénesis, el Hidrógeno es convertido en metano.

Para cuando el proceso de digestión anaeróbica alcanza esta etapa, las bacterias anaeróbicas ya han consumido prácticamente todo el alimento presente en la biomasa, generando ácidos volátiles sencillos como sus propios desechos. Son precisamente estos productos los que sirven de sustrato a las bacterias metanogénicas en la última etapa.

### **1.4.2.1.4 Metanogénesis**

Durante la etapa de la metanogénesis, el metano y dióxido de Carbono son producidos gracias a la acción de bacterias metanogénicas. El 70% del metano producido se origina a partir del acetato, mientras que el 30% restante tiene como materia prima Hidrógeno y dióxido de Carbono.

Como se mencionó previamente, la velocidad del proceso de digestión anaeróbica está en función de la velocidad de la etapa más lenta, es decir, de la metanogénesis, la cual está influenciada por diversas condiciones, entre las que se encuentran la composición de la materia prima, la temperatura y el pH. Además, fenómenos como la sobrecarga del biodigestor, cambios bruscos de temperatura o admisiones considerables de oxígeno pueden causar la finalización de la producción de metano.

### **1.4.2.2 Tipos de digestión anaeróbica**

Dentro de la digestión anaeróbica se distinguen dos procesos conocidos como fermentación anaeróbica y respiración anaeróbica, los cuales tienen como criterio de clasificación la naturaleza del agente aceptador de electrones, pudiendo ser dicho agente un compuesto orgánico

o inorgánico. Entiéndase por aceptador o aceptor de electrones un compuesto que recibe los electrones que son liberados como producto de la descomposición de la materia orgánica.

#### **1.4.2.2.1 Fermentación anaeróbica**

La fermentación anaeróbica se caracteriza porque la materia orgánica actúa como dador y aceptador de electrones, ya que el digestato acepta los electrones liberados durante la descomposición del sustrato; por lo tanto, la materia orgánica es catabolizada sin requerir un aceptor de electrones externo. Durante la fermentación, el sustrato se oxida parcialmente, es decir, cede electrones, lo cual causa que sólo se conserve una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato.

La importancia de la fermentación anaeróbica radica en que aproximadamente el 66% del metano se produce debido a este proceso, en el cual el acetato, compuesto presente en el digestato, actúa como dador y aceptor de electrones.

#### **1.4.2.2.2 Respiración anaeróbica**

La respiración anaeróbica es el proceso en el cual el aceptor terminal de electrones suele ser una molécula inorgánica distinta del oxígeno, aunque muy ocasionalmente puede ser una molécula orgánica. Este proceso es llevado a cabo únicamente por algunas bacterias, las cuales emplean una cadena transportadora de electrones. Las principales diferencias entre la fermentación anaeróbica y la respiración anaeróbica radican en que el primer proceso no emplea una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones sólo puede ser una molécula orgánica, además de que no requiere un aceptor externo de electrones. Una molécula orgánica es aquella que contiene enlaces de carbono e hidrógeno, mientras que una molécula inorgánica es aquella que carece de dichos enlaces.

Adicionalmente, la respiración anaeróbica necesita aceptores de electrones externos para recibir los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica. En este proceso, la energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica.

Cuando el  $\text{CO}_2$  acepta los electrones liberados por la materia orgánica, se reduce a gas metano ( $\text{CH}_4$ ), cuya producción mediante este proceso se denomina metanogénesis hidrogenotrófica, la cual es responsable de producir aproximadamente el 34% del metano presente en el biogás.

## **1.5 Factores determinantes en la producción del biogás**

La producción del biogás depende de una serie de variables que determinan tanto la cantidad como la calidad del producto de la digestión anaeróbica. Entre estos factores se encuentran la composición de la biomasa y su relación Carbono/Nitrógeno, la temperatura en la cual se lleva a cabo el proceso, el pH del sustrato y la cantidad de masa seca y volátil de la biomasa.

### **1.5.1 Composición de la biomasa**

Los residuos orgánicos digeribles para producir biogás comprenden tanto desechos animales como vegetales, y son procedentes de diversas áreas o actividades, entre las cuales se incluyen los excrementos y algunos fluidos animales y humanos, maleza, hojas, ramas, corteza e incluso residuos agroindustriales. La tabla 1.3, consultada en el libro Aprovechamiento racional de desechos orgánicos de Varnero y Arellano (1991), muestra algunos ejemplos de biomasa aprovechable; sin embargo, todo compuesto orgánico es capaz de producir biogás, pero algunos compuestos son mejores productores del mismo.

| <b>Ejemplos de biomasa aprovechable para producir biogás</b> |  |
|--|--|
| <b>Residuos de origen animal</b>                             | Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados |
| <b>Residuos de origen vegetal</b>                            | Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado                                 |
| <b>Residuos de origen humano</b>                             | Heces, basura, orina   |
| <b>Residuos agroindustriales</b>                             | Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas                             |
| <b>Residuos forestales</b>                                   | Hojas, vástagos, ramas y cortezas  |
| <b>Residuos de cultivos acuáticos</b>                        | Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas  |

*Tabla 1.3. Ejemplos de biomasa aprovechable para producir biogás (Varnero y Arellano, 1991).*

Para que el proceso de digestión anaeróbica se pueda llevar a cabo es necesario que la biomasa contenga principalmente Carbono y Nitrógeno, así como algunas sales minerales, entre las cuales se encuentran Azufre, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Zinc, Cobalto, Selenio, Tungsteno y Níquel, entre otros (Hilbert, 2010).

Los estiércoles suelen contener tales elementos en proporciones adecuadas, característica que los hace aptos para la digestión anaeróbica. La concentración de los componentes del estiércol está en función del animal productor y la alimentación que haya recibido, lo que provoca que existan diferencias entre los resultados hallados por distintos investigadores.

En la tabla 1.4 se muestra el rango de contenido de los principales nutrientes presentes en distintos tipos de compuestos orgánicos.

| <b>Materia Prima</b>      | <b>C [%]</b> | <b>N [%]</b> | <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [%]</b> | <b>K<sub>2</sub>O [%]</b> | <b>CaO [%]</b> | <b>MgO [%]</b> |
|---------------------------|--------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|
| <b>Excretas</b>           |              |              |                                       |                           |                |                |
| Bovino                    | 17.4 – 40.6  | 0.3 – 2.0    | 0.1 – 1.5                             | 0.10                      | 0.35           | 0.13           |
| Porcino                   | 17.4 – 46.0  | 1.1 – 2.5    | 0.4 – 4.6                             | 0.30                      | 0.09           | 0.10           |
| Equino                    | 35.0 – 52.0  | 0.3 – 0.8    | 0.4 – 1.6                             | 0.35                      | 0.15           | 0.12           |
| Caprino                   | 35.0 – 50.0  | 1.0 – 2.0    | 0.2 – 1.5                             | 2.30                      |                |                |
| Ovino                     | 35.0 – 46.0  | 0.3 – 0.6    | 0.3 – 1.0                             | 0.15                      | 0.33           |                |
| Conejos                   | 23.0 – 35.0  | 1.0 – 1.9    | 0.9 – 1.8                             | 2.10                      | 0.45           | 0.15           |
| Gallinas                  | 28.0 – 35.0  | 1.4 – 2.0    | 2.0 – 2.8                             | 1.40                      | 0.80           | 0.48           |
| Humanas                   | 2.5          | 0.8 – 1.0    | 0.5                                   | 0.30                      |                |                |
| <b>Residuos vegetales</b> |              |              |                                       |                           |                |                |
| Caña de maíz              | 30.0 – 40.0  | 0.8 – 1.8    | 0.4 – 0.6                             | 2.40                      | 0.50           | 0.49           |
| Paja de trigo             | 16.0 – 46.0  | 0.53         | 0.70                                  | 0.40                      | 0.26           | 0.16           |
| Paja de avena             | 22.0 – 29.0  | 0.53         | 0.40                                  | 0.30                      | 0.40           |                |
| Hojas secas               | 35.0 – 40.0  | 1.00         | 0.30                                  | 0.20                      | 2.00           |                |
| Aserrín                   | 44.0         | 0.06         | 0.01                                  | 0.01                      |                |                |

*Tabla 1.4. Contenido de los principales nutrientes de la biomasa (Varnero y Arellano, 1991).*

### 1.5.2 Relación Carbono/Nitrógeno de la biomasa

Las bacterias metanogénicas se alimentan principalmente de Carbono y Nitrógeno, ya que obtienen su energía del Carbono y emplean el Nitrógeno para formar nuevas células. Estas bacterias consumen 30 partes de Carbono por cada parte de Nitrógeno, de modo que la relación C/N de su alimentación se encuentra en un rango de 30:1 hasta 20:1.

La relación C/N es inversamente proporcional a la velocidad de la digestión de la biomasa, es decir, los desechos cuya relación C/N es elevada se descomponen más lentamente. Por lo tanto, en el caso de materia orgánica con relación C/N superior a 35:1 la digestión ocurre lentamente porque la reproducción de bacterias es baja debido a la falta de Nitrógeno. En contraste, si la relación de la biomasa es inferior a 8:1, se produce un exceso de amonio, compuesto que en grandes cantidades es tóxico e inhibe la actividad bacteriana.

Cuando la biomasa a degradar posee una relación C/N inicial fuera del rango óptimo, se deben adicionar otros compuestos orgánicos que permitan modificar la relación C/N hasta alcanzar un valor adecuado. El Ministerio de Energía de Chile y et al, (2011) propone la fórmula (1) y la tabla 1.5, en la cual se presentan las relaciones C/N de distintos compuestos orgánicos, para conocer la relación C/N de una mezcla hecha con distintos desechos orgánicos.

$$K = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2 + \dots + C_n \times Q_n}{N_1 \times Q_1 + N_2 \times Q_2 + \dots + N_n \times Q_n} \quad (1)$$

Donde:

$K$  = relación C/N de la mezcla de materias primas.

$C$  = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

$N$  = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

$Q$  = Peso de cada materia fresca, expresado en kg o toneladas.

| <b>Materia Prima</b>      | <b>C [%]</b> | <b>N [%]</b> | <b>C/N</b> |
|---------------------------|--------------|--------------|------------|
| <b>Excretas</b>           |              |              |            |
| Bovino                    | 30           | 1.30         | 25:1       |
| Porcino                   | 25           | 1.50         | 16:1       |
| Equino                    | 40           | 0.80         | 50:1       |
| Caprino                   | 40           | 1.00         | 40:1       |
| Ovino                     | 35           | 1.00         | 35:1       |
| Conejos                   | 35           | 1.50         | 23:1       |
| Gallinas                  | 35           | 1.50         | 23:1       |
| Humanas                   | 2.5          | 0.85         | 3:1        |
| <b>Residuos vegetales</b> |              |              |            |
| Caña de maíz              | 40           | 0.75         | 53:1       |
| Paja de trigo             | 46           | 0.53         | 87:1       |
| Paja de avena             | 29           | 0.53         | 55:1       |
| Hojas secas               | 41           | 1.00         | 41:1       |
| Aserrín                   | 44           | 0.06         | 730:1      |

*Tabla 1.5. Relaciones C/N de distintos compuestos orgánicos (Varnero y Arellano, 1991).*

### **1.5.3 Temperatura**

La temperatura juega un papel crucial en la tasa de producción del biogás, ya que determina la velocidad con la que este se produce y la proliferación de las bacterias que participan en el proceso.

Es posible establecer tres rangos de temperatura que favorecen la proliferación de las bacterias, los cuales se presentan en la tabla 1.6.



| Tipo de bacterias | Rango de temperatura [°C] |         |         | Sensibilidad de las bacterias | Tiempo de retención hidráulico [días] |
|-------------------|---------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------------------------------------|
|                   | Mínimo                    | Óptimo  | Máximo  |                               |                                       |
| Psicrofílicas     | 4 – 10                    | 15 – 18 | 20 – 25 | ± 2°C / hora                  | 70 – 80                               |
| Mesofílicas       | 15 – 20                   | 25 – 35 | 35 – 45 | ± 1°C / hora                  | 30 – 40                               |
| Termofílicas      | 25 – 45                   | 50 – 60 | 75 – 80 | ± 0.5°C / hora                | 15 – 20                               |

*Tabla 1.6. Rangos de temperatura para la producción del biogás (Al Seadi y et al, 2013), (J. A. Hilbert, 2010).*

La temperatura mínima a la cual se produce el biogás es 4 °C, mientras que la máxima ronda los 80 °C, lo cual representa un intervalo sumamente amplio que permite la producción del biogás en regiones geográficas cuya temperatura se encuentre comprendida entre los ya citados límites térmicos.

La temperatura óptima para la producción del biogás ronda los 35°C, es decir, se encuentra en el rango mesofílico, en el cual las bacterias son sensibles a cambios de temperatura de ± 1°C por hora y el tiempo de retención suele encontrarse entre los 30 y 40 días. Resulta evidente que a mayores temperaturas corresponden tiempos de retención hidráulicos menores, lo cual implica un menor volumen del biodigestor, y por lo tanto, menores costos de construcción. Sin embargo, si se deseara elevar la temperatura dentro de un biodigestor, sería necesario contar con un sistema de calefacción, lo cual incrementaría los costos de operación del biodigestor, reduciendo así su viabilidad.

Otro aspecto a tener en cuenta es la sensibilidad de las bacterias con respecto a la temperatura, pues cambios drásticos inhiben la actividad bacteriana o incluso pueden causar la muerte a los microorganismos presentes en el sustrato. Por tal razón es recomendable mantener los biodigestores aislados térmicamente, con la finalidad de evitar o disminuir los cambios bruscos de temperatura, especialmente en los casos en los que se opere en el rango termofílico, pues las bacterias que proliferan en él son sensibles a cambios de tan solo 0.5 °C por hora (Al Seadi y et al, 2008).

### **1.5.4 pH del sustrato**

El pH de una sustancia es un indicador de su alcalinidad o acidez, y se cuantifica en una escala del 1 al 14, correspondiendo la unidad al valor más ácido, mientras que las sustancias neutras poseen un valor de 7 y las sustancias más alcalinas ostentan un pH de 14. Es importante conocer el pH de un sustrato porque dicho indicador determina qué tipo de microorganismos han de proliferar en la mezcla, y por lo tanto, establece qué sustancias se producen durante la digestión anaeróbica. Otro parámetro que se ve afectado por el pH del sustrato es la relación de dióxido de Carbono y metano contenido en el biogás.

El pH óptimo para favorecer las bacterias acidogénicas se encuentra entre 5.5 y 6.5, mientras que los microorganismos metanogénicos proliferan mejor cuando el pH se encuentra entre 7.8 y 8.2. Sin embargo, en el sustrato coexisten tanto bacterias metanogénicas como acidogénicas, siendo estas últimas menos sensibles a pH extremos, de ahí que se sugiera mantener el pH en entre 6.8 y 7.4 unidades, ya que la neutralidad corresponde al valor ideal del pH para la producción de biogás.

Se debe evitar que el pH no alcance valores inferiores a 6, debido a que en esos casos el biogás producido contiene una gran cantidad de dióxido de Carbono (alrededor de 70%) y poco metano. Las mezclas ácidas, además de reducir la actividad metanogénica, promueven la acumulación de ácido acético, dihidrógeno y ácidos grasos volátiles.

Los ácidos grasos volátiles disminuyen aún más el valor del pH, por lo cual se recomienda mantener baja la tasa de carga orgánica volumétrica, de modo que los AGV se consuman más rápido de lo que se generan y no acidifiquen el sustrato. Otra opción para alcalinizar la mezcla es la adición de compuestos tales como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoniacal, cal, hidróxido de sodio y potasio. Cuando el pH del sustrato se estabiliza, la metanogénesis comienza a repuntar (Ministerio de Energía de Chile y et al, 2011).

Si bien el pH no debe ser inferior a 6, tampoco debe ser superior a 8, pues si la mezcla sobrepasa esa alcalinidad, la formación de amoniacal aumenta notablemente, inhibiendo la actividad microbiana.

### 1.5.5 Masa seca

La masa seca corresponde a la materia libre de humedad que compone la biomasa, y de acuerdo con Jesús R. González y Luis R. González (2014), la metodología para determinarla consiste en pesar una muestra de materia orgánica fresca y posteriormente hornearla durante 48 horas a 105 °C. Tras deshidratar la muestra, es necesario pesarla nuevamente para calcular la masa seca empleando la ecuación (2):

$$m_s = \left[ 1 - \frac{m_h - m_d}{m_h} \right] \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

$m_s$  = masa seca, %.

$m_h$  = masa hidratada, g.

$m_d$  = masa deshidratada, g.

A pesar de que es recomendable determinar la masa seca de manera experimental para una muestra en particular, es válido consultar tablas de masa seca, aunque se debe tener en consideración que los datos plasmados en ellas son valores empíricos y podrían ser notablemente distintos a los valores verdaderos de la muestra. En la tabla 1.7 se presentan los porcentajes promedio de masa seca para algunos desechos orgánicos.

| <b>Materia Prima</b>      | <b>% de masa seca</b> |
|---------------------------|-----------------------|
| <b>Excretas</b>           |                       |
| Bovino                    | 13.4 – 56.2           |
| Porcino                   | 15.0 – 49.0           |
| Equino                    | 19.0 – 42.9           |
| Caprino                   | 83.0 – 92.0           |
| Ovino                     | 32.0 – 45.0           |
| Conejos                   | 34.7 – 90.8           |
| Gallinas                  | 26.0 – 92.0           |
| Humanas                   | 17.0                  |
| <b>Residuos vegetales</b> |                       |
| Caña de maíz              | 77.0                  |
| Paja de trigo             | 88.0 – 90.0           |
| Hojas secas               | 50.0                  |
| Aserrín                   | 74.0 – 80.0           |

*Tabla 1.7. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos (Varnero y Arellano, 1991).*

La importancia de conocer la masa seca presente en la biomasa radica en que dicho parámetro permite establecer la cantidad de agua que se requiere agregar a la biomasa que se ha de introducir en el biodigestor, de modo que la degradación de la mezcla produzca los resultados deseados.

En biodigestores discontinuos se obtienen resultados satisfactorios cuando la mezcla contenida en el biodigestor está conformada por entre 40 y 60% de masa seca, también llamada sólidos totales. En contraste, los biodigestores continuos operan mejor cuando el sustrato posee entre 8 y 12% de masa seca.

Los sólidos totales presentes en el sustrato alteran la densidad del mismo, siendo esta tanto mayor cuanto más sólidos totales incluye; lo cual afecta directamente la movilidad de las bacterias metanogénicas presentes en el sustrato.

El Ministerio de Energía de Chile y et al (Manual de Biogás, 2011) proponen el uso de la fórmula (3) para determinar el porcentaje de masa seca contenida en el sustrato (mezcla de materia orgánica y agua):

$$\varphi = \frac{m_h \times m_s}{m_h + m_a} \quad (3)$$

Donde:

$\varphi$  = concentración de masa seca en el sustrato, %.

$m_h$  = masa hidratada, kg.

$m_s$  = masa seca, %.

$m_a$  = masa de agua presente en el sustrato, kg.

Al aplicar la expresión (3) conviene tener en cuenta que un litro de agua tiene una masa de aproximadamente 1 kg a una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 4 °C.

A partir de la ecuación (3), es posible obtener la expresión (4) para calcular la cantidad de agua que se requiere agregar a cierta cantidad de biomasa con la finalidad de conseguir una concentración deseada de sólidos totales en el sustrato:

$$m_a = m_h \times \left[ \frac{m_s}{\varphi} - 1 \right] \quad (4)$$

Donde:

$m_a$  = masa de agua presente en el sustrato, kg.

$m_h$  = masa hidratada, kg.

$m_s$  = masa seca, %.

$\varphi$  = concentración de masa seca en el sustrato, %.

Cuando el sustrato posee menos del 15% de masa seca se considera que la digestión es húmeda, pues contiene una gran cantidad de agua. Por el contrario, la digestión se considera seca si el sustrato contiene entre 20 y 40% de sólidos totales (Al Seadi y et al, 2008).

### 1.5.6 Masa volátil

La masa volátil es el porcentaje de materia orgánica presente en la biomasa, e indica qué fracción de la misma ha de producir biogás. Teóricamente toda la masa volátil debe convertirse en biogás, de modo que un porcentaje alto es deseable.

La metodología propuesta por Jesús R. González y Luis R. González (2014) para calcular la masa volátil, también llamada sólidos volátiles, consiste en incinerar durante seis horas a 550 °C la materia orgánica previamente deshidratada para calcular la masa seca. La ecuación (5) permite calcular la masa volátil.

$$m_v = \left[ \frac{m_d - m_i}{m_d} \right] \times 100\% \quad (5)$$

Donde:

$m_v$  = masa volátil, g.

$m_d$  = masa deshidratada, g.

$m_i$  = masa incinerada, g.

## 1.6 Biodigestores

Los biodigestores, también conocidos como reactores, son dispositivos capaces de almacenar materia orgánica y descomponerla mediante digestión aeróbica o anaeróbica con la finalidad de obtener biogás y/o digestato. Estos dispositivos se encuentran presentes en hogares, granjas, hospitales, industrias y cualquier clase de instalación en la que se desee aprovechar en forma de biogás los desechos orgánicos producidos durante alguna de sus actividades. Sin embargo, en algunas ocasiones se emplean biodigestores con la finalidad de facilitar el manejo de los desechos, pasando la producción de biogás a un segundo plano.

## **1.6.1 Clasificación de los biodigestores**

De acuerdo con el Renewable Energy Institute (2007), Al Seadi y et al (2008) y el Ministerio de Energía de Chile y et al (2011), los biodigestores se presentan en una amplia gama que abarca diversas propiedades y características, lo cual permite establecer distintas clasificaciones en función de criterios como su régimen de carga y descarga, su orientación y su ubicación en el terreno, entre otros.

### **1.6.1.1 Por su régimen de carga y descarga**

Los biodigestores se pueden clasificar en función de su régimen de carga y descarga como continuos, discontinuos y semi – continuos. Dentro de los biodigestores continuos se puede realizar una nueva clasificación que da origen a la distinción entre los biodigestores de mezcla completa y los de tipo flujo de pistón. Por su parte, los biodigestores semi – continuos se pueden clasificar en modelos chino o hindú, dependiendo de la manera en que están constituidos.

#### **1.6.1.1.1 Biodigestores continuos**

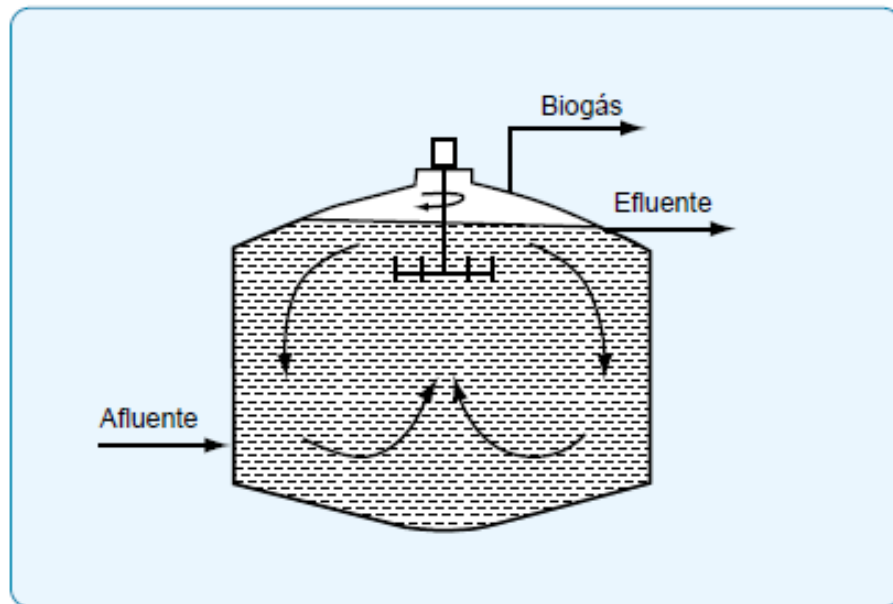
Los biodigestores continuos son aquellos que se alimentan y descargan continuamente, de modo que el afluente (material que ingresa en el biodigestor para ser digerido) y el efluente (digestato que se extrae del biodigestor) son iguales. Debido a que se cargan continuamente, estos biodigestores ocupan un gran volumen y tienen una producción de biogás estable y predecible.

Dentro de los biodigestores continuos el sustrato puede fluir gracias a la acción de mecanismos de agitación o por desplazamiento del contenido, lo cual da origen a una nueva clasificación de biodigestores en función del sistema que emplean para permitir el movimiento del sustrato. Bajo esta clasificación es posible distinguir los biodigestores de mezcla completa y los biodigestores tipo flujo de pistón.

##### **1.6.1.1.1.1 Biodigestores de mezcla completa**

Estos dispositivos cuentan con paletas o aspas que remueven el sustrato, de modo que se obtenga una mezcla uniforme y tanto sustrato como microorganismos se distribuyan uniformemente.

Los biodigestores continuos de mezcla completa pueden carecer de recirculación de biogás o contar con ella. En el primer caso, la agitación del sustrato se realiza únicamente mediante el empleo de paletas o aspas, lo cual resulta en un sistema de agitación relativamente simple. La figura 1.2 presenta el esquema básico de un biodigestor de mezcla completa sin recirculación.



*Figura 1.2. Biodigestor de mezcla completa sin recirculación de biogás (Ministerio de Energía de Chile y et al, 2011).*

Cuando el biodigestor de mezcla completa recircula el biogás producido además de emplear aspas o algún otro mecanismo para realizar la agitación, se denomina reactor anaeróbico de contacto, o bien, biodigestor de mezcla completa con recirculación de biogás.

Regular la recirculación del biogás permite disminuir los tiempos de retención hidráulica gracias al confinamiento de los microorganismos en el sistema tras ser separados en el decantador. Los biodigestores que permiten la recirculación del biogás resultan más complejos que los que carecen de ella debido a que requieren un sistema de desgasificación y un decantador, entre otros elementos. La figura 1.3 ilustra esquema básico de un biodigestor de mezcla completa con recirculación de biogás.



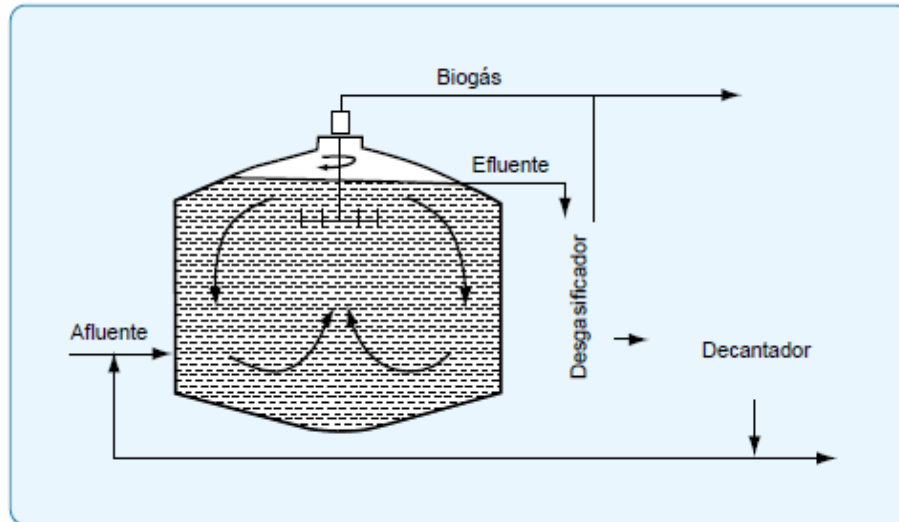


Figura 1.3. Biodigestor de mezcla completa con recirculación de biogás (Ministerio de Energía de Chile y et al, 2011).

### 1.6.1.1.2 Biodigestores tipo flujo de pistón

En estos biodigestores el flujo del sustrato se debe a la adición de materia prima al reactor, empujando al sustrato más digerido hacia la salida del mismo. Teóricamente, la cantidad de digestato que se extrae equivale a la cantidad de materia orgánica que se vierte dentro del biodigestor. Estos dispositivos carecen de mecanismos adicionales para agitar su contenido y son capaces de digerir sustratos con mayores contenidos de masa seca que los biodigestores de mezcla completa. Otra característica notable de los biodigestores tipo flujo de pistón es que prácticamente nunca permite que el sustrato no digerido alcance la salida del efluente, fenómeno que ocasionalmente ocurre en los biodigestores de mezcla completa. La figura 1.4 esquematiza un biodigestor tipo flujo de pistón.

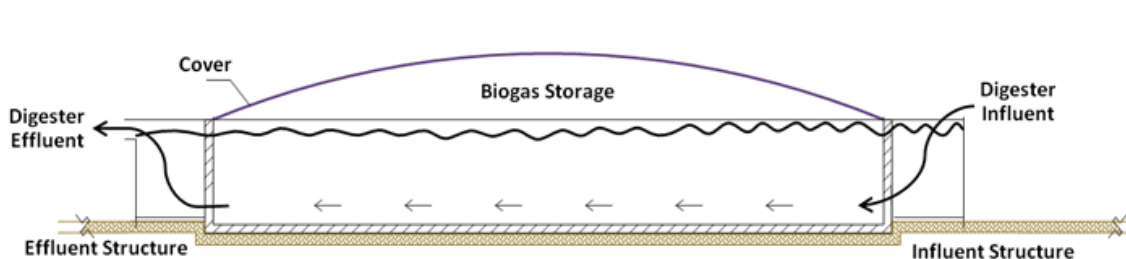


Figura 1.4. Biodigestor tipo flujo de pistón (Renewable Energy Institute, 2007).

La tabla 1.8 presenta una comparación entre las principales características de los biodigestores de mezcla completa y tipo flujo de pistón.

|                                 | <b>Biodigestores de mezcla completa</b> | <b>Biodigestor tipo flujo de pistón</b> |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Geometría</b>                | Cilindro vertical                       | Prisma horizontal                       |
| <b>Desechos procesables</b>     | Excremento líquido                      | Excremento sólido                       |
| <b>Temperatura de operación</b> | 20 – 37° C                              | 35 – 55° C                              |
| <b>Tiempo de retención</b>      | 30 – 90 días                            | 15 – 30 días                            |

*Tabla 1.8. Principales características de los biodigestores de mezcla completa y tipo flujo de pistón (Al Seadi y et al, 2008).*

### **1.6.1.1.2 Biodigestores semi – continuos**

Los biodigestores semi – continuos son aquellos cuya primera carga es considerablemente más grande que las sucesivas, las cuales se agregan periódicamente y con menor frecuencia que en el caso de los biodigestores continuos, que suelen llenarse diariamente. Las nuevas cargas que se introducen en el biodigestor están determinadas por el volumen del reactor y su tiempo de retención hidráulico, en tanto que la cantidad de efluente o materia extraída del biodigestor suele ser la misma que el afluente o materia que se introdujo al biodigestor.

Los biodigestores semi – continuos son ampliamente utilizados de manera doméstica o en pequeñas granjas donde la materia prima no suele producirse en cantidades tan grandes que permitan una carga más frecuente. Existen dos tipos principales de biodigestores semi – continuos: el chino y el hindú, y el biogás producido por ambas clases de biodigestores suele emplearse para cocinar o proporcionar alumbrado.

#### **1.6.1.1.2.1 Biodigestores de tipo chino**

Estos dispositivos suelen construirse bajo tierra y regularmente carecen de agitadores, lo cual causa que las partículas en suspensión presentes en el sustrato se sedimenten y deban ser retiradas dos o tres veces por año. Durante esta operación se recomienda retirar alrededor del

80% del sustrato presente en el reactor y dejar el resto como inoculante, es decir, como portador de microorganismos que facilitarán el proceso de digestión anaeróbica y han de multiplicarse.

La figura 1.5a esquematiza un biodigestor semi – continuo de tipo chino.

### 1.6.1.1.2 Biodigestores de tipo hindú

Los biodigestores de tipo hindú presentan características de funcionamiento similares a los del tipo chino, con la sustancial diferencia de que estos últimos suelen construirse en una pieza, es decir, un mismo recinto funciona como contenedor del sustrato (en su parte inferior) y como almacén del biogás (en su parte superior). Por su parte, los biodigestores de tipo hindú cuentan con una campana captadora de biogás, la cual se encuentra “flotando” sobre el sustrato y no está en contacto directo con el contenedor de sustrato.

En la figura 1.5b se muestra un biodigestor semi – continuo de tipo hindú.

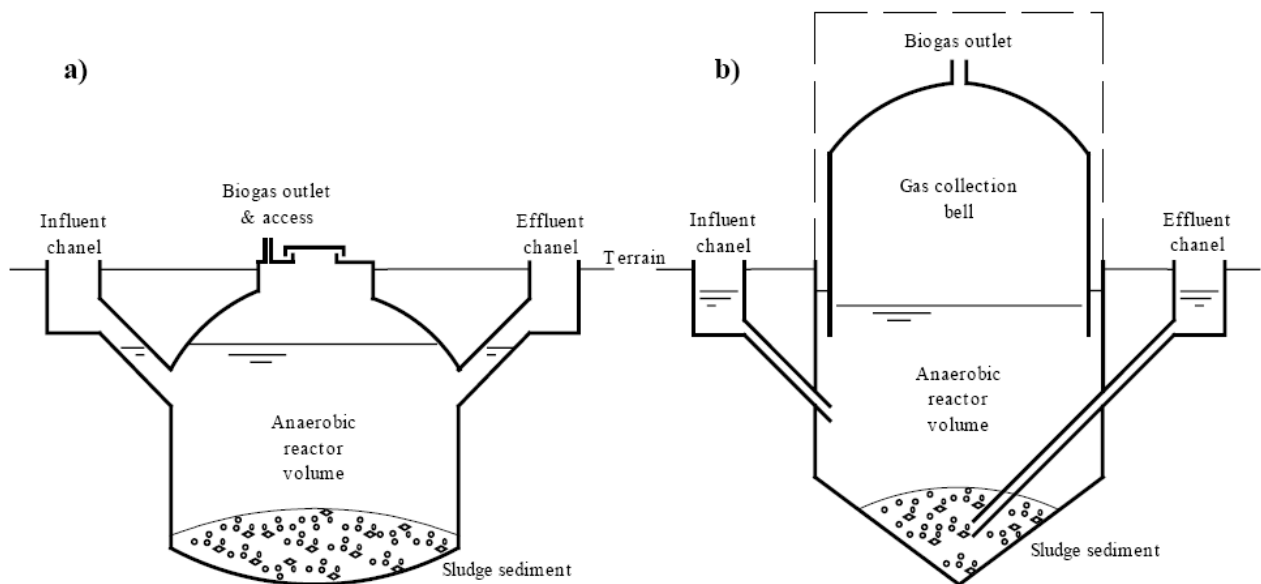


Figura 1.5. Biodigestores semi - continuos: a) tipo chino, b) tipo hindú.

### 1.6.1.1.3 Biodigestores discontinuos

Los biodigestores discontinuos, también conocidos como tipo Batch o Batelada, son aquellos cuyo ciclo de trabajo está compuesto por una operación de llenado y su correspondiente vaciado

al concluir la digestión del sustrato, sin alimentarlo o purgarlo durante la descomposición anaeróbica. Es decir, tan sólo se alimentan una ocasión y no se extrae el digestato hasta que la producción de biogás ha culminado o se considera despreciable.

Los biodigestores Batch suelen emplearse cuando el sustrato a degradar es difícil de manejar en otro tipo de biodigestores o bien cuando la materia orgánica no se encuentra siempre disponible, lo cual los hace poco prácticos para su uso doméstico.

Entre las principales ventajas de los biodigestores discontinuos se puede mencionar su simplicidad fisionómica, ya que pueden componerse por únicamente una cámara cuya parte superior sea una cúpula, en la cual se acumula el biogás producido, mientras el sustrato se sitúa en el fondo de la cámara. Además, los biodigestores tipo Batch sólo requieren un sistema de agitación cuando el sustrato se considera húmedo, es decir, cuando la concentración de sólidos totales (masa seca) presentes en el sustrato es menor al 15%.

Otras ventajas destacables de los biodigestores Batelada son su buen control y monitoreo del proceso, además de que suelen tener bajos costos de operación y permiten conocer de manera exacta su tiempo de retención para una materia orgánica en particular.

Si bien los biodigestores discontinuos presentan ventajas atractivas, también presentan el inconveniente de no proveer una producción de biogás tan estable como los biodigestores continuos, pues en el caso de los biorreactores Batch, la cantidad de biogás producido varía a lo largo del proceso de degradación desde un punto mínimo hasta un punto máximo, para posteriormente decaer hasta el mínimo. Sin embargo, estos efectos poco convenientes pueden disminuirse empleando un conjunto de biodigestores discontinuos cuyas salidas de gas se encuentren conectadas por medio de una tubería común. Los biodigestores deben ser llenados progresivamente, de modo que mientras un biorreactor se encuentra en la etapa de su producción máxima, otro se aproxime a ella, de tal manera que cuando el primero disminuya su producción se cuente con un sustituto que esté entrando en su clímax y así se pueda obtener una producción más regular. No obstante, cabe mencionar que este arreglo presenta el gran inconveniente de requerir una cantidad considerable de biodigestores, incrementando así los costos de fabricación, operación y mantenimiento.

A esta configuración se le conoce como arreglo en batería, y se ilustra en la figura 1.6.

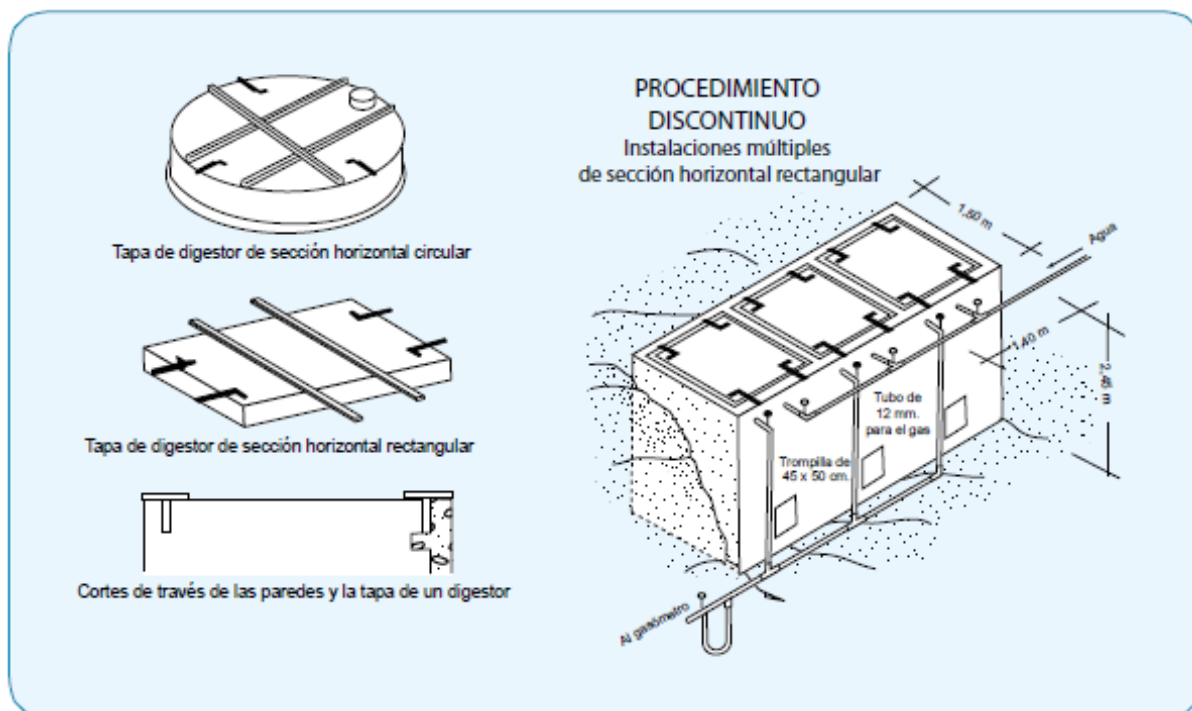


Figura 1.6. Arreglo de biodigestores Batch en batería (Ministerio de Energía de Chile y et al, 2011).

### 1.6.1.2 Por su orientación

Los biodigestores pueden clasificarse en función de su orientación, lo cual permite distinguir entre biodigestores horizontales y verticales.

#### 1.6.1.2.1 Biodigestores horizontales

Se considera que el biodigestor es horizontal cuando es más largo que alto, es decir, que si se trazase un eje horizontal y uno vertical sobre el biodigestor, este último tendría una longitud menor.

Un ejemplo de esta variedad de biodigestores es el tipo flujo de pistón, los cuales pueden tener forma rectangular o cilíndrica. La figura 1.7 muestra un biodigestor horizontal cilíndrico.



*Figura 1.7. Biodigestor horizontal semi – subterráneo (Eduardo Gropelli, 2016).*

#### **1.6.1.2.2 Biodigestores verticales**

Un biodigestor se clasifica como vertical cuando es más alto que largo, es decir, que si se trazase un eje horizontal y uno vertical sobre el biodigestor, este último tendría una longitud mayor.

Los biodigestores de mezcla completa son sendos ejemplos de esta clase de reactores que regularmente tienen forma cilíndrica. La figura 1.8 ilustra un biodigestor vertical.



*Figura 1.8. Biodigestor vertical al aire libre (Eduardo Gropelli, 2016).*

### **1.6.1.3 Por su ubicación en el terreno**

Los biodigestores pueden colocarse tanto al aire libre como debajo de la tierra, ya sea total o parcialmente, lo cual da origen a una clasificación en función de su ubicación en el terreno.

#### **1.6.1.3.1 Biodigestores al aire libre**

También llamados superficiales, los biodigestores colocados al aire libre se encuentran situados sobre la superficie del terreno, lo cual los deja expuestos a los cambios de temperatura originados por la naturaleza. Es recomendable que esta variedad de reactores cuente con aislamiento térmico con la finalidad de evitar cambios bruscos en la temperatura del sustrato, los cuales podrían ocasionar afectaciones en la producción del biogás en los casos en los que la temperatura varíe a un ritmo mayor que el tolerado por las bacterias psicrófilas, mesófilas o termófilas, según sea el caso.

En la figura 1.8 se puede apreciar un biodigestor colocado al aire libre, empleado por la Compañía Industrial Cervecera S.A., ubicada en Santa Fe, Argentina.

### **1.6.1.3.2 Biodigestores semi – subterráneos**

Los biodigestores semi – subterráneos son aquellos que se encuentran parcialmente cubiertos por el terreno, es decir, bajo tierra. Generalmente, la única parte del biodigestor que se encuentra bajo tierra es el contenedor del sustrato, de modo que el contenedor de biogás y los conductos de entrada del afluente y la salida del efluente no se encuentran bajo tierra.

Situar el contenedor del sustrato bajo la superficie terrestre disminuye las anomalías atribuibles a las variaciones de temperatura, pues esta técnica permite aislar térmicamente dicha parte del biodigestor, ya que la temperatura bajo la tierra suele ser notablemente más estable que aquella al aire libre.

La figura 1.7 corresponde a un biodigestor semi – subterráneo instalado por Eg – Ingeniería para el Grupo Sancor Seguros en la provincia de Santa Fe, Argentina.

### **1.6.1.3.3 Biodigestores subterráneos**

Un biodigestor será considerado subterráneo si sus depósitos de biogás y sustrato, así como sus conductos de entrada del afluente y la salida del efluente se encuentran completamente por debajo del nivel del terreno. En estos casos, la alimentación y descarga del biodigestor se realizan a través de un par de orificios o aberturas sobre el nivel del suelo, de modo que se requiere mantener limpia el área circundante a tales huecos con la finalidad de evitar que elementos indeseables puedan ingresar al biodigestor. Una ventaja considerable de los biodigestores subterráneos es el aspecto estético, pues el cuerpo del dispositivo no es visible como sí lo es en el caso de los biodigestores semi – subterráneos o al aire libre. En contraste, la dificultad para el mantenimiento y limpieza de un biodigestor subterráneo es un aspecto que debe tomarse en cuenta.

La figura 1.9 esquematiza un biodigestor subterráneo.



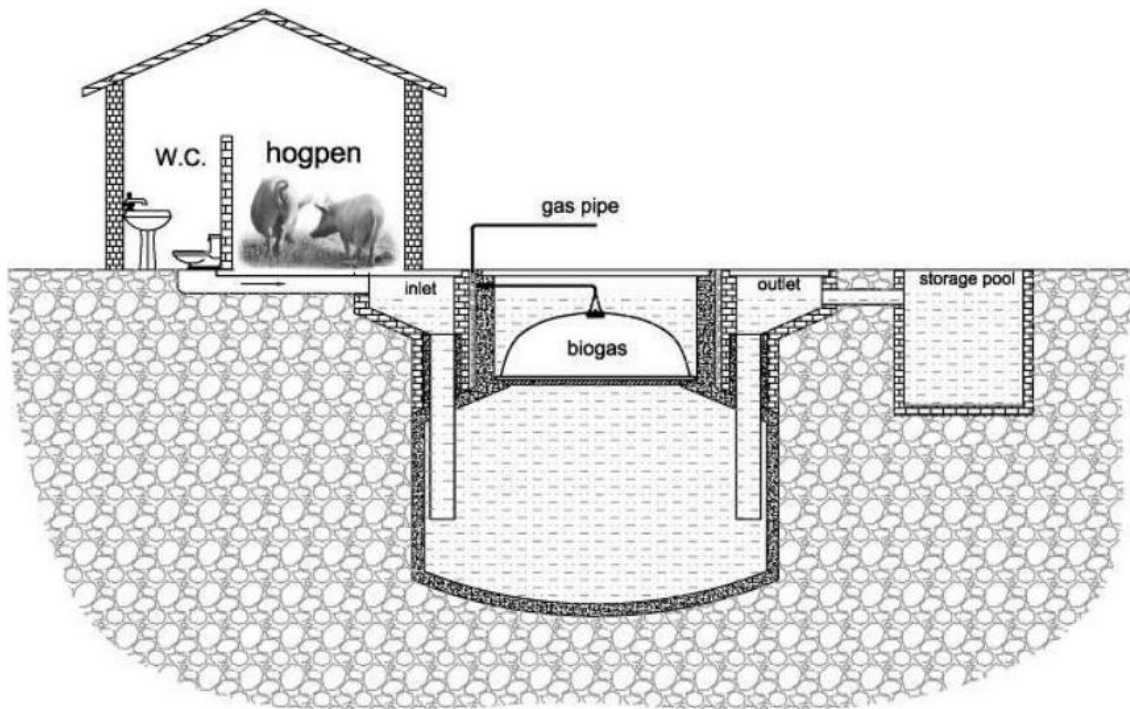


Figura 1.9. Biogas Plant (Anaerobic Digester) Blog. (2011).

## 1.6.2 Parámetros de funcionamiento

De acuerdo con Al Seadi y et al (2008) y el Ministerio de Energía de Chile y et al (2011), la operación de un biodigestor está en función de aspectos de índole técnica y económica que determinan su rendimiento y viabilidad, entre los cuales se encuentran la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulico, el nivel de llenado del biodigestor y el nivel de llenado del depósito de biogás. Usualmente se relacionan estos parámetros con la finalidad de obtener la mejor relación costo – beneficio posible.

### 1.6.2.1 Carga orgánica

La carga orgánica es un parámetro íntimamente relacionado con el volumen del biodigestor y se define como la cantidad de masa seca o sólidos totales por unidad de volumen que ingresa diariamente al biodigestor.

Para lograr que el sustrato sea digerido totalmente es necesario que permanezca dentro del biodigestor durante un periodo sumamente prolongado, para lo cual se requiere que el

biodigestor sea extremadamente voluminoso. No obstante, estos dispositivos deben ser capaces de producir la máxima cantidad de biogás posible empleando la menor cantidad de recursos, por lo tanto no es conveniente construir biodigestores demasiado grandes.

Es aquí donde la carga volumétrica juega un papel determinante, pues a una carga volumétrica elevada le corresponde un menor tiempo para la degradación del sustrato, y por lo tanto, un menor volumen del biodigestor. Además, debido a que la producción del biogás depende de factores como la masa seca presente en el sustrato, cuando la carga volumétrica es elevada, también lo es la cantidad de biogás producido. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que valores elevados de carga orgánica pueden causar una sobrecarga del biodigestor, trayendo como consecuencia una posible acidificación del sustrato.

La carga orgánica puede calcularse empleando la ecuación (6), propuesta por Al Seadi y et al (2008):

$$C_O = \frac{\dot{m} \times \varphi}{V_R} \quad (6)$$

Donde:

$C_O$  = carga orgánica, kg/(día×m<sup>3</sup>).

$\dot{m}$  = masa del sustrato vertido en el biodigestor por unidad de tiempo, kg/día.

$\varphi$  = concentración de masa seca en el sustrato, %.

$V_R$  = volumen del biodigestor, m<sup>3</sup>.

### **1.6.2.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH)**

Si bien la carga orgánica es un factor de gran relevancia para el dimensionamiento de un biodigestor, el tiempo de retención hidráulico no se queda atrás, pues se define como el periodo temporal promedio que el sustrato se mantiene dentro del biodigestor. Como se mencionó anteriormente, entre más tiempo permanezca el sustrato dentro del reactor, mayor será el nivel de degradación que alcance, es decir, a mayores TRH se alcanza una mayor degradación del sustrato.

Empleando la ecuación (7) propuesta por Al Seadi y et al (2008), es posible determinar un tiempo de retención hidráulico óptimo en función del volumen del biodigestor y el volumen del sustrato que ingresa al biodigestor por unidad de tiempo:

$$TRH = \frac{V_R}{\dot{V}} \quad (7)$$

Donde:

$TRH$  = tiempo de retención hidráulico, días.

$V_R$  = volumen del biodigestor,  $m^3$ .

$\dot{V}$  = volumen del sustrato que ingresa al biodigestor por unidad de tiempo,  $m^3/día$ .

Se debe cuidar que el TRH sea suficientemente largo como para permitir que tras la extracción del digestato aún se conserven microorganismos en el sustrato, cuya tasa de duplicación suele ser de al menos 10 días. Además, tiempos de retención hidráulicos elevados mejoran el nivel de descomposición del sustrato y permiten obtener mayores concentraciones de metano, aunque se debe tener en consideración que tras alcanzar su valor máximo, la concentración de metano comienza a decrecer gradualmente.

Si bien cada caso es único, los biodigestores continuos usualmente se alimentan con cargas orgánicas de entre 1 y 5 kg diarios por cada metro cúbico de biodigestor y operan con TRH que oscilan entre 20 y 55 días. En el caso particular de los biodigestores discontinuos, el tiempo de retención hidráulico está definido por el tiempo que dura cargado.

### **1.6.2.3 Nivel de llenado del biodigestor**

El nivel de llenado del biodigestor es un parámetro que debe tenerse bajo control con la finalidad de evitar sobrecargas que podrían ocasionar una acidificación del sustrato o causar sobreesfuerzos por parte del sistema de agitación. En contraste, mantener el contenido del biodigestor por debajo de su nivel nominal no permite sacar el máximo provecho a la inversión realizada.

Algunas técnicas para conocer el nivel de llenado del biodigestor consisten en medir la presión hidrostática en el fondo del reactor o medir la distancia existente entre la parte superior del mismo y la superficie del sustrato mediante el uso de ultrasonido o tecnologías de radar.

Cada biodigestor tiene un nivel de llenado óptimo en función de sus características fisiológicas y de la tecnología con que esté equipado, pero regularmente, los biodigestores de tipo chino y tipo discontinuo, los cuales poseen un mismo depósito para el sustrato y el biogás producido, se llenan hasta aproximadamente un tercio de su capacidad, es decir, dedican alrededor de dos terceras partes de su contenedor para el almacenamiento de biogás y el resto para el sustrato.

#### **1.6.2.4 Nivel de llenado del depósito de biogás**

A medida que el biogás es producido y acumulado, la presión dentro del contenedor de biogás aumenta. Si la presión interna sobrepasa la presión máxima soportable, una explosión o rotura será inminente. Sin embargo, la probabilidad de que esto ocurra es baja ya que los contenedores de biogás suelen estar equipados con válvulas de alivio que permiten liberar ciertas cantidades de biogás, de modo que la presión dentro del contenedor no represente una amenaza.

Por otra parte, algunas plantas de biogás están diseñadas para iniciar automáticamente su operación en cuanto se tiene una cantidad suficiente de combustible y parar cuando no hay suficiente biogás en el depósito. De ahí que cuantificar la cantidad de biogás contenida en el depósito resulte importante. Usualmente se mide el nivel de llenado del depósito de biogás empleando sensores de presión o gasómetros, los cuales miden la cantidad de gas en un recipiente.

## Capítulo 2. Pruebas experimentales.

Con el objetivo de determinar el potencial de energía generable a partir del biogás producido por los desechos orgánicos del rancho “Los Dos Hermanos” se realizó una serie de pruebas experimentales que comprenden desde la preparación de los biodigestores del Laboratorio de Investigación en Energías Renovables de la F.E.S. – Cuautitlán hasta el vaciado de los mismos tras operar ininterrumpidamente durante un periodo máximo de 221 días. La figura 2.1 muestra una breve descripción de las distintas etapas de la prueba experimental.

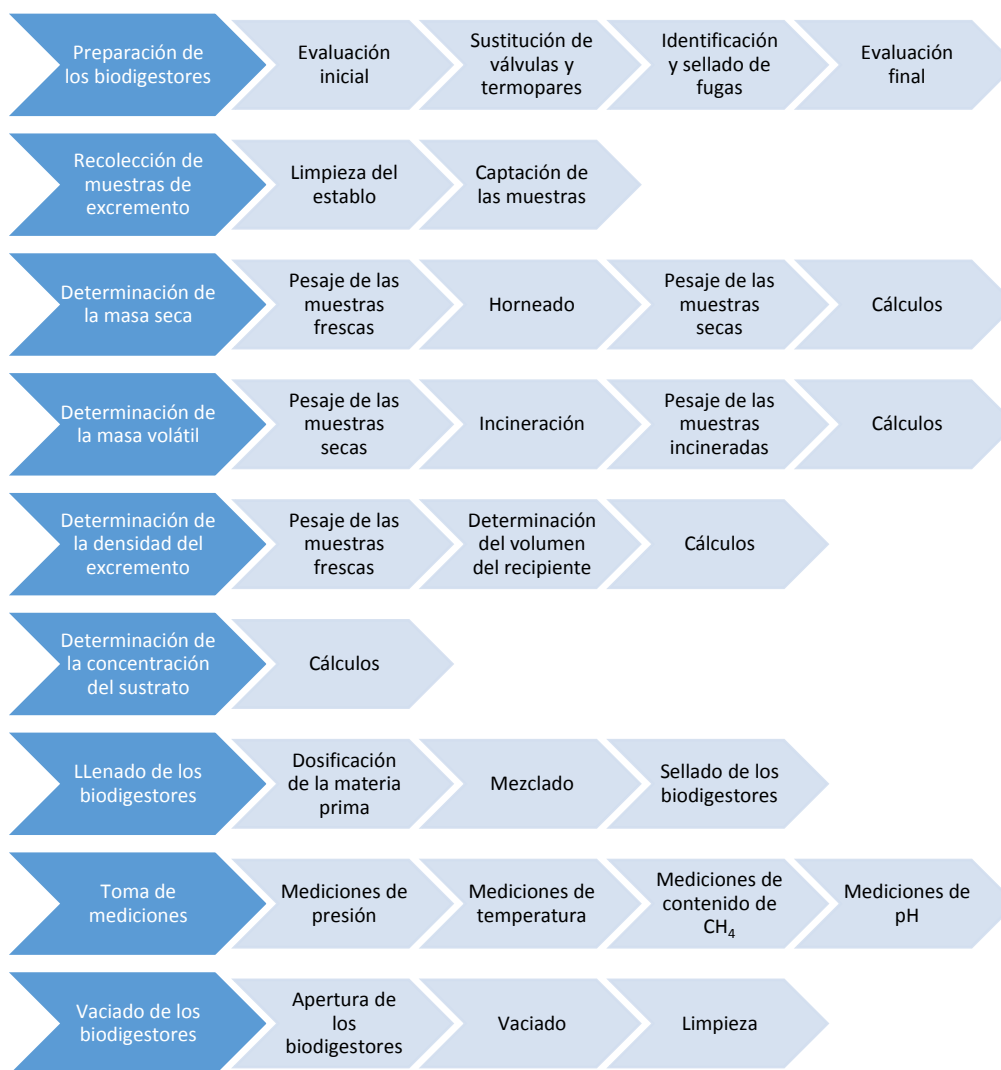


Figura 2.1. Etapas de la prueba experimental.

## 2.1 Preparación de los biodigestores

Previo al llenado de los biodigestores pertenecientes al Laboratorio de Investigación en Energías Renovables fue necesario asegurar su óptimo funcionamiento. Tras una evaluación inicial fue posible conocer el estado de cada biodigestor y con base en ello se procedió a sustituir los componentes dañados. Posteriormente se realizó una nueva evaluación para confirmar el buen funcionamiento de los dispositivos.

En la figura 2.2 se muestra uno de los 12 biodigestores empleados durante las pruebas experimentales.



*Figura 2.2. Biodigestor perteneciente al Laboratorio de Investigación en Energías Renovables.*

### 2.1.1 Evaluación inicial

La evaluación inicial del estado de los biodigestores consistió en verificar que sus termopares permitieran obtener mediciones correctas de temperatura y asegurar que las válvulas abrieran y cerraran correctamente, así como identificar y señalar fugas en caso de que existieran. Los resultados de la evaluación inicial se registraron en el formato presentado en la tabla 2.1, escribiendo en el espacio correspondiente una letra C (correcto) si el elemento evaluado funciona correctamente o una letra I (incorrecto) en caso contrario.

| Biodigestor<br>No. | Termopar    |           | Válvula de<br>gas | Válvula<br>hidráulica | Cuerpo del<br>biodigestor |
|--------------------|-------------|-----------|-------------------|-----------------------|---------------------------|
|                    | Continuidad | Precisión |                   |                       |                           |
| 1                  |             |           |                   |                       |                           |
| 2                  |             |           |                   |                       |                           |
| 3                  |             |           |                   |                       |                           |

*Tabla 2.1. Bitácora de estado de los biodigestores*

La continuidad de los termopares se comprobó empleando un multímetro Fluke. En los casos en los que no hubo continuidad o que la temperatura registrada mediante un termómetro Fluke varió  $\pm 1$  °C se determinó que el termopar no era apto para su uso y era necesario sustituirlo.

Para corroborar que las mediciones arrojadas por los termopares fueran correctas se empleó un termómetro digital de dos sondas. En una terminal del termómetro se colocó la sonda de calibración y en la otra terminal se conectó el termopar bajo estudio, de modo que ambas sondas midieran la temperatura en una misma superficie. La comparación de ambas medidas en tiempo real permitió evaluar el desempeño de los termopares.

En cuanto a las válvulas de gas e hidráulicas, así como al cuerpo de los biodigestores, se evaluó su hermeticidad llenando los biorreactores con aire a una presión de 7 psi y monitoreando dicho parámetro. Una disminución en la presión interna implica una fuga que debe ser eliminada.

### **2.1.2 Sustitución de válvulas y termopares**

En los casos en los que se identificó una fuga en la compuerta de alguna válvula, la solución consistió en reemplazar el elemento en cuestión. Si la fuga se encuentra en la conexión entre la válvula y el biodigestor se debe retirar la válvula, limpiarla y aplicar suficiente cinta de teflón antes de colocarla de nuevo.

Si la evaluación inicial indica que el termopar no funciona correctamente se debe crear uno nuevo y sustituirlo. La fabricación del termopar comienza cortando 70 cm de alambre termopar calibre 24 con recubrimiento de fibra de vidrio. A continuación se retiran 1.5 cm de recubrimiento de ambos extremos. Los dos alambres de un extremo se entrelazan y se sueldan con cautín. Para facilitar una conexión estable entre el termopar y las terminales del termómetro

digital se sueldan zapatas en cada una de las puntas de prueba del termopar. Con la finalidad de corroborar que el termopar fabricado funcione correctamente se realiza nuevamente el proceso de evaluación para termopares descrito anteriormente. Cuando el termopar está listo para instalarse se barrena un orificio en el sitio donde se encuentra el termopar a sustituir, se coloca el termopar nuevo y se fija a la tapa del biodigestor empleando fibra de vidrio.

En la figura 2.3 se muestra un termopar recién fabricado y una válvula hidráulica nueva.



*Figura 2.3. Termopar recién fabricado y válvula hidráulica nueva.*

### **2.1.3 Identificación y sellado de fugas**

Tras determinar la existencia de fugas en el cuerpo del biodigestor se procedió a su localización puntual, para lo cual el biorreactor se llenó con aire y se le aplicó una mezcla de agua y jabón. El crecimiento de una burbuja indica el lugar donde existe un escape de aire, tal como lo muestra la figura 2.4.





*Figura 2.4. Localización de una fuga en el cuerpo del biodigestor.*

El procedimiento para eliminar las fugas consiste en lijar la zona en la que se localiza el escape de aire y aplicar una capa de resina para fibra de vidrio, posteriormente se coloca una capa de fibra de vidrio y se aplica una nueva capa de resina. La operación se realiza un par de veces y luego se deja secar al sol durante algunos minutos.

Este proceso también es empleado para realizar reparaciones como taponadas de roturas o para reforzar zonas debilitadas, como por ejemplo, las cejas de la tapa y el cuerpo del biodigestor que permiten el sellado mediante el uso de tuercas y tornillos. Esta técnica tiene aplicaciones tan diversas que incluso se empleó para fabricar y sustituir la ceja interior de la tapa de un biodigestor, proceso que se ilustra en la figura 2.5.



*Figura 2.5. Reparación de una tapa empleando fibra de vidrio.*

La ceja se fabricó empleando el cuerpo del biodigestor como molde, para posteriormente retirarla, lijar tanto la tapa como la ceja, y aplicar resina de fibra de vidrio en la unión de las mismas. Con la intención de evitar algún desplazamiento de la ceja, esta se fijó provisionalmente a la tapa con ayuda de prensas C.

#### **2.1.4 Evaluación final**

Antes de aprobar un biodigestor para su uso se realizó una evaluación final. Esta evaluación es idéntica a la evaluación inicial y tiene la finalidad de proporcionar información que permita aprobar el estado de un biodigestor para su uso o señalar las fallas que hayan prevalecido. En el último de los casos se deben repetir los procedimientos aplicables ya descritos y realizar una nueva evaluación hasta que esta indique que el biodigestor está listo para su utilización.

## **2.2 Recolección de muestras de excremento**

Esta etapa de las pruebas experimentales resulta sumamente importante para determinar el potencial de energía generable a partir de los desechos del rancho “Los Dos Hermanos” porque permite el estudio adecuado de los excrementos a emplear.

Contar con muestras frescas y libres de elementos indeseados permitió obtener resultados confiables en las pruebas de masa seca, masa volátil y densidad del excremento, mismas que habrían de determinar parámetros como la dilución del sustrato y la carga orgánica.

El proceso de recolección de las muestras de excremento de cerdo, vaca y caballo se realizó en dos etapas: limpieza del establo y captación de las muestras.

### **2.2.1 Limpieza del establo**

Para evitar en medida de lo posible la presencia de basura arrastrada por el viento se limpió el establo en la noche anterior a la recolección de las muestras. Lavar el suelo del recinto cuando los animales se disponían a descansar permitió mantener la superficie libre de estiércol hasta la mañana siguiente, ya que de acuerdo con los productores del rancho “Los Dos Hermanos”, el ganado no suele defecar durante la noche. De esta forma se evitó recoger estiércol producido varias horas antes de la recolección.

### **2.2.2 Captación de las muestras**

La captación de las muestras se realizó con los primeros rayos de sol del día siguiente, cuando el excremento aún se encontraba fresco. Debido a que sobre el recinto únicamente se encontraba el estiércol recién producido, la colecta resultó sumamente sencilla. Las muestras se recogieron con ayuda de una pala y se colocaron en bolsas de plástico para su posterior sellado.

## 2.3 Determinación de la masa seca

La masa seca contenida en los excrementos de cerdo, vaca y caballo se determinó de manera experimental empleando el procedimiento propuesto por Jesús R. González y Luis R. González (2014) siguiendo los pasos descritos a continuación.

### 2.3.1 Pesaje de las muestras frescas

El pesaje de las muestras frescas se realizó con ayuda de una báscula digital de laboratorio marca Scout Pro con capacidad de hasta 2000 gramos. Inicialmente se pesaron los recipientes vacíos que serían empleados como contenedores, para luego pesarlos conteniendo la muestra cuya masa se desea conocer, tal como se puede apreciar en la figura 2.6. Cada pesaje se realizó tres ocasiones y se tomó como valor verdadero el promedio obtenido. La masa del excremento fresco es la diferencia entre la masa del contenedor lleno y vacío.



Figura 2.6. Pesaje de una muestra fresca de excremento de caballo.

Los valores correspondientes al pesaje de masa fresca se presentan en la tabla 2.2.

| Muestra de excremento | Masa del recipiente [g] | Masa total [g] | Masa fresca [g] |
|-----------------------|-------------------------|----------------|-----------------|
| Cerdo                 | 61.2                    | 205.4          | 144.2           |
| Vaca                  | 94.2                    | 377.2          | 283             |
| Caballo               | 95.4                    | 314.2          | 218.8           |

Tabla 2.2. Pesaje de masa fresca.

### 2.3.2 Horneado

Después de pesar las muestras frescas de estiércol se procedió a su horneado a 105 °C dentro de una mufla durante 48 horas, con lo cual se eliminó toda la humedad y agua contenida en las excretas. La figura 2.7 presenta las muestras de excremento de cerdo, vaca y caballo dentro de la mufla antes y después del proceso de secado.



Figura 2.7. Excrementos frescos (izquierda) y secos (derecha).

### 2.3.3 Pesaje de las muestras secas

Al finalizar la fase de horneado de las muestras se procedió a pesarlas de nuevo con la finalidad de conocer la masa de los excrementos libres de humedad. Al igual que se hizo en el primer pesaje, fue necesario descontar el peso de los recipientes. Los resultados de este nuevo pesaje se presentan en la tabla 2.3.

| Muestra de excremento | Masa del recipiente [g] | Masa total [g] | Masa deshidratada [g] |
|-----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Cerdo                 | 61.2                    | 93.6           | 32.4                  |
| Vaca                  | 94.2                    | 137            | 42.8                  |
| Caballo               | 95.4                    | 152            | 56.6                  |

Tabla 2.3. Pesaje de masa deshidratada.

### 2.3.4 Cálculos

Con base en los valores registrados en las tablas 2.2 y 2.3 se calculó la masa seca del excremento de cerdo empleando la ecuación (2) tal como se muestra a continuación:

$$m_s = \left[ 1 - \frac{m_h - m_d}{m_h} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$m_s = \left[ 1 - \frac{144.2 \text{ g} - 32.4 \text{ g}}{144.2 \text{ g}} \right] \times 100\%$$

$$m_s = 22.47\%$$

Empleando una hoja de datos del software Microsoft Excel se repitió el procedimiento anterior para calcular la masa seca de las otras muestras. Los resultados obtenidos se incluyen en la tabla 2.4.

| Muestra de excremento | Masa seca [%] |
|-----------------------|---------------|
| Cerdo                 | 22.47         |
| Vaca                  | 15.12         |
| Caballo               | 25.87         |

Tabla 2.4. Masa seca de las muestras de vaca, cerdo y caballo.

## 2.4 Determinación de la masa volátil

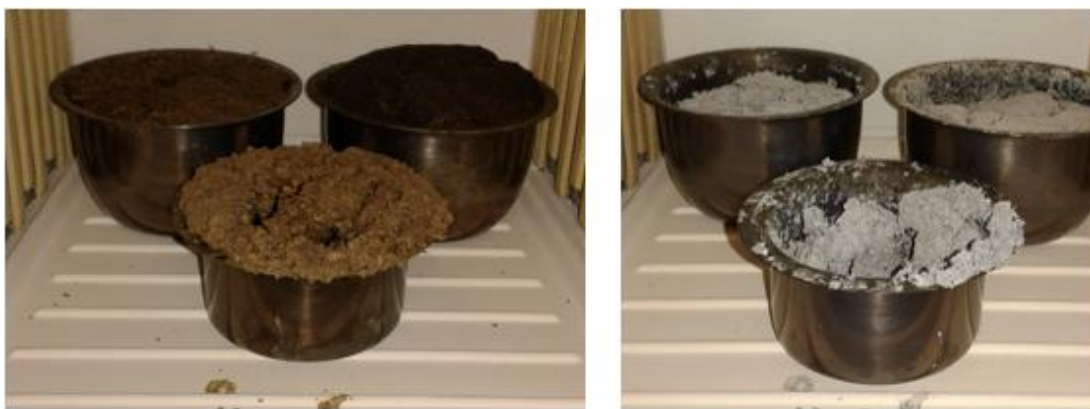
El porcentaje de materia orgánica presente en las muestras de estiércol, es decir, la masa volátil de los excrementos de cerdo, vaca y caballo se determinó de manera experimental empleando el procedimiento propuesto por Jesús R. González y Luis R. González (2014) siguiendo los pasos descritos a continuación.

### 2.4.1 Pesaje las muestras secas

Los resultados del pesaje de las muestras deshidratadas de excremento de cerdo, vaca y caballo se pueden consultar en la tabla 2.3. Estos resultados son el punto de partida para el cálculo de la masa volátil, la cual está estrechamente relacionada con la masa seca.

### 2.4.2 Incineración

Tras concluir el proceso de secado y pesaje de las muestras se procedió a incinerarlas en la mufla a 550 °C durante 6 horas. La figura 2.8 es una fotografía comparativa de las muestras de excremento de cerdo, vaca y caballo dentro de la mufla antes y después del proceso de incineración.



*Figura 2.8. Excrementos secos (izquierda) e incinerados (derecha).*

### 2.4.3 Pesaje de las muestras incineradas

Las muestras incineradas se pesaron con la finalidad de conocer la masa de la materia orgánica que ha de convertirse en biogás. Al igual que se hizo en los pesajes anteriores, fue necesario descontar el peso de los recipientes. Los resultados de este nuevo pesaje se dan a conocer en la tabla 2.5.

| Muestra de excremento | Masa del recipiente [g] | Masa total [g] | Masa incinerada [g] |
|-----------------------|-------------------------|----------------|---------------------|
| Cerdo                 | 61.2                    | 64.3           | 3.1                 |
| Vaca                  | 94.2                    | 106.7          | 12.5                |
| Caballo               | 95.4                    | 103.7          | 8.3                 |

Tabla 2.5. Pesaje de masa incinerada.

### 2.4.4 Cálculos

Tomando en cuenta los valores registrados en las tablas 2.3 y 2.5 se calculó la masa volátil del excremento de cerdo empleando la ecuación (5) tal como se muestra a continuación:

$$m_v = \left[ \frac{m_d - m_i}{m_d} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$m_v = \left[ \frac{32.4 \text{ g} - 3.1 \text{ g}}{32.4 \text{ g}} \right] \times 100\%$$

$$m_v = 90.43\%$$

Los datos de masa seca y volátil del excremento de cerdo indican que el 22.47% del estiércol es materia libre de humedad, y el 90.43% de ella debería ser capaz de convertirse en biogás. Los cálculos correspondientes para las muestras de vaca y caballo se realizaron con ayuda del software Microsoft Excel y los resultados obtenidos se incluyen en la tabla 2.6.



| Muestra de excremento | Masa volátil [%] |
|-----------------------|------------------|
| Cerdo                 | 90.43            |
| Vaca                  | 70.79            |
| Caballo               | 85.34            |

Tabla 2.6. Masa volátil de las muestras de vaca, cerdo y caballo.

## 2.5 Determinación de la densidad del excremento

Dado que la densidad es la relación existente entre la masa y el volumen, conocerla facilita los cálculos en los que intervengan la masa o el volumen del excremento, lo cual permite calcular de manera sencilla parámetros como la carga orgánica o la dilución del sustrato, entre otros.

El procedimiento empleado para determinar la densidad del excremento consiste en pesar las muestras frescas y medir el volumen del recipiente empleado para posteriormente calcular la densidad mediante la ecuación (8):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Donde:

$m$  = masa de la muestra, kg.

$V$  = volumen del recipiente, m<sup>3</sup>.

### 2.5.1 Pesaje de las muestras frescas

El pesaje de las muestras frescas de excremento se realizó de manera similar a los pesajes descritos previamente, es decir, inicialmente se pesaron los recipientes vacíos que serían empleados como contenedores, para luego pesarlos conteniendo la muestra cuya masa se desea conocer, de modo que la masa del excremento fresco es la diferencia entre la masa del contenedor lleno y vacío.

Debido a que se desea conocer la cantidad de masa de excremento por unidad de volumen se tomó la precaución de llenar completamente los contenedores, evitando comprimir el estiércol para evitar mediciones y cálculos erróneos. Cada pesaje se realizó tres ocasiones y se tomó como valor verdadero el promedio obtenido.

Los resultados de los pesajes realizados con la finalidad de cuantificar la densidad del estiércol del ganado se presentan en la tabla 2.7.

| Muestra de excremento | Masa [kg] |
|-----------------------|-----------|
| Cerdo                 | 0.1442    |
| Vaca                  | 0.283     |
| Caballo               | 0.2188    |

*Tabla 2.7. Masa de las muestras empleadas para calcular su densidad.*

### **2.5.2 Determinación del volumen del recipiente**

Debido a que los recipientes empleados como contenedores del excremento carecen de graduación fue necesario determinar su volumen de manera experimental. Para llevar a cabo dicha labor se midió la máxima suma de agua que cada recipiente puede contener (ya que los contenedores se llenaron al máximo con estiércol para su pesaje), tomando como referencia que la densidad del agua a 4 °C es de 1000 kg/m<sup>3</sup> según Tipler y Mosca (2006).

Para determinar el volumen del recipiente, éste se llenó completamente con agua de modo que el líquido alcanzara justamente el mismo nivel que el estiércol alcanzó al ser depositado en el contenedor para su pesaje. Posteriormente se pesó el recipiente lleno de agua y se le descontó el peso del recipiente vacío con la finalidad de obtener el peso del agua. Los resultados de estos pesajes se muestran en la tabla 2.8.

| Muestra de excremento | Masa del recipiente [kg] | Masa del recipiente lleno de agua [kg] | Masa del agua [kg] |
|-----------------------|--------------------------|--|--------------------|
| Cerdo                 | 0.061                    | 0.216                                  | 0.155              |
| Vaca                  | 0.094                    | 0.3912                                 | 0.2972             |
| Caballo               | 0.0953                   | 0.3877                                 | 0.2924             |

Tabla 2.8. Masa de los recipientes y del agua.

Despejando  $V$  de la ecuación (8) se obtiene la expresión (9), la cual permite determinar el volumen del contenedor, y por lo tanto, el volumen de las muestras de excremento:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (9)$$

A continuación se ejemplifica el cálculo del volumen del recipiente empleado para pesar el excremento de cerdo utilizando la ecuación (9) y los datos de la tabla 2.8:

$$V = \frac{0.155 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 0.000155 \text{ m}^3$$

El volumen de los otros recipientes se calculó mediante el uso de una hoja de datos y los resultados se incluyen en la tabla 2.9:

| Muestra de excremento | Volumen [m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------|---------------------------|
| Cerdo                 | 0.000155                  |
| Vaca                  | 0.0002972                 |
| Caballo               | 0.0002924                 |

Tabla 2.9. Volumen de los recipientes (y de los excrementos).

### 2.5.3 Cálculos

Conociendo la masa y volumen (tablas 2.7 y 2.9, respectivamente) de las muestras de excremento se determinó la densidad del estiércol a partir de la ecuación (8). A continuación se ejemplifica el cálculo de la densidad del excremento de cerdo:

$$\rho = \frac{m}{V}$$
$$\rho = \frac{0.1442 \text{ kg}}{0.000155 \text{ m}^3}$$
$$\rho = 930.3226 \text{ kg/m}^3$$

La densidad de las excretas de vaca, caballo y cerdo se calculó mediante el uso de una hoja de datos y los resultados se incluyen en la tabla 2.10:

| Muestra de excremento | Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------|-------------------------------|
| Cerdo                 | 930.3226                      |
| Vaca                  | 952.2207                      |
| Caballo               | 748.2900                      |

Tabla 2.10. Densidad de las excretas.

## 2.6 Determinación de la concentración del sustrato

En situaciones en las que se tiene una cantidad considerable de desechos orgánicos disponibles diariamente, como en el caso del rancho “Los Dos Hermanos”, se recomienda el uso de biodigestores continuos, los cuales operan mejor cuando el sustrato posee entre 8 y 12% de masa seca. Este intervalo, que es recomendable pero no excluyente (porque concentraciones fuera de dicho intervalo también permiten obtener cantidades aceptables de biogás), se tomó como referencia para determinar las concentraciones de las mezclas a realizar con la finalidad de preparar sustratos válidos para su uso en el rancho.

Cuando la masa seca de la materia prima con la que se alimentará un biodigestor es mayor a dicho intervalo, es necesario agregar cierta cantidad de agua con la intención de lograr una concentración óptima. Dicha cantidad de agua puede calcularse empleando la fórmula (4):

$$m_a = m_h \times \left[ \frac{m_s}{\varphi} - 1 \right] \quad (4)$$

Donde:

$m_a$  = masa de agua presente en el sustrato, kg.

$m_h$  = masa hidratada, kg.

$m_s$  = masa seca, %.

$\varphi$  = concentración de masa seca en el sustrato, %.

### 2.6.1 Cálculos

A continuación se ejemplifica el procedimiento para determinar los porcentajes de agua y excremento que se recomienda mezclar si se desea que el sustrato a base de excremento de cerdo posea 8% de masa seca. Según las tablas 2.2 y 2.4 (masa de excremento fresco y deshidratado, respectivamente) se tiene:

$$m_h = 0.1442 \text{ kg}$$

$$m_s = 22.47\%$$

$$\varphi = 8\%$$

$$m_a = 0.1442 \text{ kg} \times \left[ \frac{22.47\%}{8\%} - 1 \right]$$

$$m_a = 0.2608 \text{ kg}$$

Por lo tanto, por cada 0.1442 kg de estiércol fresco de cerdo se deben agregar 0.2608 kg de agua.

En la práctica resulta más sencillo cuantificar el estiércol y el agua de manera volumétrica que de manera másica, por lo cual es conveniente emplear la densidad del agua y del excremento, así como la ecuación (9) para determinar el volumen de cada sustancia que se requiere mezclar para obtener la dilución deseada, que en este caso es 8%.

El volumen de estiércol de cerdo requerido es:

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{0.1442 \text{ kg}}{930.3226 \text{ kg/m}^3} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$v = 0.155 \text{ L de estiércol de cerdo}$$

El volumen de agua requerido es:

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{0.2608 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$v = 0.2608 \text{ L de agua}$$

Aplicando una regla de tres se determinan cuantos L de agua se requieren por cada litro de estiércol fresco:

$$v_{\text{agua}} = 1 \text{ L de estiércol fresco} \times \frac{0.2608 \text{ L de agua}}{0.155 \text{ L de estiércol fresco}}$$

$$v_{\text{agua}} = 1.6826 \text{ L de agua}$$

Los porcentajes volumétricos de ambas sustancias están dados por las ecuaciones (10) y (11):

$$\% \gamma = \frac{\gamma \times 100\%}{\gamma + \delta} \quad (10)$$

$$\% \delta = \frac{\delta \times 100\%}{\gamma + \delta} \quad (11)$$

Donde:

$\% \gamma$  = porcentaje volumétrico de estiércol fresco, %.

$\gamma$  = volumen de estiércol fresco, L.

$\% \delta$  = porcentaje volumétrico de agua, %.

$\delta$  = volumen de agua, L.

Para este caso particular, el porcentaje volumétrico del excremento de cerdo contenido en el sustrato es:

$$\% \gamma = \frac{1 L \times 100\%}{1L + 1.6826 L}$$

$$\% \gamma = 37.28\%$$

Por su parte, el porcentaje volumétrico del agua contenida en el sustrato es:

$$\% \delta = \frac{1.6826 L \times 100\%}{1L + 1.6826 L}$$

$$\% \delta = 62.72\%$$

Con ayuda de una hoja de datos en Microsoft Excel se repitió éste procedimiento para obtener sustratos de estiércol que posean 8 y 12% de masa seca. Los resultados se enlistan en la tabla 2.11.

| <b>Sustrato con 8% de masa seca</b>  |                          |                                 |                            |  |                             |                             |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Muestra de excremento</b>         | <b>Masa de agua [kg]</b> | <b>Volumen de estiércol [L]</b> | <b>Volumen de agua [L]</b> | <b>Volumen de agua por cada litro de estiércol [L]</b> | <b>%<math>\gamma</math></b> | <b>%<math>\delta</math></b> |
| Cerdo                                | 0.2608                   | 0.155                           | 0.2608                     | 1.6826   | 37.28                       | 62.72                       |
| Vaca                                 | 0.252                    | 0.2972                          | 0.252                      | 0.8479   | 54.11                       | 45.89                       |
| Caballo                              | 0.4887                   | 0.2924                          | 0.4887                     | 1.6713   | 37.43                       | 62.57                       |
| <b>Sustrato con 12% de masa seca</b> |                          |                                 |                            |  |                             |                             |
| <b>Muestra de excremento</b>         | <b>Masa de agua [kg]</b> | <b>Volumen de estiércol [L]</b> | <b>Volumen de agua [L]</b> | <b>Volumen de agua por cada litro de estiércol [L]</b> | <b>%<math>\gamma</math></b> | <b>%<math>\delta</math></b> |
| Cerdo                                | 0.1258                   | 0.155                           | 0.1258                     | 0.8116   | 55.20                       | 44.80                       |
| Vaca                                 | 0.0737                   | 0.2972                          | 0.0737                     | 0.2479   | 80.14                       | 19.86                       |
| Caballo                              | 0.2529                   | 0.2924                          | 0.2529                     | 0.8648   | 53.63                       | 46.37                       |

*Tabla 2.11. Porcentajes de agua y estiércol requeridos para lograr concentraciones adecuadas.*

La tabla 2.11 indica el intervalo de porcentajes de estiércol y agua recomendados para su uso en el rancho “Los Dos Hermanos”. En el caso concreto de los sustratos a base de estiércol porcino, se recomienda que el sustrato posea entre 37.2 y 55.2% de estiércol, mientras que para los sustratos de excremento de caballo se sugiere que su contenido de excretas oscile entre 37.4 y 53.6%. Por su parte, si se emplea sustrato a base de excretas de vaca, se recomienda que la mezcla incluya entre 54.1 y 80.1% de estiércol.

De acuerdo con la tabla 2.11, dos de los porcentajes recomendados son relativamente cercanos a 33.3% (37.2% y 37.4%) y tres son similares a 50% (55.2%, 53.6% y 54.1%). Este detalle es particularmente interesante porque permite la cuantificación de los componentes del sustrato de



una manera práctica. Por ejemplo, para el caso de los sustratos cercanos a 33.3%, bastaría con emplear un recipiente como referencia y agregar una parte de estiércol y dos partes de agua, mientras que en el caso de los sustratos cercanos a 50%, se agregaría una parte de excremento por una parte de agua.

Tomando en cuenta esta situación y los intervalos propuestos en la tabla 2.11, se prepararon 3 sustratos de excremento de cerdo, 1 de vaca y 2 de caballo; adicionalmente se preparó un sustrato de excremento de vaca altamente diluido tomando en cuenta que Jesús R. González y Luis R. González (2014) obtuvieron 0.260 litros de biogás diario por cada kg de estiércol empleando tres litros de agua por cada litro de excremento, siendo este su mejor resultado para los sustratos de excremento bovino. Todos los biodigestores se llenaron con 10 litros de sustrato, cada uno preparado con distintas proporciones de estiércol y agua con la finalidad de evaluar de manera experimental la concentración óptima. También se prepararon 3 sustratos de excrementos de vaca y caballo mezclados, cuya finalidad es determinar la viabilidad de digerir ambos tipos de desechos en el mismo biodigestor.

La diversidad de sustratos analizados se completa con 2 mezclas de excretas de cerdo, vaca y caballo, las cuales se prepararon tomando en cuenta la proporción en que se producen los excrementos diariamente en el rancho “Los Dos Hermanos”. En la tabla 2.12 se muestran las cantidades de excremento recolectables diariamente en el rancho “Los Dos Hermanos”.

| <b>Tipo de ganado</b> | <b>kg de estiércol por animal</b> | <b>Cantidad de animales</b> | <b>kg de estiércol totales</b> | <b>L de estiércol totales</b> |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Porcino               | 2.35                              | 4                           | 9.4                            | 8.75                          |
| Bovino                | 40                                | 4                           | 160                            | 152.35                        |
| Equino                | 15                                | 1                           | 15                             | 11.22                         |

*Tabla 2.12. Excremento recolectable en el rancho “Los Dos Hermanos”.*

La tabla 2.13 presenta las proporciones de excremento y agua que componen el sustrato de cada uno de los 12 biodigestores.

| Biodigestor no. | Excremento de cerdo [%] | Excremento de vaca [%] | Excremento de caballo [%] | Porcentaje de agua [%] |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1               | 50                      | -                      | -                         | 50                     |
| 2               | 66.67                   | -                      | -                         | 33.33                  |
| 3               | 33.33                   | -                      | -                         | 66.67                  |
| 4               | -                       | 50                     | -                         | 50                     |
| 5               | -                       | 25                     | -                         | 75                     |
| 6               | -                       | -                      | 50                        | 50                     |
| 7               | -                       | -                      | 33.33                     | 66.67                  |
| 8               | -                       | 25                     | 25                        | 50                     |
| 9               | -                       | 33.33                  | 16.67                     | 50                     |
| 10              | -                       | 16.67                  | 33.33                     | 50                     |
| 11              | 2.60                    | 44.07                  | 3.33                      | 50                     |
| 12              | 1.73                    | 29.3                   | 2.2                       | 66.67                  |

Tabla 2.13. Composición de los sustratos analizados.

Con la finalidad de validar las concentraciones empleadas en los doce biodigestores se calculó el porcentaje de masa seca presente en cada uno de los sustratos empleando la fórmula (3):

$$\varphi = \frac{m_h \times m_s}{m_h + m_a} \quad (3)$$

Donde:

$\varphi$  = concentración de masa seca en el sustrato, %.

$m_h$  = masa hidratada, kg.

$m_s$  = masa seca, %.

$m_a$  = masa de agua presente en el sustrato, kg.

A continuación se ejemplifica el cálculo correspondiente al sustrato del biodigestor número 11, conformado por los tres tipos de excremento bajo análisis en las proporciones en las cuales se tienen en el rancho.

La concentración total de masa seca en el sustrato es equivalente a la suma de las concentraciones individuales de cada excremento, de modo que la ecuación (3) puede emplearse una vez por cada excremento para obtener la ecuación (12):

$$\varphi = \frac{m_{h_1} \times m_{s_1}}{m_{h_1} + m_a} + \frac{m_{h_2} \times m_{s_2}}{m_{h_2} + m_a} + \frac{m_{h_3} \times m_{s_3}}{m_{h_3} + m_a} \quad (12)$$

Donde los subíndices 1, 2 y 3 sirven para discernir entre las distintas excretas. En este caso particular el subíndice 1 corresponde a los desechos porcinos, el subíndice 2 a los bovinos y el 3 a los equinos.

Inicialmente se calcula la masa del excremento de cerdo presente en el biodigestor a partir de una variación de la ecuación (9):

$$m_{h_1} = v_1 \times \rho_1$$

$$m_{h_1} = (10L \times 2.6\%) \times 930.3226 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 L}$$

$$m_{h_1} = 0.2419 \text{ kg}$$

Las masas de agua y de los otros tipos de estiércol se calcularon del mismo modo; la masa volátil fue determinada previamente en este capítulo. Una vez que las masas de cada sustancia han sido determinadas, se procede a aplicar la ecuación (12):

$$\varphi = \frac{0.2419 \text{ kg} \times 22.47\%}{0.2419 \text{ kg} + 5 \text{ kg}} + \frac{4.1964 \text{ kg} \times 15.12\%}{4.1964 \text{ kg} + 5 \text{ kg}} + \frac{0.2492 \text{ kg} \times 25.87\%}{0.2492 \text{ kg} + 5 \text{ kg}}$$

$$\varphi = 9.17\%$$

Por lo tanto, el sustrato del biodigestor 11 tiene 9.17% de masa seca, el cual es un valor aceptable. Los cálculos pertinentes a los otros sustratos se realizaron a cabo con ayuda de una hoja de datos de Microsoft Excel y sus resultados se presentan en la tabla 2.14.

| <b>Biodigestor no.</b> | <b>Excremento de cerdo [kg]</b> | <b>Excremento de vaca [kg]</b> | <b>Excremento de caballo [kg]</b> | <b>Agua [kg]</b> | <b>Porcentaje de masa seca [%]</b> |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------|
| 1                      | 4.65                            |                                |                                   | 5.00             | 10.83                              |
| 2                      | 6.20                            |                                |                                   | 3.33             | 14.62                              |
| 3                      | 3.10                            |                                |                                   | 6.67             | 7.13                               |
| 4                      | 0                               | 4.76                           |                                   | 5.00             | 7.38                               |
| 5                      | 0                               | 2.38                           |                                   | 7.50             | 3.64                               |
| 6                      | 0                               |                                | 3.74                              | 5.00             | 11.07                              |
| 7                      | 0                               |                                | 2.49                              | 6.67             | 7.04                               |
| 8                      | 0                               | 2.38                           | 1.87                              | 5.00             | 11.92                              |
| 9                      | 0                               | 3.17                           | 1.25                              | 5.00             | 11.04                              |
| 10                     | 0                               | 1.59                           | 2.49                              | 5.00             | 12.25                              |
| 11                     | 0.24                            | 4.20                           | 0.25                              | 5.00             | 9.17                               |
| 12                     | 0.16                            | 2.79                           | 0.16                              | 6.67             | 5.61                               |

*Tabla 2.14. Porcentaje de masa seca en los sustratos.*

Los resultados vertidos en la tabla 2.14 señalan que con excepción expresa de los biodigestores 5 y 12, el porcentaje de masa seca presente en los sustratos se encuentra entre 7 y 14 %, es decir, la concentración de sólidos totales es aceptable. En cuanto al biodigestor 5, cuya concentración es 3.64%, es necesario recordar que el sustrato fue diluido intencionalmente debido a que otros investigadores han encontrado que al agregar tres veces más agua que estiércol bovino se alcanzan mejores resultados que con mayores concentraciones. El sustrato del biodigestor 12 se diluyó también de manera premeditada con la intención de evaluar el comportamiento del sustrato compuesto por varios tipos de excretas con diluciones elevadas.

## 2.7 Llenado de los biodigestores

El llenado o carga de los biodigestores se llevó a cabo mediante tres etapas que comprenden la dosificación de la materia prima del sustrato, el mezclado de las mismas y el sellado de los biorreactores.

### 2.7.1 Dosificación de la materia prima

La dosificación de la materia prima empleada en el sustrato se llevó a cabo con ayuda de una “regla” de madera y un bote de 19 litros. Con la finalidad de facilitar la medición del estiércol y el agua, la regla se graduó especialmente con marcas equivalentes a 2.5 L, 3.33 L, 5 L, 6.67 L y 7.5 L. Estas marcas se calcularon obteniendo una relación proporcional entre la altura del bote y su volumen, es decir, entre 35 cm y 19 litros, de modo que un litro ocupa 18.42 mm de altura del bote.

En el caso particular de los biodigestores 11 y 12, cuyos sustratos emplearon bajas cantidades de estiércol de cerdo y caballo, se sustituyó el bote de 19 L por un recipiente de 1 L y se siguió el proceso descrito en el párrafo anterior.

La figura 2.9 ilustra las porciones de excremento de cerdo y caballo empleadas en el sustrato del biodigestor 11.



*Figura 2.9. Excremento de cerdo y caballo previamente dosificados.*

### 2.7.2 Mezclado

Tras dosificar el agua y estiércol requeridos para lograr las concentraciones de masa seca presentadas en la tabla 2.14 se procedió a verter las sustancias en el biodigestor y mezclarlas hasta que se incorporasen homogéneamente, teniendo cuidado de disolver las porciones de excremento que se agruparon formando grumos.

En la figura 2.10 se muestra el proceso de mezclado de un sustrato hecho a base de agua y estiércol de vaca.



*Figura 2.10. Mezclado del sustrato.*

### 2.7.3 Sellado de los biodigestores

La última etapa del llenado de los biodigestores es el sellado. Este procedimiento resulta fundamental debido a que un error durante el mismo podría permitir el escape del biogás producido, provocando errores en las mediciones de cantidad de dicho combustible. Además, si el biogás escapa por completo, el aire circundante podría ingresar al biodigestor, inhibiendo la proliferación y actividad de los microorganismos anaerobios encargados de descomponer la materia orgánica.

Para sellar los biodigestores se empleó sellador elástico a base de silicón, el cual se aplicó a manera de junta en la unión entre la tapa y el cuerpo del biodigestor. Adicionalmente se colocó sellador en la cabeza de los tornillos empleados para fijar la tapa.

Un par de horas después de la aplicación del sellador y antes de que el proceso de degradación anaeróbica pudiera verse afectado (pues inicialmente el oxígeno presente en el biodigestor es consumido por los microorganismos presentes en el sustrato), se verificó la ausencia de fugas con el mismo método empleado durante la fase de prueba de los biodigestores. En los casos en los que se identificó la presencia de una fuga, se reforzó la capa de sellador aplicado.

## **2.8 Toma de mediciones**

La toma de mediciones consistió en el monitoreo y captura de datos de los siguientes cuatro parámetros: presión, temperatura, contenido de metano y pH. Estas variables permiten determinar la cantidad de biogás producido y su calidad, al tiempo que funcionan como herramientas para detectar posibles anomalías durante el proceso de degradación anaeróbica.

Durante las primeras 15 semanas de la fase experimental se midió diariamente la presión de biogás generado y la temperatura del sustrato, mientras que el porcentaje de metano presente en el biogás y el pH del sustrato se cuantificaron semanalmente. Las primeras mediciones de porcentaje de metano en el biogás se realizaron entre las semanas 3 y 4, a partir de las cuales se tuvo suficiente biogás para realizar la prueba correspondiente. Tras las 15 primeras semanas del experimento, la presión del biogás y la temperatura dentro del biodigestor se midieron cada tercer día, en tanto que los otros parámetros se midieron normalmente.

### **2.8.1 Mediciones de presión**

Las mediciones de presión sirven como un indicador de la cantidad de biogás contenido en el biodigestor, aunque en realidad no indican cuantos litros se han producido.

Los biodigestores utilizados en el procedimiento experimental tienen un volumen total de 33 litros, 10 de los cuales son ocupados por el sustrato, por lo tanto, el biogás producido se acumula en los 23 litros restantes. Por esta razón, se puede afirmar que una vez que el biogás comienza a producirse, en todo momento habrá 23 L de biogás dentro del biodigestor. Sin embargo, la presión a la cual se almacena el biogás se incrementa en la medida en la que es producido. Dicho de otra forma, el volumen del biogás es constante, pero la presión dentro del biodigestor está en

función de la cantidad de biogás producido, de modo que un incremento en la presión significa que la cantidad de biogás ha aumentado.

No obstante, es posible determinar la cantidad de litros de biogás producido tomando como referencia su densidad normal, es decir,  $1.25 \text{ kg/m}^3$  a una presión de una atmósfera. Para llevar a cabo dicho cálculo se requieren conocer ciertos factores como la masa molar del biogás en cuestión y la presión a la cual se encuentra, entre otros. Este procedimiento se detalla y ejemplifica en el tercer capítulo, correspondiente a los resultados de la investigación experimental.

La presión se midió conectando un manómetro tipo Bourdon a la válvula superior de los biodigestores, tal como se muestra en la figura 2.11:



*Figura 2.11. Medición de presión.*

Al medir la presión se tomaron cuatro lecturas para cada biodigestor y se tomó su promedio como el valor verdadero.

Debido a que los biodigestores tienen una resistencia máxima a presiones internas de 7 psi y no cuentan con válvulas de alivio de presión, siempre que la presión interna de un biodigestor sobrepasó los 6 psi se quemó cierta cantidad de biogás, de modo que se eliminara el riesgo de una explosión por exceso de presión. Con la finalidad de controlar la cantidad de biogás



quemado se colocó un manómetro en la unión entre la válvula del biodigestor y la alimentación de la estufa de gas utilizada. La figura 2.12 muestra la quema del biogás excedente.



*Figura 2.12. Quema del biogás excedente.*

## **2.8.2 Mediciones de temperatura**

Medir la temperatura dentro y fuera del biodigestor permite llevar un registro de las variaciones que ocurren durante el proceso de producción de biogás, con lo cual se puede identificar una anomalía que podría producir una inhibición de la actividad microorgánica.

La medición de la temperatura del sustrato se realizó con ayuda de un termómetro digital conectado a un termopar que forma parte de la tapa del biodigestor y cuyo extremo está en contacto con el sustrato. En la figura 2.13 se aprecia la medición de la temperatura dentro de un biodigestor.

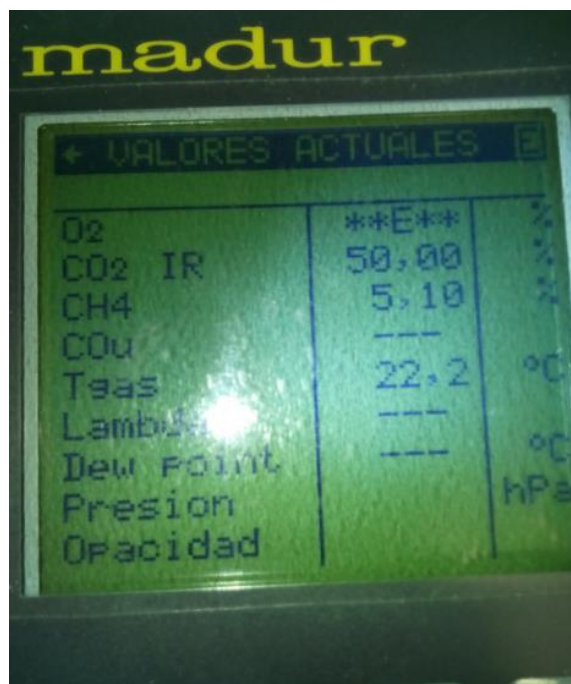


*Figura 2.13. Medición de la temperatura ambiente y dentro del biodigestor.*

Debido a que el termómetro empleado permite la toma de mediciones con dos sondas simultáneas, es posible medir la temperatura ambiente con una sonda y al mismo tiempo medir la temperatura dentro del biodigestor utilizando el termopar como sonda. La temperatura del sustrato se midió cuatro veces y se tomó su promedio como valor verdadero, mientras que la temperatura ambiente se registró una vez por cada biodigestor. El promedio de la temperatura ambiente registrada para cada biodigestor se contempló como el valor verdadero.

### **2.8.3 Mediciones de contenido de CH<sub>4</sub>**

Uno de los parámetros más importantes del biogás es su contenido de metano, compuesto que representa el combustible contenido en el biogás. Para cuantificar el metano presente en el biogás se requiere equipo especializado capaz de determinar los componentes presentes en el gas y sus respectivas cantidades, en este caso se empleó un analizador de gases Madur Ga-21 plus, cuya pantalla se presenta en la figura 2.14.



*Figura 2.14. Pantalla del analizador de gases durante una medición de componentes del biogás.*

Este analizador de gases es capaz de identificar y cuantificar los componentes de una amplia variedad de gases, además de permitir la captura de datos en tiempo real en una computadora. Si se desea habilitar esta última función, basta con conectar el analizador de gases y el ordenador por medio de un cable RS – 232 e iniciar el software del equipo.

El procedimiento requerido para llevar a cabo la medición del porcentaje de metano presente en el biogás consiste ajustar la boquilla del analizador de gases a la válvula superior del biodigestor e iniciar las lecturas. Los datos obtenidos describen componentes presentes en el biogás como metano, monóxido y dióxido de carbono y ácido sulfhídrico, así como la temperatura del mismo.

La figura 2.15 muestra las conexiones realizadas entre el ordenador, el analizador de gases y un biodigestor.



Figura 2.15. Conexiones entre el ordenador, el analizador de gases y un biodigestor.

## 2.8.4 Mediciones de pH

La medición del pH se realizó mediante la utilización de tiras reactivas, las cuales cambian de color tras sumergirse dentro del sustrato, permitiendo así su cotejo con una carta comparativa que indica el pH de la sustancia analizada, tal como se ilustra en la figura 2.16.



Figura 2.16. Papel reactivo para medir el pH.

Para obtener una muestra del sustrato dentro del biodigestor basta con abrir ligeramente la válvula inferior del mismo y permitir la salida de una cantidad mínima de la mezcla. Se debe evitar abrir demasiado la válvula, pues en este caso podría escapar una cantidad considerable de sustrato.

## **2.9 Vaciado de los biodigestores**

Tras finalizar el proceso de obtención de biogás se procedió al vaciado de los biodigestores. Esta etapa permitió observar el digestato e identificar fenómenos como la sedimentación de partículas y la presencia de espuma en algunos sustratos.

### **2.9.1 Apertura de los biodigestores**

La apertura de los biodigestores comenzó con la extracción del sellador aplicado sobre los tornillos que fijan la tapa al cuerpo del biodigestor. Posteriormente se retiraron los tornillos y con ayuda de una navaja se cortó la junta de sellador que se colocó entre la tapa y el cuerpo del biorreactor.

Por último se empleó un par de desarmadores para hacer palanca y retirar fácilmente la tapa.

Antes de vaciar los biodigestores se observó el digestato contenido en ellos. Algunos digestato presentaron características peculiares que se muestran y analizan en el capítulo 3.

### **2.9.2 Vaciado**

El contenido de los biodigestores se vació en un terreno baldío dentro de la F.E.S. – Cuautitlán. La figura 2.17 muestra el digestato de un biodigestor vertido sobre el terreno.



*Figura 2.17. Digestato vertido sobre un terreno de plantación.*

### **2.9.3 Limpieza**

La limpieza de los biodigestores se realizó empleando una hidrolavadora y un cepillo de escoba. Inicialmente se enjuagó ligeramente cada biodigestor y posteriormente se cepilló su superficie; el proceso se repitió hasta que todas las trazas de excremento se retiraron.

El agua empleada para lavar los biodigestores se reutilizó para regar la flora ornamental de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria (UIM) de la F.E.S. – Cuautitlán.

### Capítulo 3. Análisis de resultados.

En el presente capítulo se realiza la comparación de los resultados de la muestra más representativa de cada tipo de sustrato, es decir, la mejor muestra de sustratos a base de estiércol de cerdo, la muestra de los sustratos de excremento de vaca que obtuvo resultados superiores, la principal muestra de los sustratos de excretas de caballo y la muestra más sobresaliente de los cinco sustratos de diversas mezclas de estiércol del ganado del rancho “Los Dos Hermanos”. Los resultados de cada sustrato se incluyen en el Apéndice 1, en el cual se analizan y agrupan los sustratos de acuerdo con la materia prima utilizada.

Antes de presentar los resultados obtenidos es conveniente recordar la composición de los sustratos empleados y mencionar el tiempo que duró bajo estudio cada muestra. Estos datos se presentan en la tabla 3.1:

| Biodigestor no. | Excremento de cerdo [%] | Excremento de vaca [%] | Excremento de caballo [%] | Porcentaje de agua [%] | Duración de la prueba [días] |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1               | 50                      | -                      | -                         | 50                     | 102                          |
| 2               | 66.67                   | -                      | -                         | 33.33                  | 102                          |
| 3               | 33.33                   | -                      | -                         | 66.67                  | 67                           |
| 4               | -                       | 50                     | -                         | 50                     | 221                          |
| 5               | -                       | 25                     | -                         | 75                     | 221                          |
| 6               | -                       | -                      | 50                        | 50                     | 221                          |
| 7               | -                       | -                      | 33.33                     | 66.67                  | 214                          |
| 8               | -                       | 25                     | 25                        | 50                     | 214                          |
| 9               | -                       | 33.33                  | 16.67                     | 50                     | 214                          |
| 10              | -                       | 16.67                  | 33.33                     | 50                     | 214                          |
| 11              | 2.60                    | 44.07                  | 3.33                      | 50                     | 165                          |
| 12              | 1.73                    | 29.3                   | 2.2                       | 66.67                  | 165                          |

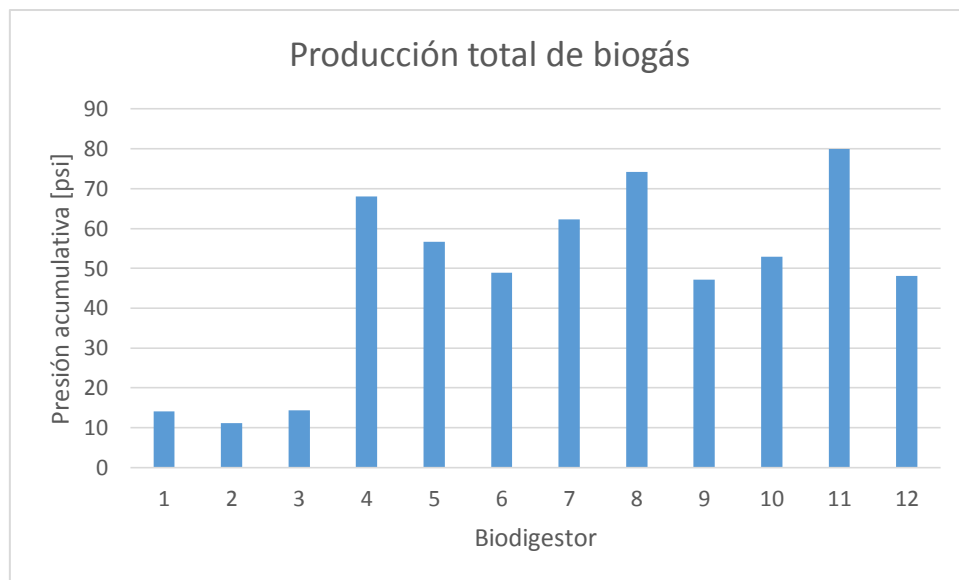
Tabla 3.1. Composición de los sustratos y duración de las pruebas.

La diferencia en la duración de las pruebas se debe a que los biodigestores se llenaron en tres etapas y a que sólo algunos de ellos culminaron su producción de biogás por completo. En la

primera etapa se llenaron los biodigestores 1 a 6, mientras que los biodigestores 7 a 10 se llenaron una semana después. La tercera etapa de llenado se ejecutó 8 semanas después de la primera y en ella únicamente se llenaron los biodigestores 11 y 12.

Cabe mencionar que los biodigestores 1, 2 y 3 son los únicos que finalizaron totalmente su producción de biogás antes de ser vaciados, en contraste, los otros biodigestores aún presentaban una pequeña producción de biogás.

La gráfica 3.1 presenta las presiones acumulativas totales registradas para los 12 biodigestores, parámetro que como se mencionó en el capítulo 2, sirve como un indicador de la cantidad de biogás producido (para un mismo volumen, una mayor presión indica una mayor cantidad de gas), aunque no indica cuanto metano se ha producido.



*Gráfica 3.1. Producción total de biogás.*

La gráfica 3.1 indica que los sustratos número 3, 4, 7 y 11 obtuvieron la mayor producción de biogás según su tipo; sin embargo, esto no necesariamente significa que sean las mejores opciones para producir biogás, pues se debe tener en cuenta la cantidad de metano presente en él y la cantidad de sustrato que se podría preparar con el estiércol que se tiene disponible en el rancho. Por esta razón, un mejor indicador de la calidad y cantidad del biogás producido es la relación de litros de metano por kg de excretas.



La tabla 3.2, que muestra la relación de litros de metano producidos por cada kilogramo de excretas empleadas en el sustrato, permite identificar las muestras que obtuvieron mejores resultados y que serán comparadas a lo largo de este capítulo.

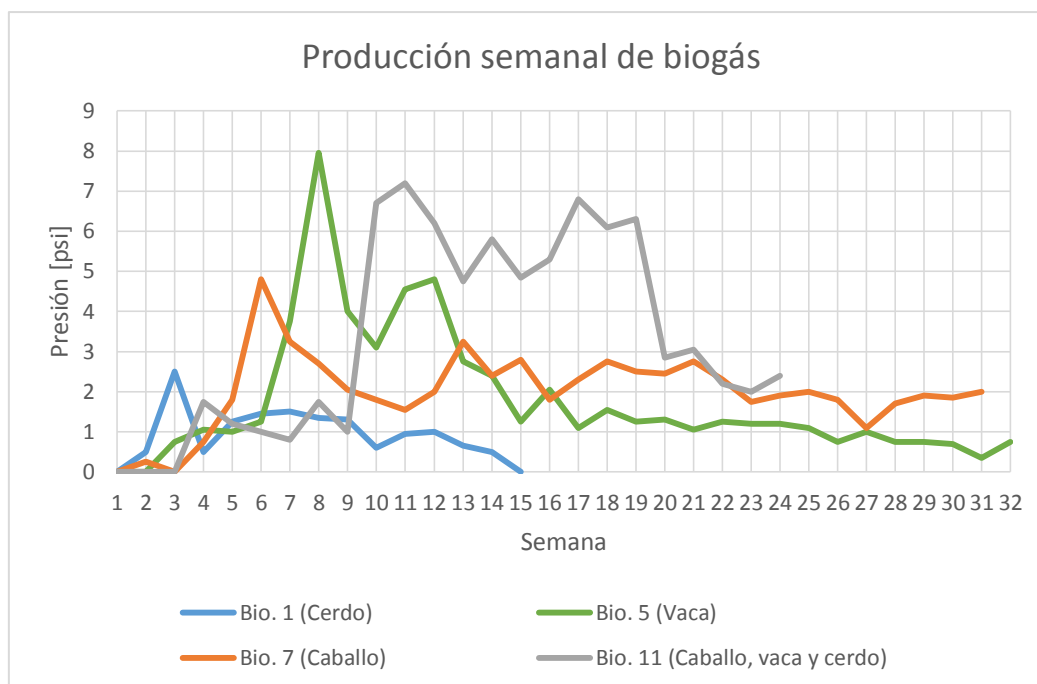
| <b>Biodigestor no.</b> | <b>L de metano por kg de excretas</b> | <b>Biodigestor no.</b> | <b>L de metano por kg de excretas</b> |
|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 0.4595                                | 7                      | 18.8067                               |
| 2                      | 0.1316                                | 8                      | 13.4882                               |
| 3                      | 0.3704                                | 9                      | 8.5673                                |
| 4                      | 10.9090                               | 10                     | 9.7414                                |
| 5                      | 18.2136                               | 11                     | 13.8295                               |
| 6                      | 9.4803                                | 12                     | 10.4937                               |

*Tabla 3.2. Litros de metano producidos por kg de excretas.*

Con base en los resultados plasmados en la tabla 3.2 es posible determinar que la muestra de sustrato de cerdo que dio mejores resultados es la muestra 1, mientras que en el caso de los sustratos de vaca, el contenido en el biodigestor 5 obtuvo la mayor producción. En cuanto a los sustratos a base de excretas de caballo, el sustrato del biodigestor 7 obtuvo la mejor relación de L de metano/kg de excretas, no sólo dentro de los sustratos de este tipo, sino de todas las muestras analizadas. Dentro de los sustratos de mezcla de distintos excrementos, el biodigestor 11 alcanzó la mejor producción.

### **3.1 Presión acumulativa**

La gráfica 3.2 muestra la comparativa de las presiones acumuladas por semana de la mejor muestra de cada tipo de sustrato, es decir, de los biodigestores 1 (cerdo), 5 (vaca), 7 (caballo) y 11 (cerdo, vaca y caballo).



Gráfica 3.2. Presiones acumuladas por semana de los biodigestores 1, 5, 7 y 11.

La gráfica 3.2 pone de manifiesto que el sustrato 1 produjo menos biogás que los otros sustratos analizados, además de haberlo producido durante menos tiempo. La producción semanal máxima fue lograda por el sustrato de vaca, pero tras la semana 13, su producción se vio superada por el sustrato de caballo. Sin embargo, ambos sustratos sufrieron una caída notable en su producción durante las dos primeras semanas después de alcanzar su clímax. En el caso del sustrato de vaca, pasó de 7.95 psi a 3.1 psi, mientras que el biogás producido por estiércol de caballo pasó de producir 4.8 psi de biogás en la semana 7 a producir 2.7 psi en la semana 9. Tras sufrir tales variaciones, la producción semanal de ambos sustratos se redujo y aumentó en varias ocasiones, pero nunca se registraron producciones similares a sus valores máximos.

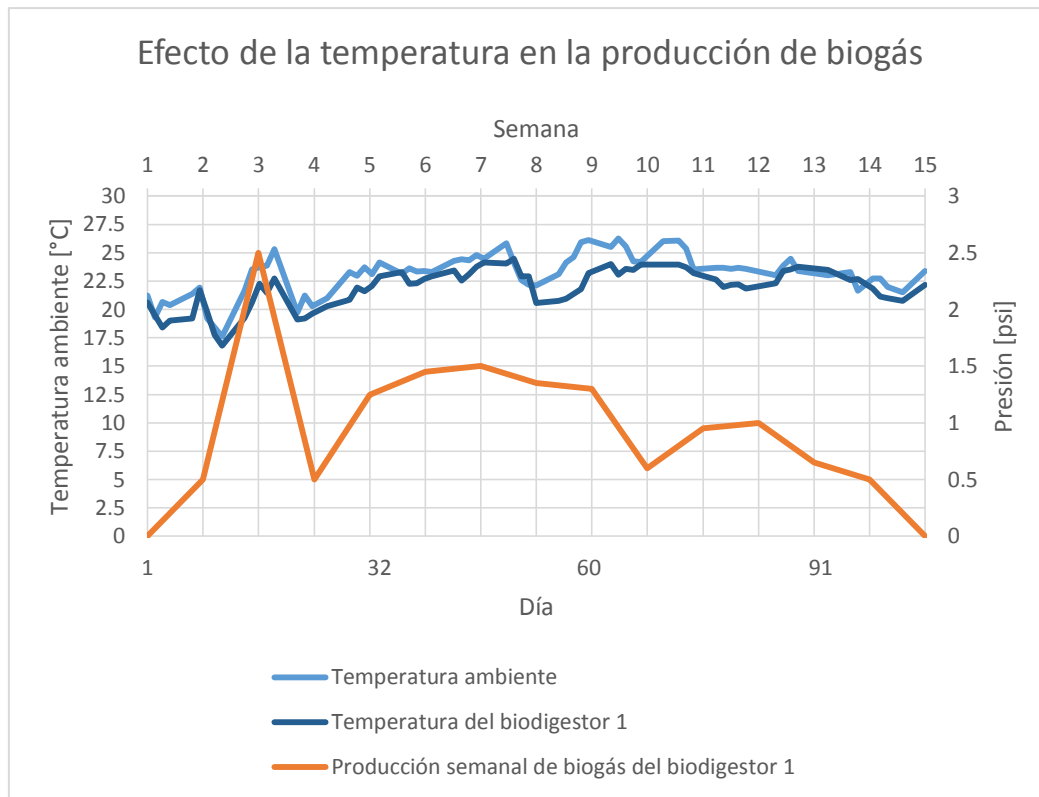
En cambio, el sustrato 11, mezcla de estiércol de vaca, cerdo y caballo, alcanzó su producción máxima durante la semana 11, en la cual registró una presión de 7.2 psi. Dos semanas después, su producción fue 4.75 psi, y seis semanas después de alcanzar su mejor producción semanal, registró 6.8 psi. Esta situación indicaría que el sustrato 11 tuvo una producción más estable que los otros sustratos, y aunque su producción máxima no alcanzara a la del sustrato de vaca, se mantuvo en valores relativamente altos durante 9 semanas.

La gráfica también 3.2 hace visible el tiempo que tardó cada muestra en alcanzar su producción máxima. Durante las 3 primeras semanas, el sustrato de cerdo obtuvo la mejor producción, alcanzando incluso su clímax. Al sustrato del biodigestor 7 le tomó 6 semanas alcanzar su mejor producción y al sustrato de vaca le tomó una semana más, mientras que al sustrato 11 le tomó 11 semanas lograr su mejor producción.

### **3.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás**

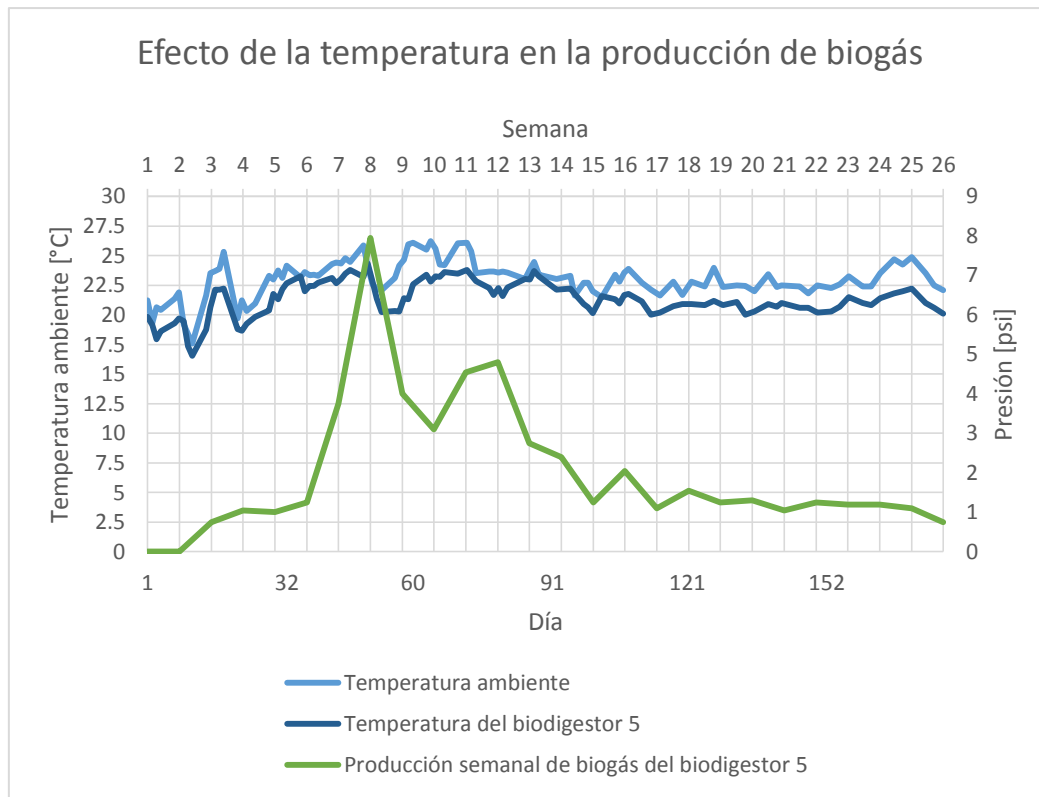
Una posible causa del considerable descenso de la producción semanal de los sustratos después de alcanzar su valor máximo es la variación de la temperatura, pues esta determina la velocidad con la que el biogás se produce y la proliferación de las bacterias que participan en el proceso, tal como se muestra en la tabla 1.6 (Rangos de temperatura para la producción del biogás).

El efecto de la variación de la temperatura sobre la producción de biogás se muestra en las gráficas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. Con base en estas gráficas y la tabla 1.6 es posible afirmar que el proceso de producción de biogás se encontró en el rango máximo de la temperatura psicrófila, comprendido entre los 20 y 25 °C. En este rango de temperatura las bacterias son menos sensibles a las variaciones de temperatura, pero la velocidad con la que degradan el sustrato es menor.



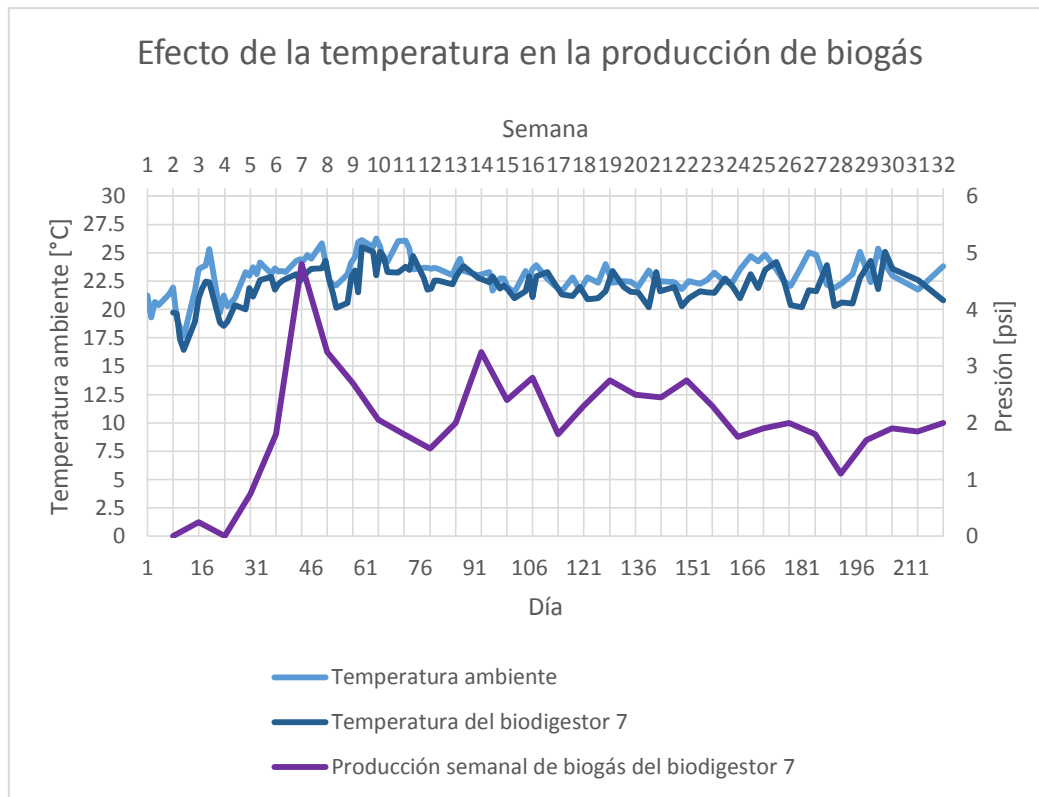
Gráfica 3.3. Efecto de la temperatura en la producción de biogás del biodigestor 1.

En la gráfica 3.3 se visualiza que entre las semanas 3 y 4 se produjo un descenso en la temperatura ambiente y dentro del biodigestor, con un descenso en la producción del biogás. Entre las semanas 8 y 9 también hubo una disminución en la temperatura, la cual podría ser la causante de la ligera disminución en la producción de esa semana y en la disminución aún más notable de la semana siguiente.



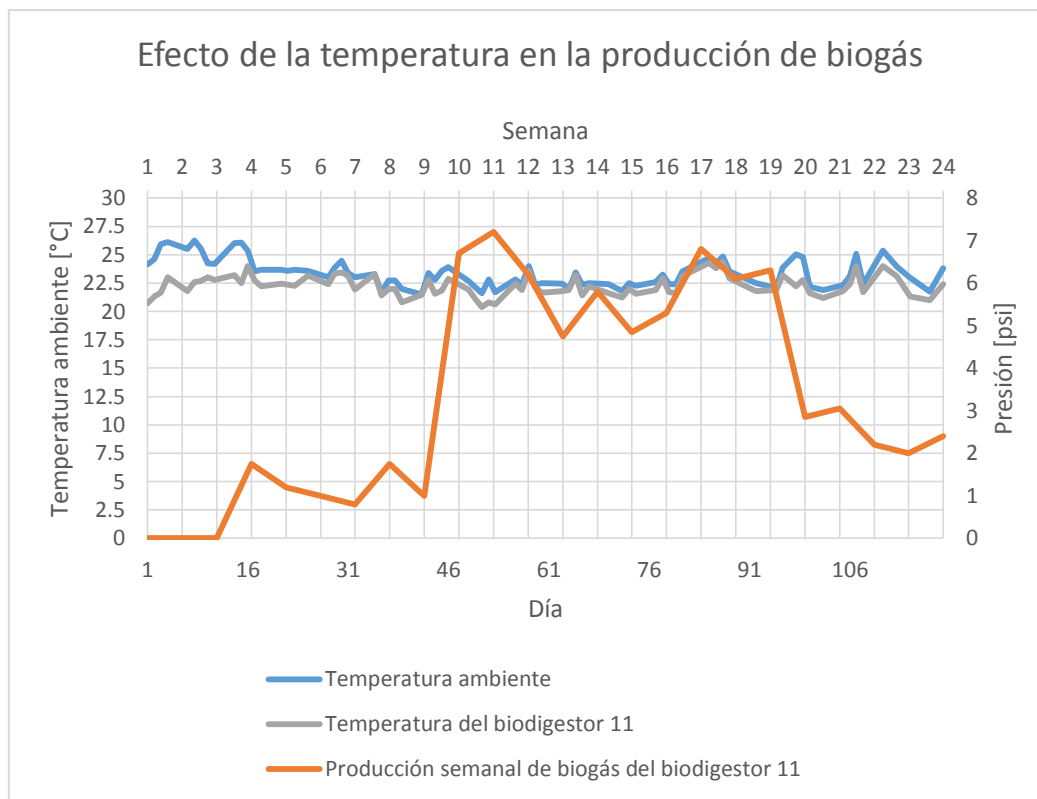
Gráfica 3.4. Efecto de la temperatura en la producción de biogás del biodigestor 5.

La gráfica 3.4 refleja que al principio de la semana 8 hubo una disminución en la temperatura ambiente de alrededor de 3.5 °C en dos días, mientras que la temperatura del sustrato disminuyó 4 °C en el mismo periodo. Estos cambios en la temperatura se pueden considerar drásticos, si se toma en cuenta que regularmente la temperatura cambia 1.8°C en lapsos de tiempo similares. En semanas como la 16, 18, 21 y 24 se notan ligeros aumentos en la producción de biogás con respecto a sus semanas inmediatas anteriores, dichos fenómenos coinciden en tiempo con incrementos en la temperatura ambiente y dentro del biodigestor.



Gráfica 3.5. Efecto de la temperatura en la producción de biogás del biodigestor 7.

La gráfica 3.5 muestra que la producción de biogás del sustrato 7 comenzó a disminuir antes de que la temperatura bajara en la semana 8, lo cual podría significar que la disminución de la producción del biogás se debió simplemente a que el lapso de producción máxima de este sustrato es corto. Sin embargo, la disminución de la temperatura sí pudo haber causado la inhibición de la actividad microbiana durante las semanas siguientes. Cabe mencionar que un aumento en la temperatura no asegura que la producción de biogás se restaure a la brevedad con valores elevados, pues esto depende de la cantidad de microorganismos que hayan sobrevivido al cambio de temperatura.



Gráfica 3.6. Efecto de la temperatura en la producción de biogás del biodigestor 11.

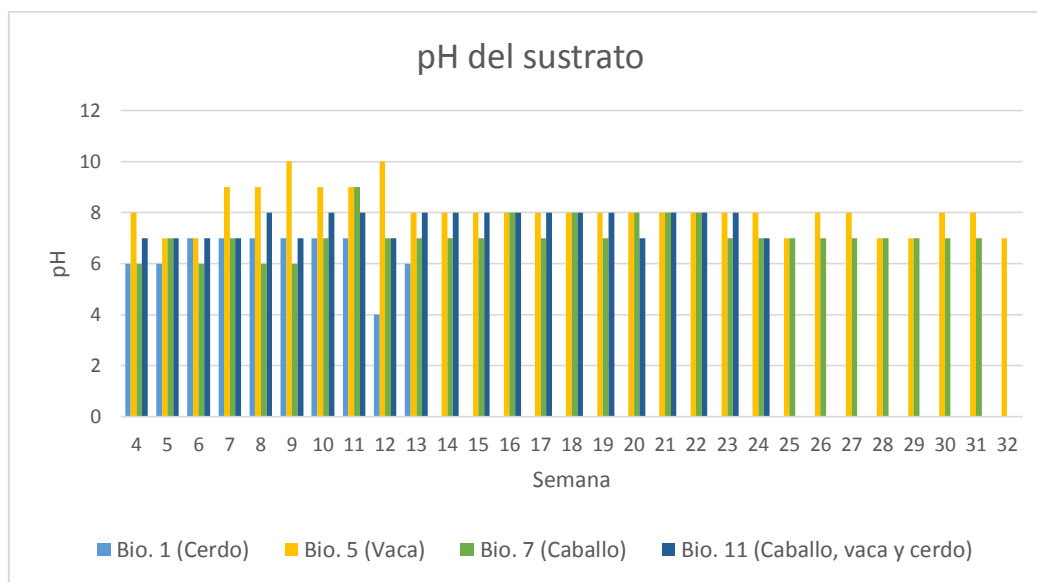
La gráfica 3.6 muestra que diferencia de los sustratos 1, 5 y 7, el sustrato 11 no sufrió cambios bruscos de temperatura durante su producción de biogás, salvo en la semana 20, en la cual se suscitó un cambio de alrededor de 3 °C. Sin embargo, la disminución en la producción del biogás podría deberse a que el periodo de producción máxima llegó a su fin y no a una variación de la temperatura.

Esta estabilidad en la temperatura del sustrato podría ser la causa de que su producción haya sido tan duradera y estable.

Las gráficas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 muestran que la temperatura dentro de los biodigestores fue inferior a la temperatura ambiente durante el proceso de producción de biogás. Estos resultados se obtuvieron empleando biodigestores discontinuos hechos de plástico reforzado con fibra de vidrio, sin agitador ni equipo calefactor para el sustrato, y almacenados sin exposición a la luz dentro del Laboratorio de Investigación en Energías Renovables de la F.E.S. – Cuautitlán.

### 3.3 pH del sustrato

Otro de los parámetros que interviene en la producción de biogás es el pH del sustrato, el cual se midió semanalmente y cuyos resultados se ilustran en la gráfica 3.7. Cabe mencionar que cuando el pH es menor a 6 la calidad del biogás suele ser mala, pues puede contener hasta un 70% de dióxido de carbono. Por el contrario, cuando el pH es mayor a 8 se produce un aumento descontrolado de amoníaco, compuesto capaz de detener la actividad de los microorganismos anaeróbicos. Por tales razones es recomendable que el pH del sustrato se encuentre entre 6.8 y 7.4, siendo 7 el valor óptimo.



Gráfica 3.7. pH de los sustratos.

Durante las semanas 4 y 5, el pH del sustrato del biodigestor 1 fue ácido y a partir de la semana 6 y hasta la 11 fue neutro. Sin embargo, en la semana 12 el pH volvió a acidificarse y su valor fue 4, lo cual pudo haber contribuido a que finalizara la producción de biogás.

En contraste, el pH del biodigestor 5 fue predominantemente alcalino, ya que en tan sólo 6 de las 28 semanas en las que se midió el pH se obtuvo un valor neutro. Aunque durante la mayoría de las pruebas el pH fue 8, durante las semanas 7 a 12 se alcanzaron valores entre 9 y 10 unidades. Coincidentemente, las presiones acumulativas registradas durante este periodo fueron las más altas, por lo cual se podría sugerir que este sustrato se vio beneficiado por su considerable alcalinidad.



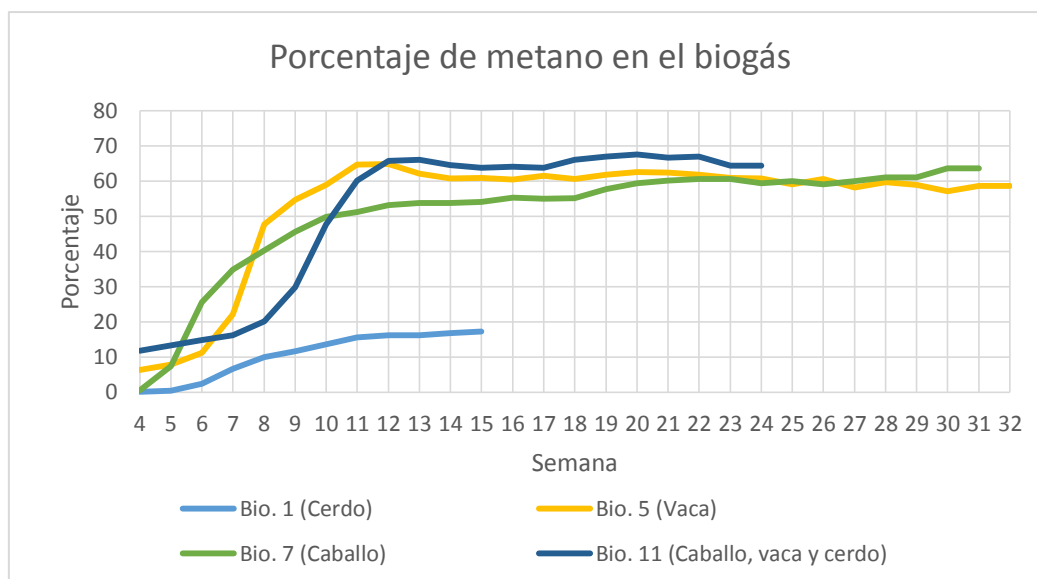
El sustrato del biodigestor 7 presentó valores de pH que oscilaron entre ácido, neutro y alcalino. Entre las semanas 4 y 9, el pH fue 6 en cuatro ocasiones, lo cual sugiere que inicialmente el pH fue predominantemente ácido. Posteriormente fue mayoritariamente neutro, aunque en ciertas ocasiones se volvió alcalino. En concreto, en la semana 11 alcanzó una alcalinidad de 9 unidades, y entre las semanas 16 y 22 se registraron alcalinidades de 8 unidades. Sin embargo, estas alcalinidades no se vieron acompañadas de un aumento en la producción de biogás, como fue el caso del sustrato 5.

Entre las semanas 4 y 9, el pH del sustrato 11 fue neutro en 5 ocasiones, para tan sólo volver a serlo en las semanas 12 y 24. Fuera de estas ocasiones, el pH siempre fue 8, lo cual indica que el pH fue predominantemente alcalino.

Con base en los análisis anteriores y la gráfica 3.7 se concluye que en términos generales, el pH de las muestras analizadas fue alcalino, y en algunos casos, la alcalinidad afectó de manera positiva la producción de biogás.

### **3.4 Porcentaje de metano en el biogás**

En cuanto a la calidad del biogás, es deseable que este cuente con el mayor porcentaje de metano posible, pues tal componente es el encargado de arder durante la quema del biogás. La gráfica 3.8 muestra el porcentaje de metano presente en el biogás medido semanalmente.



Gráfica 3.8. Porcentaje de metano presente en el biogás.

Como se observa en la gráfica 3.8, los sustratos 5, 7, y 11 produjeron un porcentaje mayor de metano que el sustrato 1, cuyo biogás apenas alcanzó el 17.23% de contenido de metano. A pesar de que el porcentaje de metano presente en el biogás producido por el biodigestor 1 es muy bajo, se observa una tendencia al aumento a partir de la semana 6 y hasta el final de la producción del biogás.

Los biodigestores 5 y 11 produjeron biogás con un contenido de metano que osciló entre el 60 y el 67% a partir de las semanas 10 y 11, respectivamente. A partir de ese momento y hasta el final, el contenido de metano varió entre 1 y 2% cada semana con una ligera tendencia a la disminución.

Por el contrario, el contenido de metano del biogás producido en el biodigestor 7 tuvo una tendencia al alza durante todo el proceso de producción de biogás. Sin embargo, alcanzó el 60% de metano hasta la semana 22, aunque su biogás fue flamable desde la semana 9.

### 3.5 Digestato

El digestato obtenido permitió observar ciertos fenómenos que ocurrieron durante el proceso de degradación, aportando información que podría explicar los resultados obtenidos.

En la figura 3.1 se muestra el digestato del biodigestor 1.



*Figura 3.1. Digestato del biodigestor 1.*

La figura 3.1 (izquierda) permite observar la formación de espuma en la superficie del digestato, posiblemente causada por la falta de agitación durante el proceso de degradación. Sin embargo, el detalle más notable es la presencia de gránulos no disueltos en el biodigestor. Estos gránulos también se encuentran presentes en el estiércol fresco, y debido a que su apariencia tras el proceso de digestión anaeróbica es idéntica a la que tenían antes de dicho proceso, se infiere que los gránulos sufrieron poca degradación. Este último fenómeno podría haber sido causado por la insolubilidad de los gránulos y por la sedimentación que sufrieron con el paso del tiempo.

En síntesis, la insolubilidad de los gránulos del estiércol de cerdo y su estancamiento habrían causado una baja degradación de las excretas, lo cual podría ser la causa de la baja producción de biogás.

En contraste, el digestato del biodigestor 5 no mostró excretas sin disolver, únicamente se apreciaron partículas de paja flotando en la superficie del líquido, tal como se muestra en la figura 3.2.



*Figura 3.2. Digestato del biodigestor 5.*

Tampoco se observó una cantidad considerable de espuma ni se encontraron rastros de sedimentación al fondo del biodigestor. Éste último detalle da mayor validez a la hipótesis de que el estiércol y el agua se incorporaron por completo.

El digestato del biodigestor 7, mostrado en la figura 3.3, presentó diferencias notables con respecto al digestato del biodigestor 5, siendo quizá la mayor discrepancia la presencia de una cantidad considerable de materia flotando sobre el líquido del digestato.



*Figura 3.3. Digestato del biodigestor 7.*

La parte flotante del digestato aparentaba ser un conjunto de fibras vegetales, las cuales también son visibles en el estiércol recién producido por el caballo, aunque a diferencia de los gránulos del estiércol de cerdo (que lucían idénticos antes y después del proceso de degradación), estas fibras se notaron menos rígidas después de ser degradadas. Al igual que en el caso del sustrato del biodigestor 5, no se encontraron rasgos de sedimentación de partículas.

Por su parte, el digestato del biodigestor 11 no presentó materia flotante, aunque se debe tomar en cuenta que este biodigestor fue abierto tras 165 días, en comparación con los 214 días que duraron las pruebas de los sustratos 5 y 7, de modo que cabe la posibilidad de que alguna fracción del digestato flotara eventualmente. Sin embargo, en la figura 3.4, correspondiente al digestato del biodigestor 11 sí se puede observar la presencia de espuma.



*Figura 3.4. Digestato del biodigestor 11.*

En el digestato del biodigestor 11 apenas se encontraron indicios de materia sedimentada, que posiblemente correspondían a los gránulos que forman parte del estiércol de cerdo, lo que podría ratificar que estos gránulos no son solubles y tienden a alojarse en el fondo del biodigestor.

### **3.6 Litros de biogás generado**

Para cuantificar el biogás producido dentro de cada biodigestor se empleó el método desarrollado por González y González (2014), el cual consistente en relacionar variables tales como la presión acumulada de biogás dentro de cada biodigestor durante cierto periodo, al igual que el porcentaje de metano alcanzado en el mismo lapso, para así determinar la masa de biogás contenida dentro de cada biodigestor y posteriormente hallar los litros de biogás producidos semanalmente. Tras cuantificar la presión acumulativa semanal y su respectivo porcentaje de metano, se determina la masa molar del biogás, la cual equivale a la suma de la masa molar de cada compuesto que lo integra. Sin embargo, debido a que los principales componentes del biogás son metano y dióxido de carbono, en los cálculos siguientes se contemplará que la suma de la masa molar de dichos compuestos equivale a la totalidad de la masa molar del biogás, lo cual se expresa mediante la ecuación (13):

$$M = M_{CH_4} + M_{CO_2} \quad (13)$$

Donde:

$M$  = masa molar del biogás, kg/mol

$M_{CH_4}$  = masa molar del metano, kg/mol

$M_{CO_2}$  = masa molar del dióxido de carbono, kg/mol

Dado que la masa molar del metano y dióxido de carbono son 0.01604 kg/mol y 0.04401 kg/mol, respectivamente, la masa molar de tales compuestos para una concentración particular está dada por las ecuaciones (14) y (15):

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CH_4 \quad (14)$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CO_2 \quad (15)$$

Donde:

$0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$  = peso molecular del metano, kg/mol

$\%CH_4$  = porcentaje de metano presente en la muestra, %

$0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$  = peso molecular del dióxido de carbono, kg/mol

$\%CO_2$  = porcentaje de metano presente en la muestra, %

Para determinar la cantidad de biogás generado, como un ejemplo del cálculo se tomarán como base los datos recopilados para el biodigestor 5 durante la semana 12, la cual abarca del 13 al 20 de mayo de 2016, cuyo porcentaje de metano es 64.94%, la presión acumulada es 4.8 psi y la temperatura del gas es 22.3 °C. Las masas molares del metano, dióxido de carbono y biogás producido esa semana serán:

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.6494 = 0.01042 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.3506 = 0.01543 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.01042 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 0.01543 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.02585 \frac{kg}{mol}$$

La masa molar del biogás se utiliza en la ecuación (16) para calcular la constante particular del biogás de la semana 13, sabiendo que la constante universal de los gases es  $R_u = 8.314 \text{ Nm/mol}\cdot\text{K}$ .

$$R_p = \frac{R_u}{M} \quad (16)$$

Donde:

$R_p$  = constante particular del biogás,  $\text{Nm/kg}\cdot\text{K}$

$R_u$  = constante universal de los gases,  $\text{Nm/mol}\cdot\text{K}$

Por lo tanto, la constante particular del biogás es:

$$R_p = \frac{8.314 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}}{0.02585 \text{ kg/mol}}$$

$$R_p = 321.62476 \text{ Nm/kg} \cdot \text{K}$$

La densidad del biogás contenido dentro del biodigestor se determina con ayuda de la ecuación (17) de los gases ideales:

$$PV = mR_pT \quad (17)$$

Donde:

$P$  = presión absoluta del gas, Pa

$V$  = volumen del gas,  $\text{m}^3$

$m$  = masa del gas, kg

$R_p$  = constante particular del gas,  $\text{Nm/kg} \cdot \text{K}$

$T$  = temperatura, K

Despejando de (17) se obtiene la ecuación (18) para determinar la densidad del gas:

$$\frac{m}{V} = \frac{P}{R_p T} \quad (18)$$

Para calcular la densidad del biogás es necesario realizar las conversiones de presión manométrica en psi a absoluta en Pa y de temperatura en °C a °K.

$$P = 4.8 \text{ psi} \times \frac{6894.76 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} + 101.325 \text{ PA}$$

$$P = 33196.173 \text{ Pa}$$

$$T = 22.3 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 295.45 \text{ K}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{33196.173 \text{ Pa}}{\left(321.62476 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (295.45 \text{ K})}$$

$$\frac{m}{V} = 0.34934 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para calcular la masa del biogás basta con emplear la ecuación (19), tomando en cuenta que el volumen ocupado por el biogás es 23 L, ya que el volumen total del biodigestor es de 33 L y el sustrato ocupa 10 L.

$$m = V \cdot \rho \quad (19)$$

Donde:

$\rho$  = densidad, kg/m<sup>3</sup>



$$m = 23 L \times 0.34934 \frac{kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 L}$$

$$m = 8.03482 \times 10^{-3} kg$$

El último paso para conocer la cantidad de litros de biogás generados consiste en emplear la ecuación (9), en la cual se contempla la densidad del biogás a presión atmosférica como 1.25 kg/m<sup>3</sup>:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (9)$$

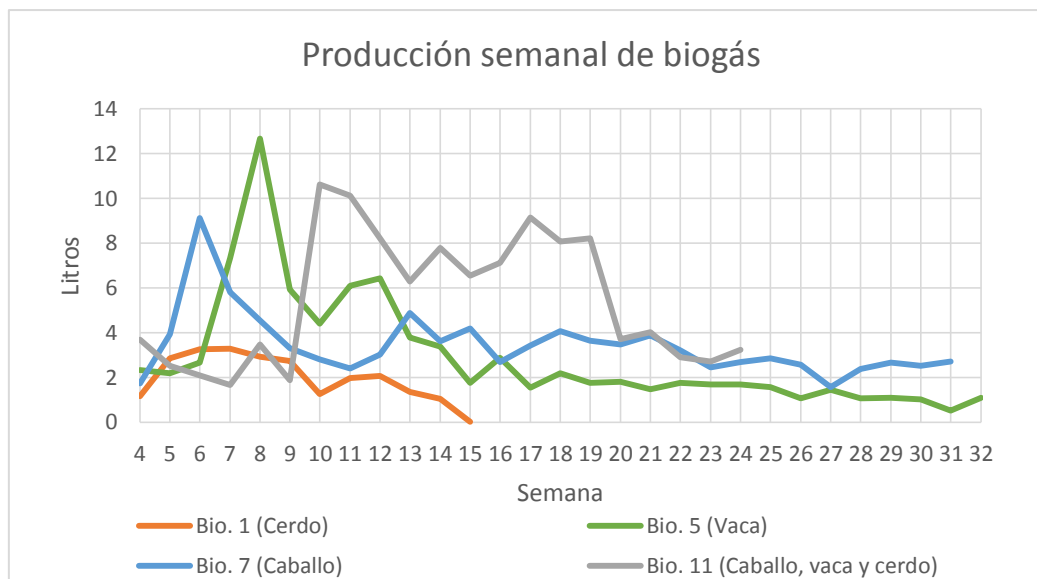
$$V = \frac{8.03482 \times 10^{-3} kg}{1.25 kg/m^3} = 6.427856 \times 10^{-3} m^3$$

$$V = 6.427856 \times 10^{-3} m^3 \times \frac{1000 L}{1 m^3}$$

Por lo tanto, en la semana 13 el sustrato de excretas de vaca al 50% y agua al 50% produjo:

$$V = 6.4278 L \text{ de biogás}$$

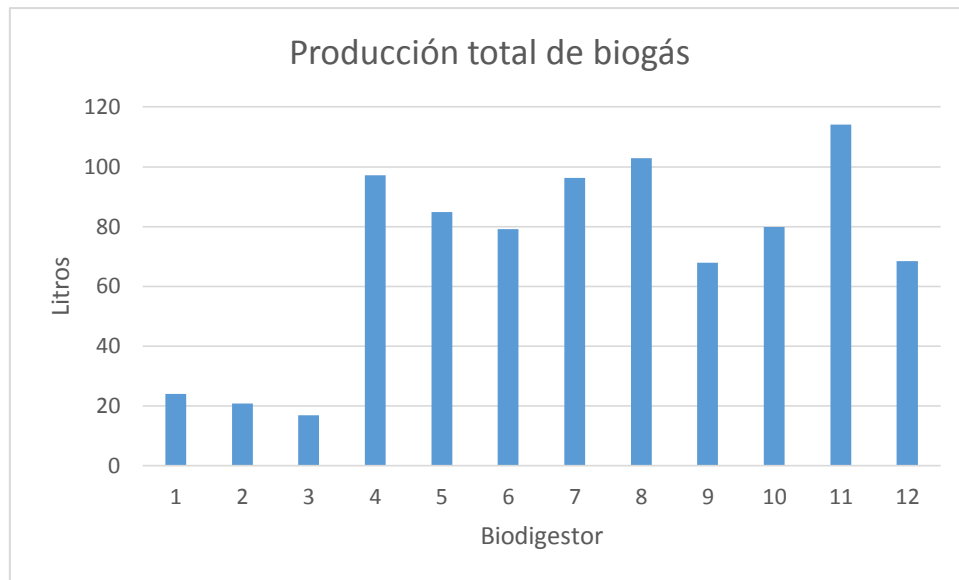
El método de cuantificación de biogás de González y González (2014) se aplicó para el resto de semanas y biodigestores, a modo de obtener la producción de biogás de cada semana. En la gráfica 3.9 se muestran los litros de biogás producidos cada semana por los 4 sustratos analizados en este capítulo.



Gráfica 3.9. Litros de biogás producido.

Se observa que el sustrato del biodigestor 1 nunca superó los 3.5 litros producidos de biogás, mientras que el sustrato correspondiente al biodigestor 5 tuvo una producción máxima de 12.68 litros por semana, aunque sólo ocurrió una ocasión y posteriormente su producción decreció drásticamente, en tanto que el sustrato del biodigestor 7 alcanzó una producción máxima de 9.11 litros por semana y la máxima producción semanal del biodigestor 11 fue 10.62 litros. Estos resultados reafirman la validez de emplear como un indicador de la producción de biogás la gráfica 3.2, la cual muestra las presiones acumulativas de los biodigestores, ya que de nueva cuenta se aprecia que el sustrato alcanzó la máxima producción semanal pero no fue capaz de mantenerla en valores cercanos al máximo, tal como sí lo hizo el sustrato 11.

No fue posible cuantificar el biogás producido durante las tres primeras semanas, ya que las mediciones de porcentaje de biogás comenzaron hasta la cuarta semana de experimentación. En la gráfica 3.10 se presenta el total de litros de biogás producidos por los doce sustratos estudiados.



*Gráfica 3.10. Producción total de biogás.*

La gráfica 3.10 confirma que el sustrato 1 fue el que obtuvo la mejor producción de biogás entre los sustratos de excremento de cerdo, sin embargo, su producción es notablemente menor a la de las otras muestras. Esta gráfica también confirma que los sustratos 7 y 11 alcanzaron las mejores producciones entre los sustratos de estiércol de caballo y mezcla de excretas, respectivamente. Sin embargo, en el caso de los sustratos bovinos, pone de manifiesto que el biodigestor 4 produjo más biogás que el biodigestor 5, aunque esta gráfica no toma en cuenta la cantidad de estiércol requerida para producir dicha cantidad de biogás, factor que hace más viable a la muestra 5 por encima de la 4.

### **3.7 Litros de metano producido**

Si bien la gráfica 3.10 muestra resultados alentadores, obteniendo entre 67.8 L y 114.14 L de biogás en 9 de las 12 muestras analizadas, es necesario discernir entre litros de biogás y litros de metano. El primer término hace referencia a los litros obtenidos de la mezcla de gases que conforman el biogás, en tanto que el segundo concepto se refiere únicamente a la parte aprovechable del biogás en forma de energía.

Para calcular los litros de biogás producido, se empleó la ecuación (20), la cual relaciona los litros de biogás y su porcentaje de contenido de metano:

$$L_{CH_4} = L_{biogás} \times \%CH_4 \quad (20)$$

Donde:

$L_{CH_4}$  = litros de metano, L.

$L_{biogás}$  = litros de biogás, L.

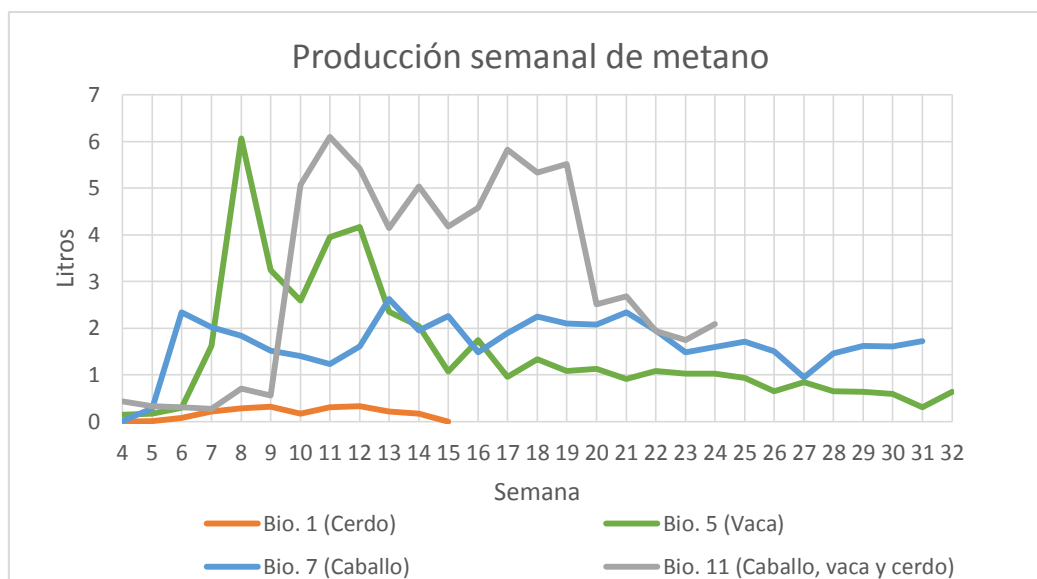
$\%CH_4$  = porcentaje de metano presente en la muestra, %

Para determinar la cantidad de biogás generado, como un ejemplo del cálculo se tomarán como base los datos recopilados para el biodigestor 5 durante la semana 12, que abarca del 13 al 20 de mayo de 2016, en la que el porcentaje de metano fue 64.94% y el volumen de biogás producido es 6.4278 L:

$$L_{CH_4} = 6.4278 \text{ L} \times 0.6494$$

$$L_{CH_4} = 4.1742 \text{ Litros de metano}$$

Este procedimiento se repitió con ayuda de una hoja de cálculo de Microsoft Excel para obtener la producción semanal de metano para cada biodigestor, los resultados de los biodigestores 1, 5, 7 y 11 se presentan en la gráfica 3.11.



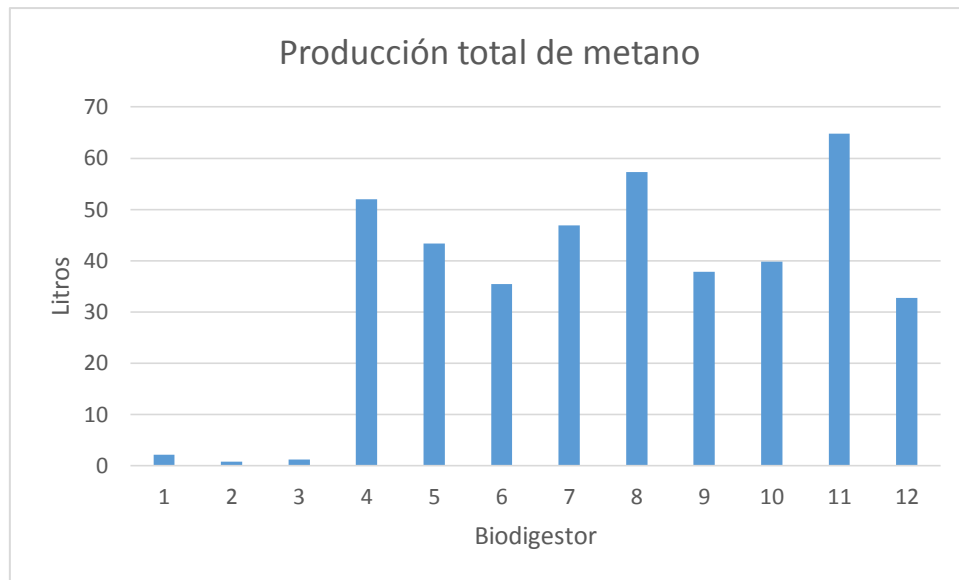
Gráfica 3.11. Producción semanal de metano de los biodigestores 1, 5, 7 y 11.

En la gráfica 3.11 se observa que el sustrato de excremento de cerdo y agua no produjo una cantidad considerable de metano, posiblemente debido a los mismos factores que causaron las bajas presiones acumuladas representadas en la gráfica 3.2.

La gráfica 3.11 pone en evidencia que el contenido de metano presente en el biogás del sustrato 7 fue pobre en comparación con los sustratos 5 y 11, además de que muestra que de los 9.11 L de biogás producidos por el biodigestor 7 en la semana 6, únicamente 2.34 L eran metano. A pesar de eso, el sustrato 7 produjo más litros de metano que el biodigestor 5 a partir de la semana 13 y hasta el final de la prueba.

Los resultados reiteran que el sustrato 11, que es una mezcla de agua y estiércol de caballo, vaca y cerdo, es el más apto para producir biogás, ya que durante un periodo de 10 semanas produjo una cantidad de metano que osciló entre los 4.15 y 6.10 litros de metano. Ningún otro sustrato produjo tanto metano durante tanto tiempo.

La gráfica 3.12 muestra la producción total de litros de metano de los 12 sustratos analizados.



*Gráfica 3.12. Producción total de metano.*

La gráfica 3.12 muestra que en general, los sustratos de estiércol de cerdo no produjeron una cantidad de metano considerable, como sí lo hicieron las demás muestras, especialmente la número 11. De nueva cuenta se muestra que el sustrato 4 produjo más metano que el sustrato 5 (ambos a base de excremento de vaca), sin embargo, se considera que el sustrato 5 es más rentable debido a que se requiere menos estiércol para su preparación.

### **3.8 Litros de metano/kg de excreta**

Un parámetro clave para determinar la rentabilidad de un sustrato en particular es la relación existente entre los litros de metano producido y los kg de estiércol empleados en la preparación del sustrato.

Conociendo la densidad de las excretas y el volumen empleado en la preparación de cada sustrato es posible determinar la masa de excremento presente en cada sustrato, y posteriormente el rendimiento de litros de metano por kilogramo de excreta. A continuación se ejemplifica mediante la ecuación (21) el cálculo de la masa de estiércol empleada en el sustrato 5, el cual contiene 25% de estiércol de vaca y 75% de agua:

$$V_{excreta} = V_{sustrato} \times \%_{excreta} \quad (21)$$

Donde:

$V_{excreta}$  = volumen de excretas empleadas en el sustrato, L.

$V_{sustrato}$  = volumen del sustrato, L.

$\%_{excreta}$  = porcentaje de excretas en el sustrato, %.

Debido a que el sustrato ocupa un volumen de 10 L dentro del biodigestor,  $V_{sustrato} = 10 L$ , y por lo tanto:

$$V_{excreta} = 10 L \times 0.25$$

$$V_{excreta} = 2.5 L$$

Una vez que se conoce el volumen del estiércol se puede calcular su masa empleando la ecuación (19) y la densidad del estiércol:

$$m_{excreta} = V_{excreta} \times \rho_{excreta} \quad (19)$$

$$m_{excreta} = 2.5 L \times 952.2207 \frac{kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 L}$$

$$m_{excreta} = 2.38 kg$$

En caso de que el sustrato esté compuesto por más de un tipo de excremento, la masa de excretas que compone el sustrato será igual a la suma de las masas individuales de cada tipo de estiércol, tal como lo indica la ecuación (22):

$$m_{excreta\ total} = m_{excreta\ 1} + m_{excreta\ 2} + m_{excreta\ n} \quad (22)$$

Donde:

$m_{excreta\ total}$  = masa total de las excreta presentes en el sustrato, kg.

$m_{excreta\ n}$  = masa de cada excreta que conforma el sustrato, kg.

En la tabla 3.3 se presenta la masa de excretas que componen el sustrato, los litros de metano producido con 10 litros de sustrato, el porcentaje máximo de metano y la relación de litros de metano/kg de excreta.

| Biodigestor no. | Excremento de cerdo [kg] | Excremento de vaca [kg] | Excremento de caballo [kg] | Excremento total [kg] | % máximo de metano [%] | Metano producido [L] | L de metano/kg de excreta |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1               | 4.65                     | -                       | -                          | 4.65                  | 17.23                  | 2.1375               | 0.4595                    |
| 2               | 6.20                     | -                       | -                          | 6.20                  | 21.49                  | 0.8165               | 0.1316                    |
| 3               | 3.10                     | -                       | -                          | 3.10                  | 10.86                  | 1.1487               | 0.3704                    |
| 4               | -                        | 4.76                    | -                          | 4.76                  | 70.58                  | 51.9389              | 10.9090                   |
| 5               | -                        | 2.38                    | -                          | 2.38                  | 64.94                  | 43.3584              | 18.2136                   |
| 6               | -                        | -                       | 3.74                       | 3.74                  | 59.51                  | 35.4699              | 9.4803                    |
| 7               | -                        | -                       | 2.49                       | 2.49                  | 63.63                  | 46.9049              | 18.8067                   |
| 8               | -                        | 2.38                    | 1.87                       | 4.25                  | 67.1                   | 57.3419              | 13.4882                   |
| 9               | -                        | 3.17                    | 1.25                       | 4.42                  | 70.22                  | 37.8773              | 8.5673                    |
| 10              | -                        | 1.59                    | 2.49                       | 4.08                  | 59.74                  | 39.7586              | 9.7414                    |
| 11              | 0.24                     | 4.20                    | 0.25                       | 4.69                  | 67.63                  | 64.8260              | 13.8295                   |
| 12              | 0.16                     | 2.79                    | 0.16                       | 3.12                  | 65.61                  | 32.6939              | 10.4937                   |

Tabla 3.3. Litros de metano producido por kg de excreta.

La tabla 3.3 muestra que los sustratos 1, 5, 7 y 11 obtuvieron los mejores resultados de su categoría. Sin embargo, también indica que los sustratos de cerdo no fueron capaces de generar medio litro de metano por cada kilogramo de estiércol.



En el caso de los sustratos de estiércol de vaca, los resultados son ampliamente favorables para el sustrato 5, ya que produjo casi el doble de metano/kg de excreta que el sustrato 4. Esta situación indica que el sustrato 4 produjo más biogás y con mayor contenido de metano que el biodigestor 5, sin embargo, requirió el doble de estiércol. Dicho de otra manera, empleando la composición del sustrato 5 se obtendría casi el doble de metano que con el sustrato 4 porque se podría preparar una cantidad mayor de sustrato.

Al igual que en el caso de los sustratos de vaca, los sustratos de caballo obtuvieron mejores resultados para la muestra más diluida, siendo la producción de metano/kg de excreta del sustrato 7 el doble de la producción del sustrato 6. Sin embargo, la situación es opuesta en el caso de los sustratos de mezcla de estiércol de caballo, vaca y cerdo, pues el sustrato menos diluido (sustrato 11) obtuvo mejores resultados que el sustrato más diluido (sustrato 12). En cuanto a los sustratos de mezcla de estiércol de caballo y vaca, el sustrato 8 presentó mejores resultados, lo cual indica que para este tipo de mezclas es recomendable emplear excremento equino y vacuno en las mismas proporciones.

### 3.9 Energía obtenible

Según el Ministerio de Energía de Chile (2011), el poder calorífico del metano es de  $10 \text{ kWh/m}^3$ , o bien:

$$C_p = 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 10 \text{ Wh/L}$$

Donde:

$C_p$  = poder calorífico del metano,  $\text{kWh/m}^3$ ,  $\text{Wh/L}$ .

Conociendo el valor calorífico del metano ( $10 \text{ Wh/L}$ ), la cantidad de excrementos producidos diariamente y los rendimientos de litros de metano/kg de excremento previamente calculados, es posible determinar la línea base de energía obtenible diariamente en el rancho “Los Dos Hermanos” empleando la ecuación (23):

$$E = C_p \times \beta \times M_D \quad (23)$$

Donde:

$E$  = energía obtenible diariamente, kWh/día.

$C_p$  = poder calorífico del metano, kWh/m<sup>3</sup>, Wh/L.

$\beta$  = rendimiento de litros de metano/kg de excremento, L/kg.

$M_D$  = masa de excrementos disponibles diariamente, kg/día.

Los valores de  $\beta$  pueden consultarse en la tabla 3.3 (Litros de metano producido por kg de excreta), mientras que los valores de  $M_D$  se presentan en la tabla 3.4 (Masa de excretas disponibles diariamente):

| <b>Biodigestor<br/>no.</b> | <b>Masa de<br/>excretas<br/>disponible<br/>[kg/día]</b> | <b>Biodigestor<br/>no.</b> | <b>Masa de<br/>excretas<br/>disponible<br/>[kg/día]</b> |
|----------------------------|---|----------------------------|---|
| 1                          | 9.4   | 7                          | 15  |
| 2                          | 9.4   | 8                          | 30  |
| 3                          | 9.4   | 9                          | 45  |
| 4                          | 160   | 10                         | 22.5  |
| 5                          | 160   | 11                         | 184.4   |
| 6                          | 15  | 12                         | 184.4   |

*Tabla 3.4. Masa de excretas disponibles diariamente*

Los valores de  $M_D$  para los sustratos 1 a 7 corresponden al valor máximo de excrementos que producen los animales del rancho “Los Dos Hermanos”, mientras que para los sustratos 8 a 12,  $M_D$  depende de las proporciones de cada tipo de estiércol con las que se prepare el sustrato. Por ejemplo, para el sustrato 8,  $M_D$  es 30 porque este sustrato emplea estiércol de caballo y vaca en la misma proporción, pero de acuerdo con la tabla 2.12 (Excremento recolectable en el rancho “Los Dos Hermanos”), únicamente se pueden recolectar 15 kg de estiércol de caballo cada día,

por lo tanto, el sustrato requeriría 15 kg de estiércol de vaca, desperdiciando 145 kg de estiércol bovino cada día.

Para ejemplificar el cálculo de la energía que se puede obtener a partir del biogás producido se utilizará la ecuación (23) y se tomarán como referencia los parámetros  $\beta$  y  $M_D$  correspondientes al sustrato 5:

$$E = C_p \times \beta \times M_D$$

$$E = 10 \frac{Wh}{L} \times 18.2136 \frac{L}{kg} \times 160 \frac{kg}{día}$$

$$E = 29.1417 kWh/día$$

Por lo tanto, el sustrato 5 es capaz de producir hasta 29.1417 kWh/día. Este valor representa la energía contenida en el metano producido, pero no debe confundirse con la energía aprovechable, que es menor y está en función de la eficiencia de los dispositivos que se empleen para aprovechar la energía.

En la tabla 3.5 se muestra la energía que se podría obtener a partir del metano producido por los desechos del ganado del rancho “Los Dos Hermanos”.

| <b>Biodigestor no.</b> | <b>Masa de excretas disponible [kg/día]</b> | <b>L de metano/kg de excreta</b> | <b>L de metano/día producidos</b> | <b>kWh/día obtenibles</b> | <b>kWh/ bimestre obtenibles</b> |
|------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 9.4   | 0.4595                           | 4.3195                            | 0.0432                    | 2.5917                          |
| 2                      | 9.4   | 0.1316                           | 1.2374                            | 0.0124                    | 0.7425                          |
| 3                      | 9.4   | 0.3704                           | 3.4821                            | 0.0348                    | 2.0893                          |
| 4                      | 160   | 10.9090                          | 1745.4401                         | 17.4544                   | 1047.2640                       |
| 5                      | 160   | 18.2136                          | 2914.1732                         | 29.1417                   | 1748.5039                       |
| 6                      | 15  | 9.4803                           | 142.2038                          | 1.4220                    | 85.3223                         |
| 7                      | 15  | 18.8067                          | 282.1009                          | 2.8210                    | 169.2605                        |
| 8                      | 30  | 13.4882                          | 404.6448                          | 4.0464                    | 242.7869                        |
| 9                      | 45  | 8.5673                           | 385.5283                          | 3.8553                    | 231.3170                        |
| 10                     | 22.5  | 9.7414                           | 219.1818                          | 2.1918                    | 131.5091                        |
| 11                     | 184.4                                       | 13.8295                          | 2550.1688                         | 25.5017                   | 1530.1013                       |
| 12                     | 184.4                                       | 10.4937                          | 1935.0359                         | 19.3504                   | 1161.0215                       |

*Tabla 3.5. Línea base de energía obtenible en el rancho “Los Dos Hermanos”.*

Si se desea aprovechar la energía obtenible en forma de energía eléctrica es necesario seleccionar una unidad de generación en función de la carga que se requiera alimentar. En la tabla 3.6 (Wellinger y et al, 2013) se presentan las características de distintas unidades de generación que permiten aprovechar el biogás como combustible.

| <b>Parámetro</b>   | <b>Motor de combustión interna</b> | <b>Turbina de gas</b> | <b>Micro turbina</b>             | <b>Motor Stirling</b>          |
|--|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Capacidad de la unidad (kW)*</b>  | 110 – 3000                         | 3500 – 15 000         | 30 – 300                         | < 150                          |
| <b>Eficiencia eléctrica</b>  | 30 – 42                            | 24 – 40               | 25 – 30                          | 30 – 40                        |
| <b>Combustible alternativo</b>   | Gas líquido                        | Gas natural           | Gas natural, queroseno, petróleo | Gas natural, petróleo, biomasa |
| <b>Costo de inversión (€/kW)**</b>   | 400 – 1100                         | 900 – 1500            | 600 – 1200                       | 1300 – 1500                    |
| <b>Costo de operación y mantenimiento (€/kWh)***</b>   | 0.01 – 0.02                        | 0.005 – 0.010         | 0.008 – 0.015                    | 0.003 – 0.010                  |
| <p>* La capacidad de la unidad puede variar dependiendo del fabricante.</p> <p>** Los costos de instalación varían con el tipo y cantidad de equipo auxiliar (calculado en 2013).</p> <p>*** Los costos de mantenimiento dependen de la calidad del gas (calculado en 2013).</p> |                                    |                       |                                  |                                |

*Tabla 3.6. Características de unidades de generación a biogás (Wellinger y et al, 2013).*

Antes de seleccionar una unidad de generación es importante considerar los costos de inversión, de operación y mantenimiento, pero principalmente el tamaño de la carga eléctrica que se desea alimentar, a modo de evitar la compra de un equipo sobredimensionado o cuya capacidad se encuentre por debajo de la potencia de carga.

A continuación se ejemplifica la selección que convendría realizarse en el caso del rancho “Los Dos Hermanos”, para lo cual se debe estimar la carga eléctrica máxima de la propiedad.

En la tabla 3.7 se muestra la potencia de algunos aparatos eléctricos comunes.

| Equipo                    | Potencia [W] | Equipo                | Potencia [W] |
|---------------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Televisión de 21"         | 85           | Refrigerador estándar | 575          |
| Pantalla plana de 32" LED | 75           | Reproductor DVD       | 25           |
| Lavadora                  | 550          | Computadora           | 150          |
| Bomba para agua           | 400          | Horno de microondas   | 1300         |
| Aspiradora                | 1400         | Plancha               | 1150         |
| Licuadaora                | 350          | Estéreo               | 75           |

Tabla 3.7. Potencia eléctrica de distintos aparatos eléctricos (CFE, 2012), (FIDE, 2015).

En la tabla 3.8 se enlista la potencia de los aparatos con los que se cuenta en el rancho “Los Dos Hermanos”:

| Equipo                    | Potencia [W] | Cantidad | Potencia total [W] |
|---------------------------|--------------|----------|--------------------|
| Pantalla plana de 32" LED | 75           | 1        | 75                 |
| Lavadora                  | 550          | 1        | 550                |
| Bomba para agua           | 400          | 1        | 400                |
| Licuadaora                | 350          | 1        | 350                |
| Reproductor DVD           | 25           | 1        | 25                 |
| Horno de microondas       | 1300         | 1        | 1300               |
| Plancha                   | 1150         | 1        | 1150               |
| Estéreo                   | 75           | 1        | 75                 |
| Focos ahorradores         | 30           | 12       | 360                |
| Total                     |              |          | 4284               |

Tabla 3.8. Carga eléctrica del rancho “Los Dos Hermanos”.

De acuerdo con la tabla 3.8, la carga eléctrica del rancho “Los Dos Hermanos” es de aproximadamente 4.3 kW, por lo que según Wellinger y et al (2013) las unidades de generación como motores de combustión interna, turbinas de gas y micro turbinas estarían sobredimensionadas para este caso particular. Sin embargo, el motor Stirling es elegible porque según la tabla 3.6 (Características de unidades de generación a biogás), no hay restricción para la fabricación de unidades de baja potencia.

Por lo tanto, para ejemplificar el cálculo de la energía eléctrica generable en el rancho “Los Dos Hermanos” se contempla el uso de un motor Stirling, cuya eficiencia eléctrica se encuentra entre 30 y 40%, por lo cual se asume una eficiencia media del 35%.

La energía eléctrica generable se calcula mediante la ecuación (24):

$$E_e = C_p \times \beta \times M_D \times \eta_e \quad (24)$$

Donde:

$E_e$  = energía eléctrica generable diariamente, kWh/día.

$\eta_e$  = eficiencia eléctrica, %.

Dado que  $E = C_p \times \beta \times M_D$ , la ecuación (24) se puede expresar como:

$$E_e = E \times \eta_e \quad (25)$$

Empleando la ecuación (25), la energía eléctrica generable empleando el biogás producido por el sustrato 5 sería:

$$E_e = 29.1417 \frac{kWh}{día} \times 0.35$$

$$E_e = 10.1996 \frac{kWh}{día}$$

En la tabla 3.9 se muestra la energía eléctrica que se podría generar mediante el uso de una unidad de generación Stirling cuyo combustible es el metano producido por los desechos del ganado del rancho “Los Dos Hermanos”.

| <b>Biodigestor no.</b> | <b>Masa de excretas disponible [kg/día]</b> | <b>L de metano/kg de excreta</b> | <b>L de metano/día producidos</b> | <b>kWh/día generables</b> | <b>kWh/bimestre generables</b> |
|------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1                      | 9.4   | 0.4595                           | 4.3195                            | 0.0151                    | 0.9071                         |
| 2                      | 9.4   | 0.1316                           | 1.2374                            | 0.0043                    | 0.2599                         |
| 3                      | 9.4   | 0.3704                           | 3.4821                            | 0.0122                    | 0.7313                         |
| 4                      | 160   | 10.9090                          | 1745.4401                         | 6.1090                    | 366.5424                       |
| 5                      | 160   | 18.2136                          | 2914.1732                         | 10.1996                   | 611.9764                       |
| 6                      | 15  | 9.4803                           | 142.2038                          | 0.4977                    | 29.8628                        |
| 7                      | 15  | 18.8067                          | 282.1009                          | 0.9874                    | 59.2412                        |
| 8                      | 30  | 13.4882                          | 404.6448                          | 1.4163                    | 84.9754                        |
| 9                      | 45  | 8.5673                           | 385.5283                          | 1.3493                    | 80.9609                        |
| 10                     | 22.5  | 9.7414                           | 219.1818                          | 0.7671                    | 46.0282                        |
| 11                     | 184.4                                       | 13.8295                          | 2550.1688                         | 8.9256                    | 535.5354                       |
| 12                     | 184.4                                       | 10.4937                          | 1935.0359                         | 6.7726                    | 406.3575                       |

*Tabla 3.9. Línea base de energía eléctrica generable en el rancho “Los Dos Hermanos”.*

Según la tabla 3.9, los sustratos 5 y el 11 son las mejores opciones para aprovechar los desechos orgánicos del ganado, ya que alcanzan capacidades de generación de energía eléctrica de 611.9 kWh/bimestre y 535.5 kWh/bimestre, respectivamente. Si bien el sustrato 5 tiene la capacidad de generar más energía que el sustrato 11, no aprovecha todos los desechos de los animales, pues únicamente utiliza las excretas de vaca. Por esta razón se recomienda el uso del sustrato 11, que sí aprovecha las excretas de todos los animales.

Considerando el uso de la unidad de generación Stirling y su eficiencia del 35%, es posible establecer la relación de Wh generables por kg de excretas empleando la ecuación (26):

$$\tau = C_p \times \beta \times \eta_e \quad (26)$$



Donde:

$\tau$  = relación de Wh/kg de excretas

$C_p$  = poder calorífico del metano, kWh/m<sup>3</sup>, Wh/L.

$\beta$  = rendimiento de litros de metano/kg de excremento, L/kg.

$\eta_e$  = eficiencia eléctrica, %.

A continuación se ejemplifica el cálculo de la relación de Wh que se podrían generar a partir del biogás producido por un kilogramo de estiércol. De acuerdo con la ecuación (26), la energía eléctrica generable con el rendimiento de litros de metano/kg de excremento del sustrato 5 sería:

$$\tau = 10 \frac{Wh}{L} \times 18.2136 \frac{L}{kg} \times 0.35$$

$$\tau = 63.7476 \frac{Wh}{kg}$$

En la tabla 3.10 se muestra la relación  $\tau$  para los 12 sustratos analizados.

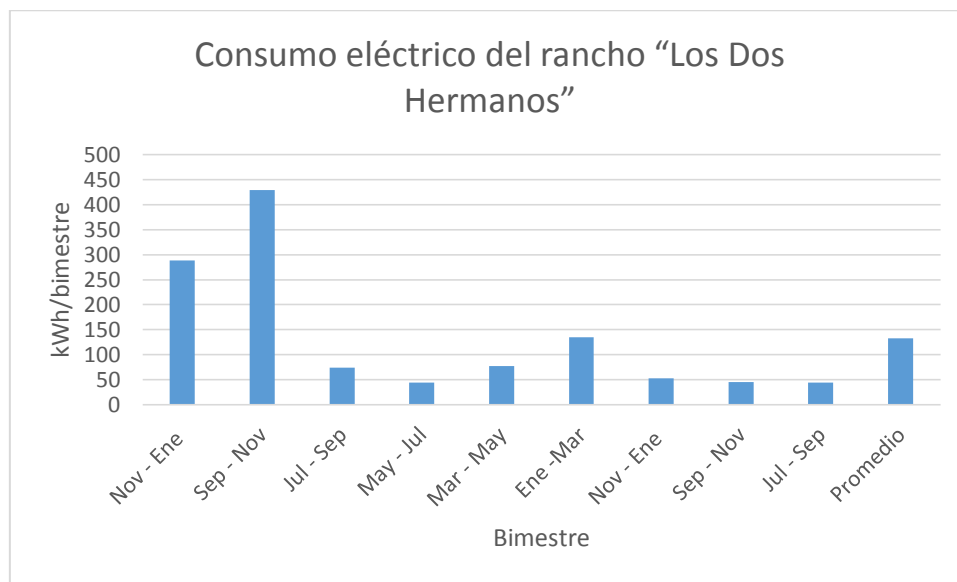
| <b>Biodigestor no.</b> | <b>L de metano/kg de excreta</b> | <b>Wh generables/kg de excreta</b> |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1                      | 0.4595                           | 1.6083                             |
| 2                      | 0.1316                           | 0.4607                             |
| 3                      | 0.3704                           | 1.2965                             |
| 4                      | 10.9090                          | 38.1815                            |
| 5                      | 18.2136                          | 63.7476                            |
| 6                      | 9.4803                           | 33.1809                            |
| 7                      | 18.8067                          | 65.8235                            |
| 8                      | 13.4882                          | 47.2086                            |
| 9                      | 8.5673                           | 29.9855                            |
| 10                     | 9.7414                           | 34.0949                            |
| 11                     | 13.8295                          | 48.4034                            |
| 12                     | 10.4937                          | 36.7279                            |

*Tabla 3.10. Wh generables por kg de excretas.*

Para conocer la parte de la demanda de energía eléctrica del rancho “Los Dos Hermanos” que se podría satisfacer con la energía generable a partir de sus desechos es necesario determinar una línea base de energía consumida por el rancho. En la tabla 3.11 se presentan los datos del consumo eléctrico del predio durante 9 bimestres, mientras que la gráfica 3.13 muestra su variación.

| Bimestre  | Consumo [kWh] |
|-----------|---------------|
| Nov - Ene | 289           |
| Sep - Nov | 429           |
| Jul - Sep | 74            |
| May - Jul | 44            |
| Mar - May | 77            |
| Ene -Mar  | 135           |
| Nov - Ene | 53            |
| Sep - Nov | 45            |
| Jul - Sep | 44            |
| Promedio  | 132.22        |

Tabla 3.11. Consumo eléctrico del rancho “Los Dos Hermanos”.



Gráfica 3.13. Consumo eléctrico del rancho “Los Dos Hermanos”.

Si se toma el promedio del consumo bimestral como línea base de la demanda eléctrica del rancho, de acuerdo con la tabla 3.9, los sustratos 4, 5, 11 y 12, son los únicos que podrían superar el consumo medio del predio. Se prefiere el uso del sustrato 11 debido a que permite aprovechar la totalidad de los desechos del ganado (también el sustrato 12 aprovecha todos los desechos,

pero la capacidad de generación de energía eléctrica a partir del biogás del sustrato 11 es superior a la del sustrato 12).

El porcentaje de la demanda eléctrica que se podría cubrir con la energía generable con el biogás del sustrato 11 está dado por la ecuación (27):

$$\%C_C = \frac{E_{eb}}{C_m} \times 100\% \quad (27)$$

Donde:

$\%C_C$  = porcentaje de consumo eléctrico cubierto, %.

$E_{eb}$  = energía eléctrica generable bimestralmente, kWh/bimestre.

$C_m$  = consumo eléctrico promedio, kWh/bimestre.

Por lo tanto:

$$\%C_C = \frac{535.5354 \text{ kWh/bimestre}}{132.22 \text{ kWh/bimestre}} \times 100\%$$

$$\%C_C = 405.03\%$$

En concreto, el biogás del sustrato 11, compuesto por 2.60% de excretas de cerdo, 44.07% de estiércol de vaca y 3.33% de excremento de caballo, podría emplearse para producir 4 veces la energía eléctrica requerida para satisfacer la demanda del rancho “Los Dos Hermanos”.

## Conclusiones

El excremento de cerdo recolectado en el rancho “Los Dos Hermanos” es poco apto para producir biogás bajo las condiciones descritas en el presente trabajo de investigación, ya que produjo poco biogás y con baja concentración de metano.

La temperatura ambiente bajo la cual se llevó a cabo el experimento se encontró en el rango máximo de la etapa psicrófila, es decir, entre los 20 y 25 °C. En este rango las bacterias anaeróbicas que proliferan en el sustrato son sensibles a variaciones de temperatura de 2 °C/hora, lo que permite que un repentino cambio en el clima pueda inhibir la producción de biogás. Esta situación podría ser la causante de una disminución o inhibición de la producción de biogás, sin embargo, es poco probable que este fenómeno haya sido el principal causante de la baja producción de biogás por parte del sustrato a base de excremento de cerdo debido a que la temperatura ambiente fue la misma para los cuatro tipos de sustrato (excremento de caballo, vaca, cerdo y mezclas de estiércol del ganado), de modo que si las variaciones de temperatura registradas hubieran inhibido totalmente la producción de biogás lo hubieran hecho de manera general.

La velocidad de degradación del sustrato es directamente proporcional a la temperatura del mismo, es decir, bajas temperaturas causan tiempos de retención hidráulico elevados. Debido a que el proceso ocurrió bajo temperatura psicrófila se requiere que el sustrato permanezca demasiado tiempo dentro del biodigestor para ser digerido completamente. Tanto así que algunos sustratos produjeron biogás durante 221 días, y a pesar de ello no culminaron su producción. Por esta razón es aconsejable dotar a los biodigestores con un sistema de calefacción que permita elevar la temperatura del sustrato y así disminuir el tiempo requerido para su degradación total.

Aunque el pH de los sustratos de excremento porcino regularmente fue el óptimo, es decir, pH neutro o 7, el contenido de metano en el biogás producido resultó mínimo. Esto permite descartar que una acidificación haya sido la causante de su pobre porcentaje de metano.

En términos generales, el pH de los sustratos de vaca, de caballo y de mezclas de estiércol fue alcalino, y en algunos casos, la alcalinidad afectó de manera positiva la producción de biogás.

Una de las posibles causas de la baja cantidad y calidad del biogás producido por los sustratos de excremento de cerdo sería la sedimentación del sustrato, por lo cual este excremento podría arrojar mejores resultados si se tratara en biodigestores que cuenten con un sistema de agitado. El incorporar dicho sistema facilitaría la movilidad de los microorganismos anaeróbicos y traería como consecuencia una mejor degradación del sustrato.

Con base en los resultados experimentales de pruebas de biogás hechas a 3 mezclas de excretas de cerdo y agua, 2 mezclas de excretas de vaca y agua, 2 mezclas de excretas de caballo y agua, 3 mezclas de agua y excretas de caballo y vaca, y 2 mezclas de agua y excretas de caballo, vaca y cerdo, se concluye que en general, éstas últimas mezclas, junto con las de estiércol de vaca, son las más apropiadas para implementar un sistema de generación eléctrica para autoabastecimiento, ya que en ambos casos la cantidad de metano producido permite satisfacer con amplia superioridad la demanda eléctrica del rancho “Los Dos Hermanos” mediante el uso de una unidad de generación Stirling; pues en comparación con los otros sustratos, no sólo presentan cantidades mayores de biogás, sino que también poseen más metano bruto, sin mencionar que estos desechos orgánicos se tienen en una cantidad mucho mayor.

Si bien los resultados obtenidos son satisfactorios en cuanto a la cantidad de energía eléctrica generable a partir de los excrementos de vaca y de las mezclas de estiércol bovino, equino y porcino, superando ampliamente la demanda eléctrica del rancho “Los Dos Hermanos”, se debe tener en cuenta que sus correspondientes tiempos de retención hidráulicos son sumamente elevados, ya que en primer caso, el biogás se produce durante por lo menos 221 días, mientras que para los sustratos de mezcla de los tres tipos de ganado, el biogás se produce durante al menos 165 días (al finalizar estos periodos aún existía producción de biogás, aunque en cantidades tan reducidas que podrían considerarse despreciables), provocando que el volumen del biodigestor requerido sea elevado.

## Referencias

- Amarely Santana and B. Pound. (1980). The production of biogas from cattle slurry, the effects of concentration of total solids and animal diet. *Trop Anim Prod* 1980: 5:2. 130 – 135.
- San Thy, T. R. Preston and J. Ly. (2003). Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent. *Livestock Research for Rural Development* 15 (7) 2003.
- K.J. Chae, Am Jang, S.K. Yim, In S. Kim. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology* 99 (2008) 1–6.
- S. Lansing, R. Botero Botero y J. F. Martin. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology* 99 (2008) 5881–5890.
- A.D. Atem, M.E. Indiveri, S. Llamas. (2010). Biomass storage for further energy use through biogas production. *International Journal of hydrogen energy* 35 (2010) 6048 – 6051.
- Ivet Ferrer, Marianna Garfi, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, Enric Velo. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and bioenergy* 35 (2011) 1668 – 1674.
- Sung-Mok Lee, Geun Hyub Kim, Jae-Hwa Lee. (2012). Bio-gas production by co-fermentation from the brown algae, *Laminaria japonica*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18 (2012) 1512–1514
- M.S. Ak, M. Muz, O.T. Komesli, C.F. Gökçay. (2013). Enhancement of bio-gas production and xenobiotics degradation during anaerobic sludge digestion by ozone treated feed sludge. *Chemical Engineering Journal* 230 (2013) 499–505.
- González-González, and, et al., (2013). Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: an application for an Iberian pig slaughterhouse, *Journal of Cleaner Production* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021>
- I. Vera, M. Estrada, J. Martínez, A. Ortiz. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Volumen 15, Número 3, Julio – Septiembre 2014, Páginas 429–436.

- I. Vera, M. Estrada, J. Martínez, A. Ortiz. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volumen 16, Número 3, Julio – Septiembre 2015, Páginas 471–478.
- Jesús R. González y Luis R. González. (2014). Diseño y construcción de un prototipo experimental que permita estudiar la generación de biogás mediante materia Orgánica. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. FES Cuautitlán – UNAM. Julio 2014, Páginas 61-63, 135–176.
- P. Abdeshahian, J. S. Lim, W. S. Ho, H. Hashim, C. Tin Lee. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 60, Julio 2016, Páginas 714–723.
- B. K. Taseli, B. Kilkis. (2016). Ecological sanitation, organic animal farm, and cogeneration: Closing the loop in achieving sustainable development – A concept study with on-site biogas fueled trigeneration retrofit in a 900 – bed university hospital. Energy and Buildings. Disponible online, 14 de Julio 2016. Manuscrito aceptado.
- E. Chan, A. Xia, J. D. Murphy. (2016) Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico? Renewable Energy. Volumen 95, Septiembre 2016, páginas 22–30.
- W. Uddin, B. Khan, N. Shaukat, M. Majid, G. Mujtaba, A. Mehmood, S. M. Ali, U. Younas, M. Anwar, A. M. Almeshal. (2016). Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 54, Febrero 2016, Páginas 25–33
- M. Ríos, M. Kaltschmitt. (2016). Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 54, Febrero 2016, Páginas 384–395.
- Z. M. A. Bundhoo, S. Mauthoor, R. Mohee. (2016). Potential of biogas production from biomass and waste materials in the Small Island Developing State of Mauritius. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 56, Abril 2016, Páginas 1087–1100.
- A. Piwowar, M. Dzikuc, J. Adamczyk. (2016). Agricultural biogas plants in Poland – selected technological, market and environmental aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 58, Mayo 2016, Páginas 69–74.



- I. F. Silva dos Santos, R. M. Barros, G. L. Tiago Filho. (2016). Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*. Volumen 126, 10 de Julio 2016, Páginas 504–514.
- A. Ware, N. Power. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*. Volumen 97, Noviembre 2016, Páginas 541–549.
- E. U. Khan, A. R. Martin. (2016). Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 62, Septiembre 2016, Páginas 247–259.
- Ministerio de Energía de Chile. (2011) Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. *Manual de Biogás*. 1ª edición, Chile, FAO, 2011, página 54.
- A. Wellinger, J. Murphy, D. Baxter. (2016). *The Biogas Handbook: Science, production and applications*. 1ª edición, Reino Unido, Woodhead Publishing Series in Energy: Número 52, página 437.
- D. Deublein y A. Steinhauser. *Biogas from waste and renewable resources*. 1ª edición, Alemania, John Wiley & Sons, 2008.
- T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, y R. Janssen. *Biogas handbook*. 1ª edición, Dinamarca, University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- M. T. Varnero y J. Arellano. *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. 1ª edición, Chile. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico, 1991.
- P.A. Tipler y G. Mosca. *Física para la ciencia y tecnología. Volumen 1*. 5ª edición, España. Editorial Reverté, 2006.

## Bibliografía y fuentes digitales

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). *El biogás. Producción y utilización*. 1ª edición, Italia, FAO, 1983.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) e Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). *Guía de generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. 1ª edición, México, CFE, 2012.
- Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. *Manual de Biogás*. 1ª edición, Chile, FAO, 2011.
- E. Campos, J. Illa y et al. *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. 1ª edición, España, Agencia de residuos de Cataluña, 2004.
- G. Moncayo Romero. *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. 1ª edición, España, Aqualimpia Beratende Ingenieure. 2008.
- C. Buxadé. *Zootecnia Tomo IV, Bases de producción animal*. España, Mundi – Prensa, 1995.
- B. T. Nijaguna. *Biogas Technology*. 1ª edición, República de la India, New Age International, 2006.
- A. N. Mathur, N. S. Rathore. *Biogas, production, management, and utilization*. 1ª edición, EE. UU. AA., Himanshu Publications, 1992.
- J. A. Hilbert. *Manual para la producción de biogás*. 1ª edición, Argentina. Instituto de Ingeniería Rural, 2010.
- J. Martí Herrero. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. 1ª edición, Bolivia. GTZ-Energía, 2008.
- SENER. (2015). *Balance Nacional de Energía*. 08/Marzo/2016, de SENER. Sitio web: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/89382/Balance Nacional de Energía 2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/89382/Balance_Nacional_de_Energia_2014.pdf)
- Renewable Energy Institute. (2007). *Plug Flow Digester*. 26/Septiembre/2016, de Renewable Energy Institute. Sitio web: <http://www.plugflowdigester.com/>

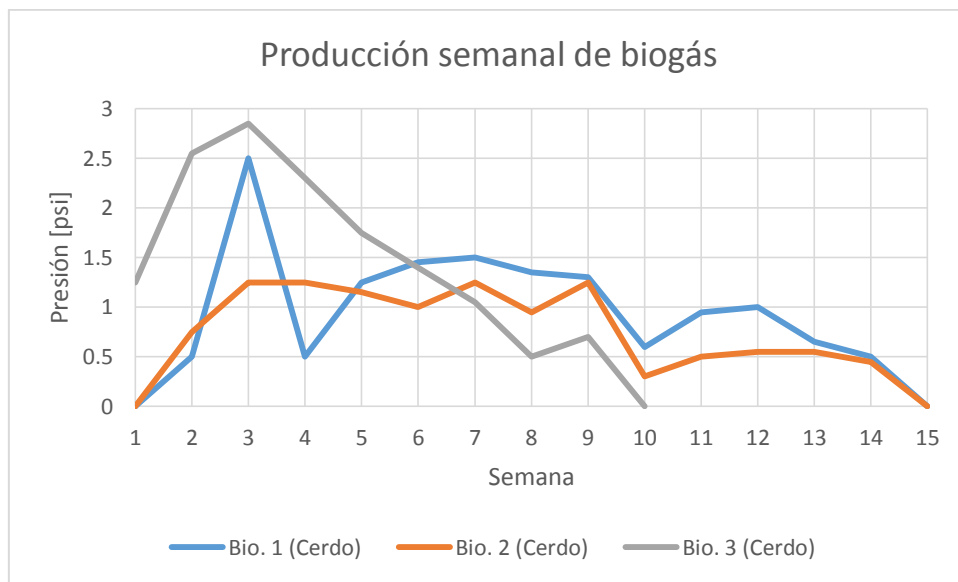
- Gropelli, E. (2016). *Trabajos realizados*. 06/Octubre/2016, de eg – ingeniería. Sitio web: <http://www.eg-ingenieria.com.ar/referencias.html>
- Biogas Plant (Anaerobic Digester) Blog. (2011). *Puxin Biogas Digester*. 05/Octubre/2016, de Biogas Plant (Anaerobic Digester) Blog. Sitio web: <http://bio-gas-plant.blogspot.mx/2011/08/puxin-biogas-digester.html>
- CFE. (2012). *Ahorro de energía*. 09/Noviembre/2016, de CFE. Sitio web: [http://www.cfe.gob.mx/casa/4\\_Informacionalcliente/Paginas/Ahorro-de-Energia.aspx](http://www.cfe.gob.mx/casa/4_Informacionalcliente/Paginas/Ahorro-de-Energia.aspx)
- FIDE. *Folletos de eficiencia energética: ¿Sabes cuánto gastan? (2015)*. 09/Noviembre/2016, de Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica. Sitio web: [http://www.fide.org.mx/images/stories/comunicacion/Evoluciona/pdf/sabes\\_lo\\_que\\_gastan\\_opt.pdf](http://www.fide.org.mx/images/stories/comunicacion/Evoluciona/pdf/sabes_lo_que_gastan_opt.pdf)

## Apéndice 1. Gráficas complementarias.

Se incluyen las gráficas de presión acumulativa, efecto de la temperatura en la producción de biogás, pH, porcentaje de metano en el biogás, producción semanal de biogás y producción semanal de metano de los doce sustratos preparados, divididos en los cuatro tipos de sustrato analizados, es decir, a base de excretas de cerdo, de vaca, de caballo y de mezclas de excretas del ganado.

### Ap.1.1 Sustratos a base de excretas de cerdo

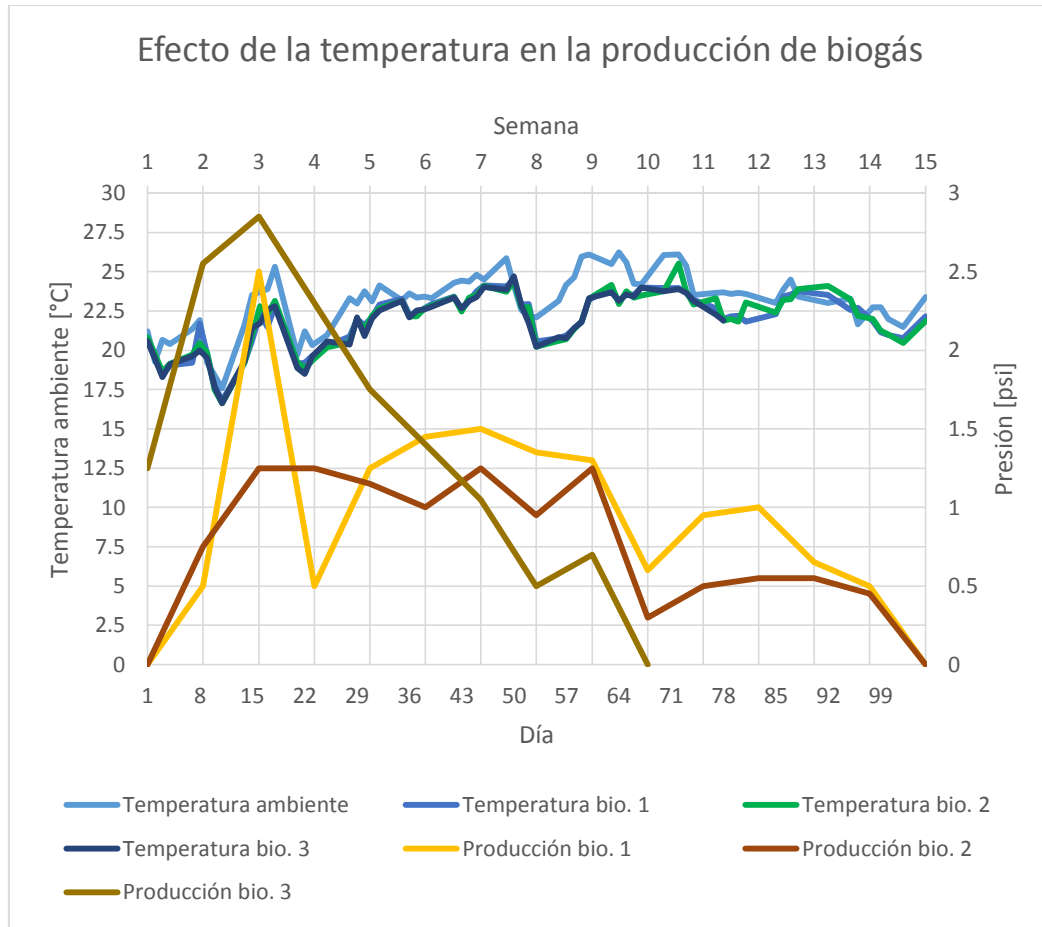
#### Ap.1.1.1 Presión acumulativa



Gráfica Ap. 1. 1. Producción semanal de biogás de los sustratos de excremento de cerdo.

La gráfica Ap. 1. 1 muestra que durante las 5 primeras semanas, el sustrato 3 presentó la mejor producción de biogás, sin embargo, a partir de la tercera semana su producción decreció drásticamente hasta concluir en la semana 10. En contraste, los sustratos 1 y 2 no alcanzaron una producción semanal máxima tan alta como el sustrato 3, pero su producción se prolongó durante 5 semanas más.

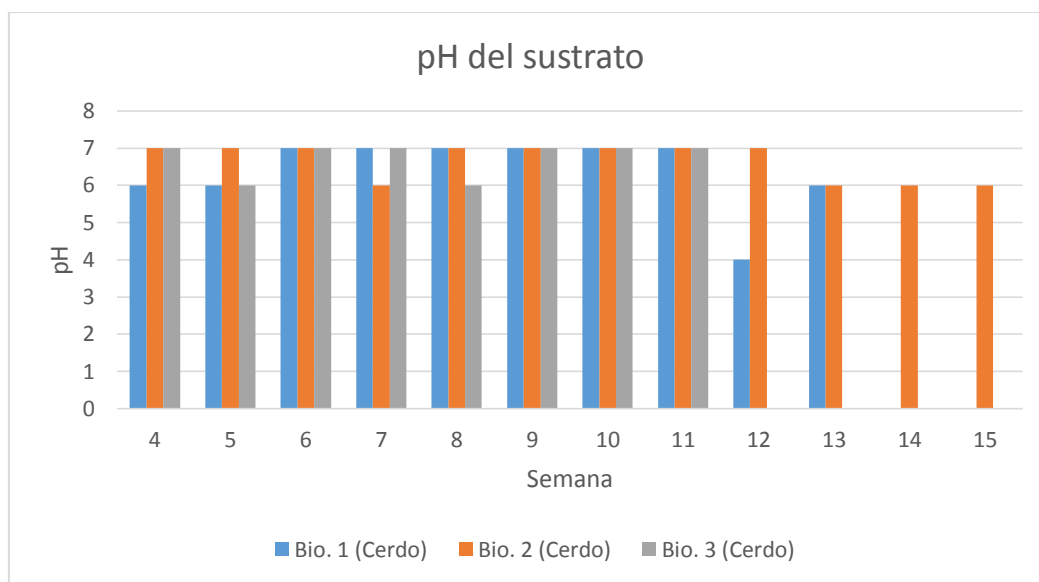
### Ap.1.1.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás



Gráfica Ap. 1. 2. Efecto de la temperatura en la producción de biogás de los sustratos 1, 2 y 3.

La gráfica Ap. 1. 2 permite concluir que los biodigestores 1, 2 y 3 presentaron temperaturas internas similares entre sí, y que las variaciones en este parámetro podrían haber causado una inhibición de la actividad microbiana en las semanas 3 y 8.

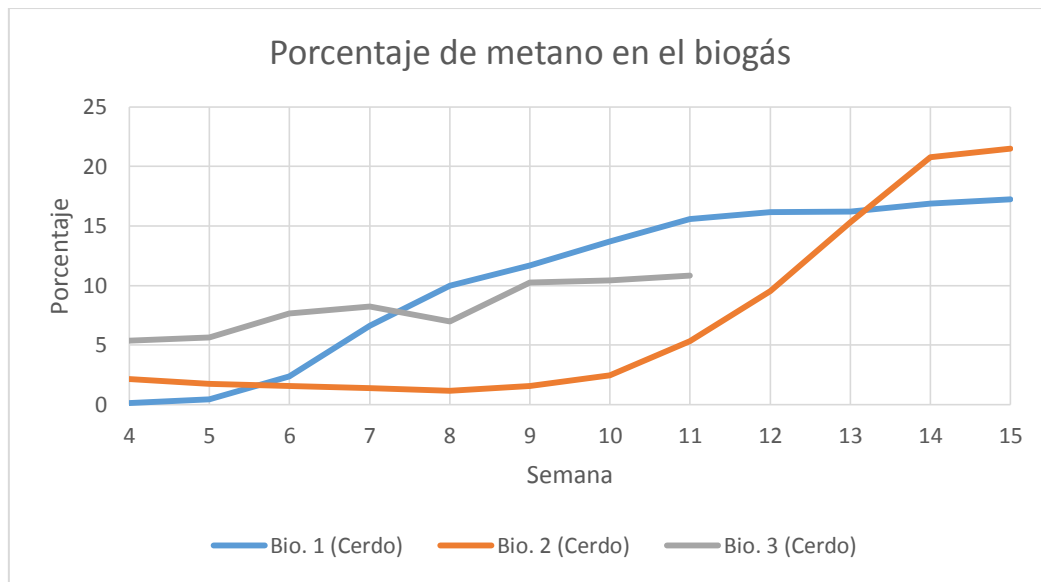
### Ap.1.1.3 pH de los sustratos



*Gráfica Ap. 1. 3. pH de los sustratos 1, 2 y 3.*

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 3, el pH de los sustratos fue predominantemente neutro, especialmente para el sustrato 3, mientras que el sustrato 1 presentó acidificaciones en las primeras y últimas semanas en las que fue evaluado. El sustrato 2 únicamente presentó acidificaciones hacia el final de su producción de biogás.

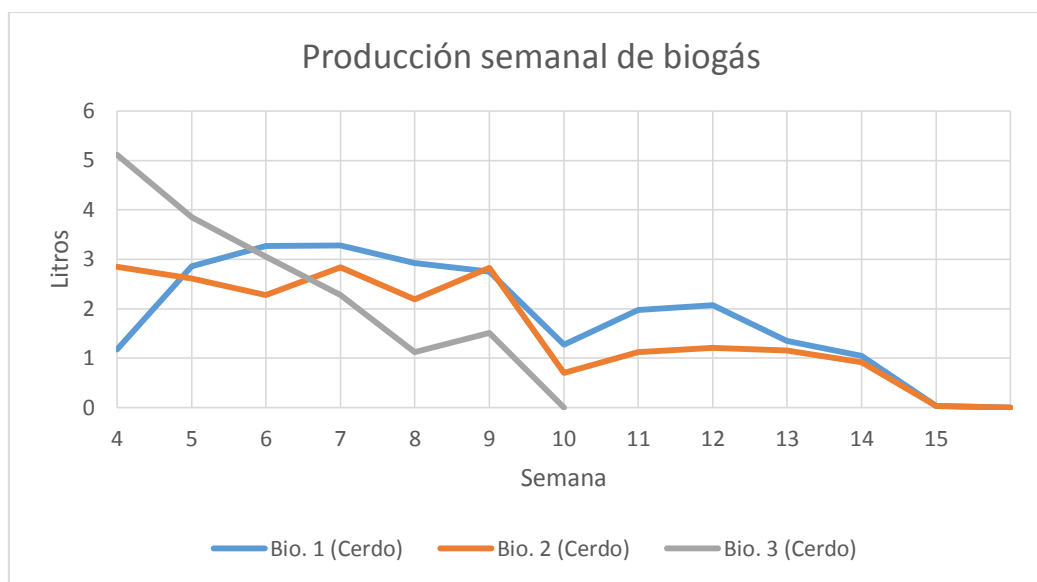
#### Ap.1.1.4 Porcentaje de metano en el biogás



Gráfica Ap. 1. 4. Porcentaje de metano en el biogás producido por los sustratos 1, 2 y 3.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 4, el porcentaje de metano presente en el biogás producido por el biodigestor uno fue muy bajo, aunque se observa una tendencia al aumento a partir de la semana 6 y hasta el final de la producción del biogás. Cabe mencionar que en el caso del biodigestor dos, el porcentaje de metano mantuvo una tendencia a la alza durante 6 de las 7 semanas en las que se monitoreó dicho parámetro, mientras que el biogás del biodigestor tres presentó un porcentaje de metano relativamente constante hasta la semana 9, a partir de la cual aumentó considerablemente.

### Ap.1.1.5 Producción semanal de biogás

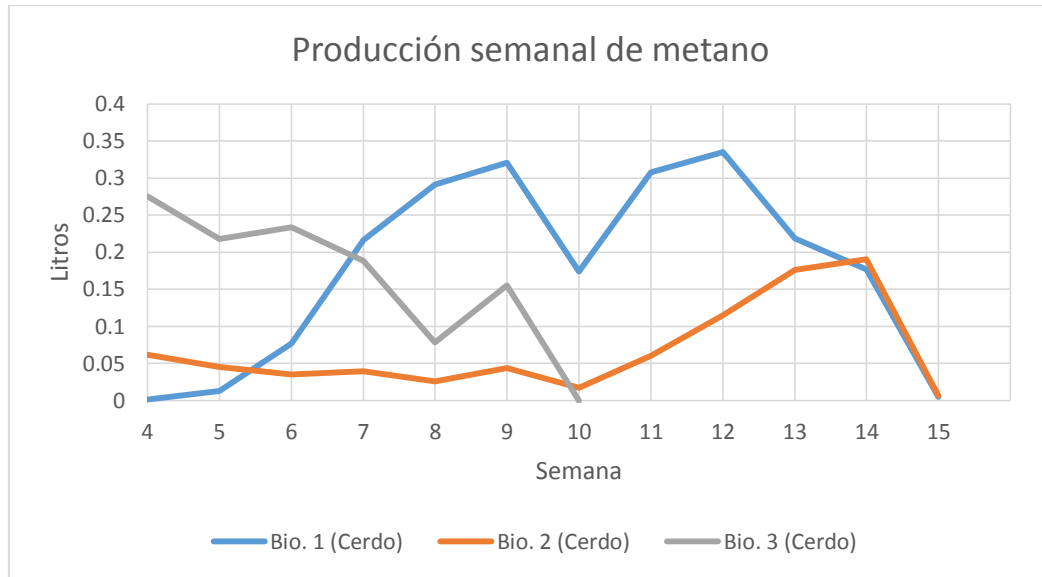


Gráfica Ap. 1. 5. Producción semanal de biogás de los sustratos 1, 2 y 3.

En la gráfica Ap. 1. 5 se observa que el sustrato del biodigestor 1 nunca superó los 3.5 litros producidos de biogás, en tanto que el sustrato correspondiente al biodigestor 3 tuvo una producción máxima de 5 litros por semana, aunque sólo ocurrió una ocasión y posteriormente su producción decreció drásticamente. Por su parte, el biodigestor 2 presentó una producción relativamente constante entre las semanas 4 y 9, para luego decrecer en la semana 10 y de nuevo mantener una producción estable hasta la semana 14, luego de la cual comenzara a decrecer hasta llegar a cero.



### Ap.1.1.6 Producción semanal de metano



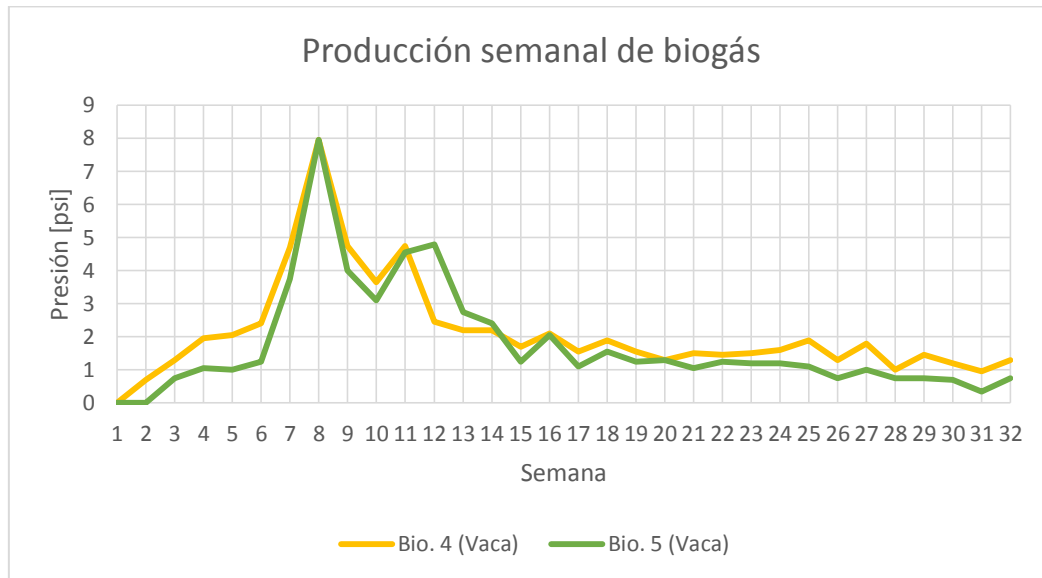
Gráfica Ap. 1. 6. Producción semanal de metano de los sustratos 1, 2 y 3.

La gráfica Ap. 1. 6 pone en evidencia que la producción semanal de metano de los sustratos a base de estiércol de cerdo es muy pobre, ya que ni siquiera lograron producir 0.35 L de metano en alguna semana. Al comparar las gráficas Ap. 1. 5 y Ap. 1. 6 resulta evidente que aunque se produjeron algunos litros de biogás, estos contenían más CO<sub>2</sub> que CH<sub>4</sub>, pues en el caso del sustrato 1, en la semana 9 produjo casi 3 L de biogás, pero éste sólo contenía 0.32 L de metano.

Las pobres producciones de metano por parte de estos sustratos hacen inviables la operación de biodigestores cargados con dichos sustratos. Además, la producción tan baja obliga a que los TRH de los sustratos abarquen todo el proceso de producción, es decir, 15 semanas para los dos primeros sustratos y 10 semanas para el tercer sustrato.

## Ap.1.2 Sustratos a base de excretas de vaca

### Ap.1.2.1 Presión acumulativa

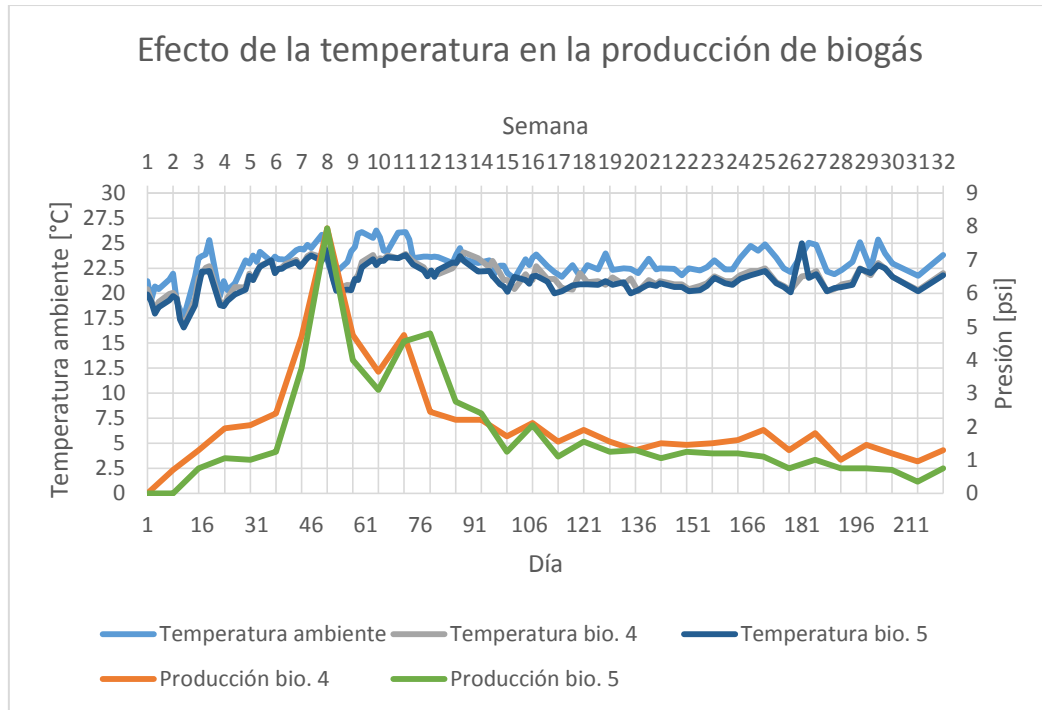


Gráfica Ap. 1. 7. Producción semanal de biogás para los sustratos 4 y 5.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 7, los sustratos a base de estiércol de vaca encontraron su mejor producción entre las semanas 6 y 13, alcanzando su clímax en la semana 8. A partir de la semana 14 la producción fue relativamente regular aunque presentó altibajos, manteniendo una tendencia hacia el decrecimiento. A pesar de ello, tras 32 semanas de prueba aún se produjo biogás, aunque en cantidades relativamente bajas.

Un aspecto interesante es la similitud que presentaron las producciones de ambos sustratos, a pesar de que sus concentraciones son distintas.

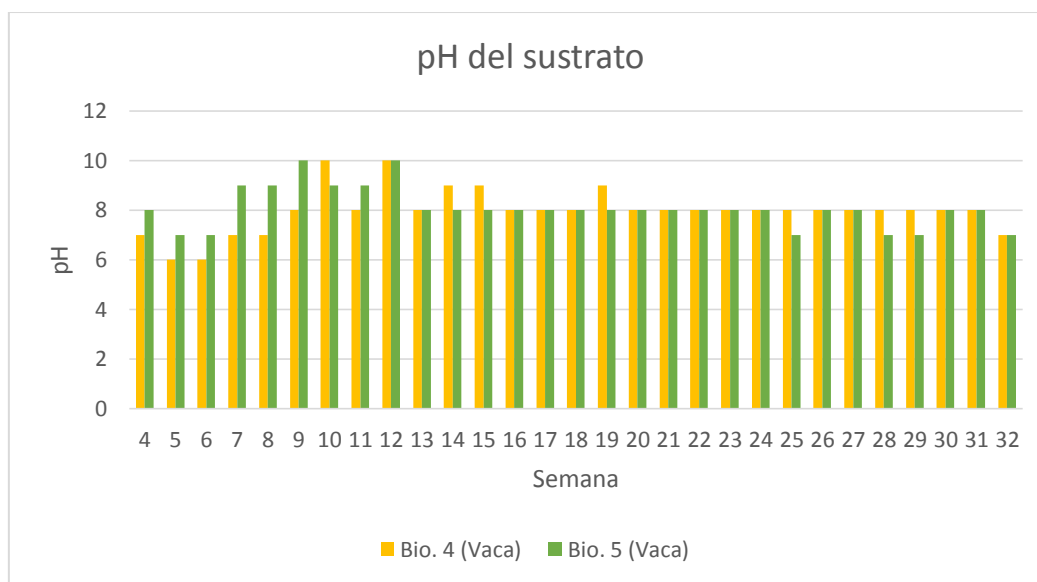
## Ap.1.2.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás



Gráfica Ap. 1. 8. Efecto de la temperatura en la producción de biogás de los sustratos 4 y 5.

La gráfica Ap. 1. 8 permite explicar la drástica disminución de la producción de biogás sufrida por ambos sustratos a partir de la semana 8, ya que en ella se produjo un decremento de alrededor de 3.5 °C en dos días, mientras que la temperatura del sustrato disminuyó 4 °C en el mismo periodo. Estos cambios en la temperatura se pueden considerar drásticos, si se toma en cuenta que regularmente la temperatura cambia 1.8°C en lapsos de tiempo similares. En semanas como la 16, 18, 21 y 24 se aprecian ligeros aumentos en la producción de biogás con respecto a sus semanas inmediatas anteriores, dichos fenómenos coinciden en tiempo con incrementos en la temperatura ambiente y dentro del biodigestor.

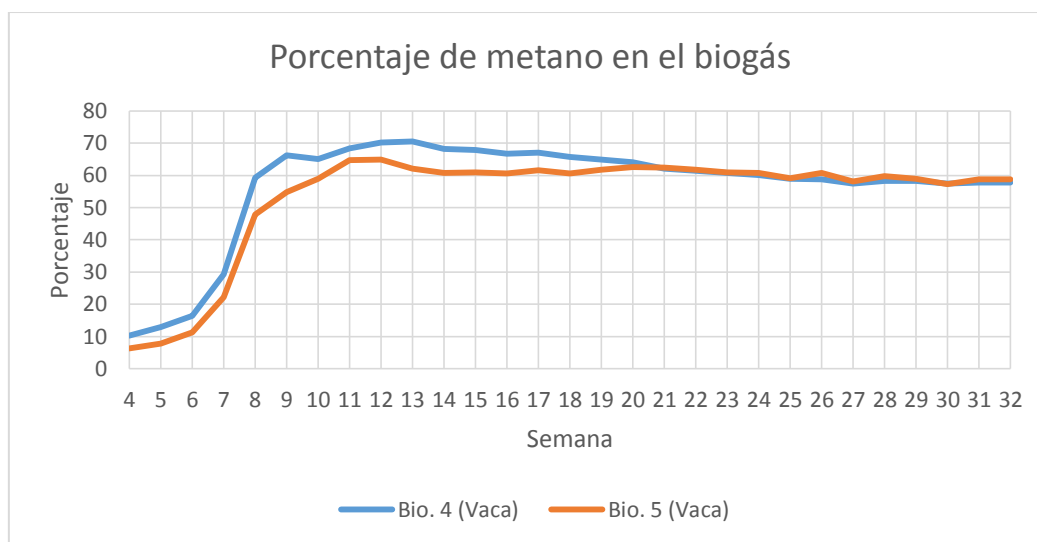
### Ap.1.2.3 pH de los sustratos



Gráfica Ap. 1. 9. pH de los sustratos 4 y 5.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1.9, el pH de los sustratos de excretas de vaca y agua es predominantemente alcalino, ya que para los biodigestores 4 y 5, entre la semana 7 y hasta la 32, el pH se encontró en valores mayores a 7, obteniendo en algunas ocasiones un pH máximo de 10. De las 29 mediciones del biodigestor 4, sólo tres arrojaron un pH de 7 y tan sólo dos veces, en las semanas cinco y seis, el pH fue de 6. En cuanto al biodigestor 5, en tan sólo 6 ocasiones se obtuvo un pH neutro y nunca se obtuvo un pH menor.

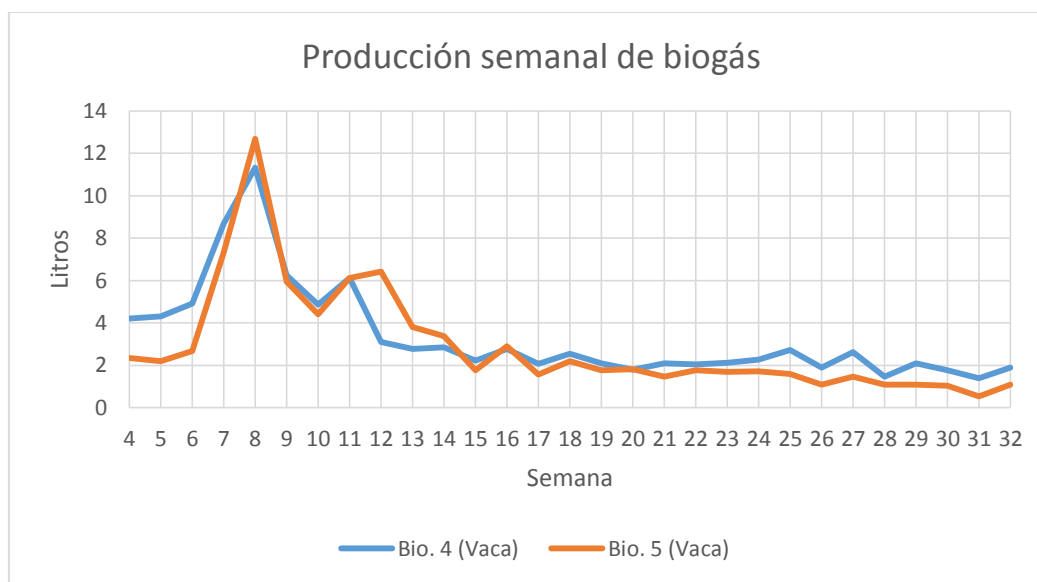
### Ap.1.2.4 Porcentaje de metano en el biogás



Gráfica Ap. 1.10. Porcentaje de metano en el biogás producido por los sustratos 4 y 5.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 10, el biogás producido por el sustrato 4 alcanzó su mayor porcentaje de carbono en la semana 13, obteniendo 70.58% de metano. A partir de ese momento el porcentaje de metano se redujo gradualmente en aproximadamente 0.8% cada semana. El biogás del biodigestor 5 presentó un porcentaje de biogás similar al del biodigestor 4, aunque ligeramente menor.

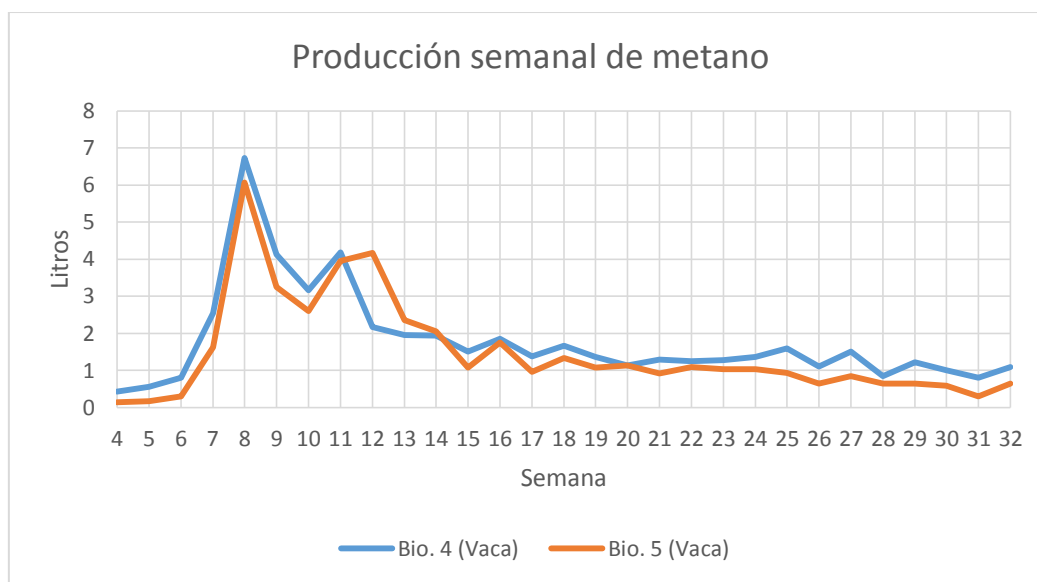
### Ap.1.2.5 Producción semanal de biogás



Gráfica Ap. 1. 11. Producción semanal de biogás de los sustratos 4 y 5.

Según la gráfica Ap. 1. 11, el sustrato del biodigestor 4 alcanzó una producción máxima de 11.3 litros por semana y la máxima producción semanal del biodigestor 5 fue 12.6 litros. Estos valores son muy elevados en comparación con los obtenidos entre las semanas 15 y 32, en las cuales la producción de cada sustrato rondó los 2 L de biogás.

### Ap.1.2.6 Producción semanal de metano

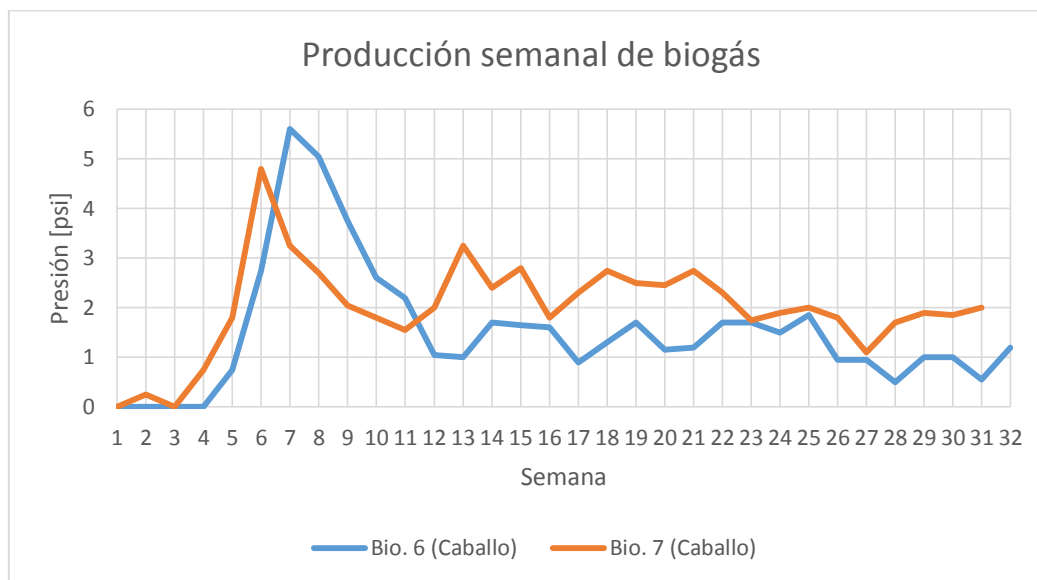


*Gráfica Ap. 1. 12. Producción semanal de metano de los biodigestores 4 y 5.*

La gráfica Ap. 1. 12 ratifica los buenos resultados de los sustratos 4 y 5, pues permite observar que entre las semanas 7 y 13 la producción de metano osciló entre 2 y 6.7 L de metano. A partir de la semana 14 se presentó una tendencia a la disminución en la producción de biogás, sin embargo, en el caso del biodigestor 4, la producción difícilmente fue inferior a 1 L por semana, lo cual es más del doble de la mejor producción de metano de los sustratos a base de estiércol de cerdo (0.33 L).

## Ap.1.3 Sustratos a base de excretas de caballo

### Ap.1.3.1 Presión acumulativa

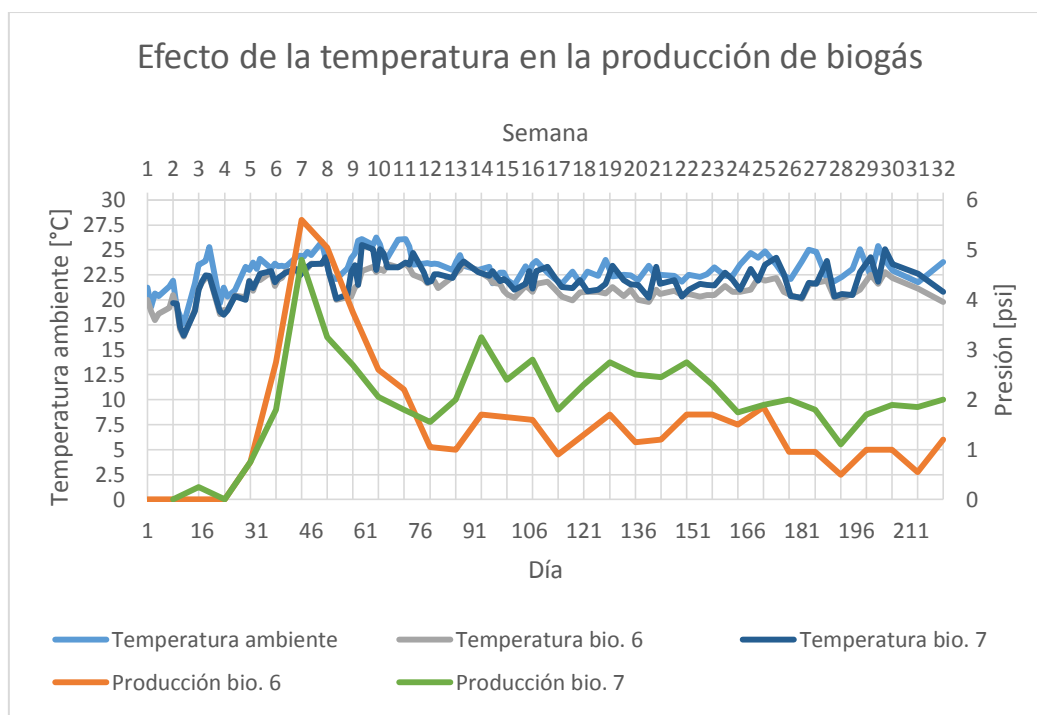


Gráfica Ap. 1. 13. Producción semanal de biogás de los sustratos 6 y 7.

Según la gráfica Ap. 1. 13, el sustrato 6 obtuvo sus mejores resultados entre las semanas 5 y 10, para luego disminuir su producción drásticamente y mantenerla entre 1 y 2 psi hasta la semana 27, a partir de la cual su producción tuvo altibajos y mantuvo una tendencia a la disminución. Por su parte, el sustrato 7 disparó su producción de biogás en la semana 6, alcanzando una presión de 4.8 psi, aunque no logró mantener esta tasa durante más tiempo. Entre las semanas 7 y 11 sufrió una disminución progresiva y a partir de la semana 12 y hasta la semana 23 presentó una producción relativamente estable.



### Ap.1.3.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás



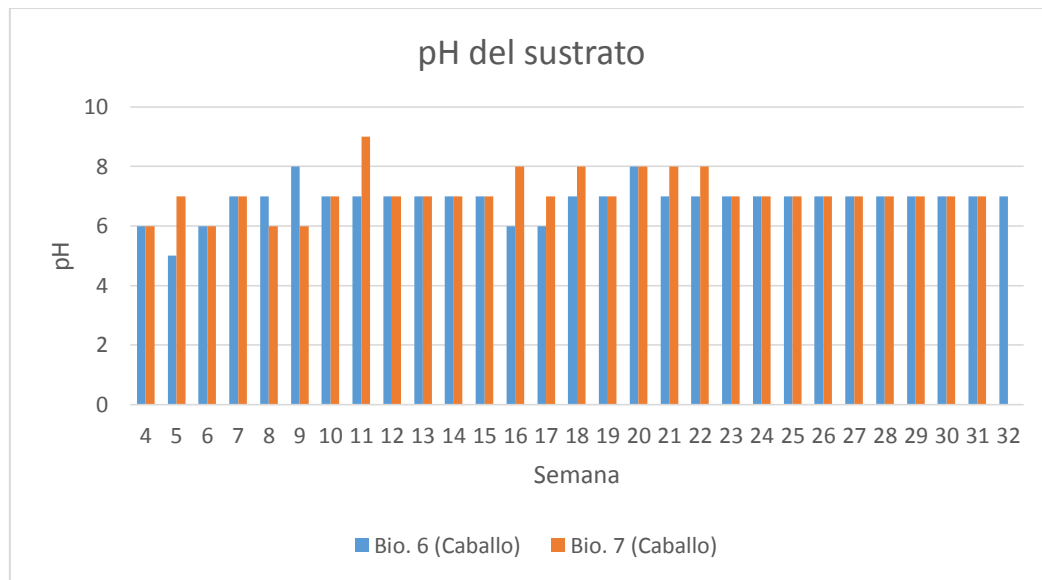
Gráfica Ap. 1. 14. Efecto de la temperatura en la producción de biogás de los biodigestores 6 y 7.

La gráfica Ap. 1. 14 muestra que en la semana 8 se produjo una disminución de la temperatura dentro de los biodigestores de alrededor de 4 °C. Esta variación en la temperatura fue la más drástica que se registró, y coincidentemente, en este periodo de tiempo también se suscitó la caída más drástica en la producción del biogás de ambos sustratos.

En ambos casos, el descenso de temperatura inició justo una semana después de que los sustratos alcanzaran su mejor producción, por lo que es posible que la disminución de producción ocurrida entre las semanas 7 y 8 no fuera provocada por la variación de temperatura. Sin embargo, la disminución de la temperatura en la octava semana sí podría haber causado la inhibición de la actividad microbiana a partir de ese momento, provocando una disminución en la producción de biogás en las semanas siguientes.

En las semanas 12, 17, 20, 26, 28 y 31, las variaciones de temperatura podrían haber afectado la producción de biogás, ya que en esas semanas ocurrieron disminuciones en la temperatura y en la presión de biogás registrada cada semana.

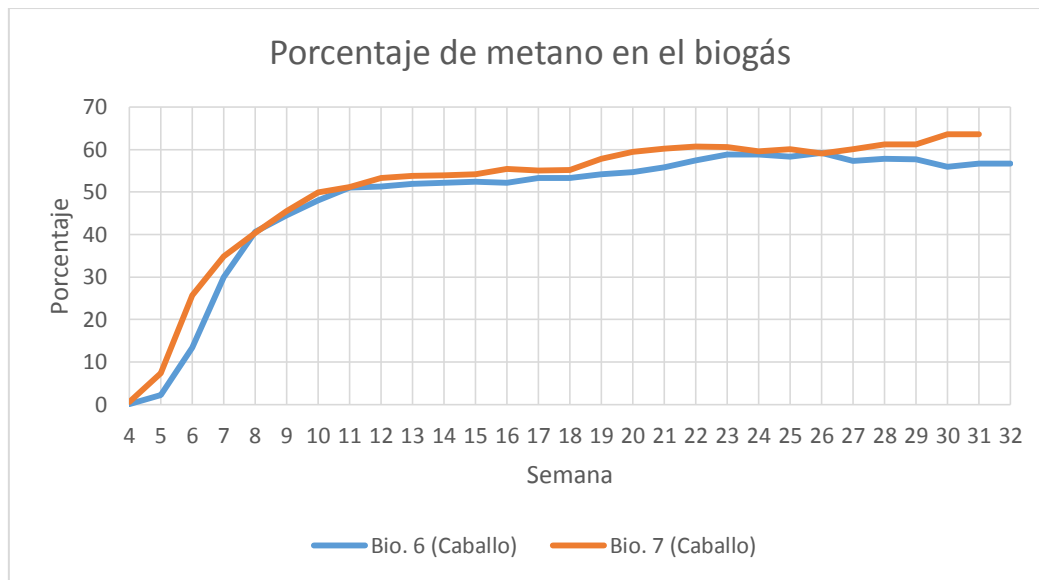
### Ap.1.3.3 pH de los sustratos



Gráfica Ap. 1. 15. pH de los sustratos 6 y 7.

La gráfica Ap. 1. 15 permite concluir que el pH de los sustratos a base de excremento de caballo es predominantemente neutro, aunque ambos sustratos presentaron acidificaciones durante las primeras semanas y alcalinizaciones entre las semanas 15 y 22. Cabe mencionar que el sustrato 6 presentó un pH alcalino en la semana 8, en la cual inició la disminución de su producción de biogás, mientras que el sustrato 7 tuvo un pH neutro en la semana 7, en la cual comenzó a disminuir su producción tras alcanzar su clímax. Esto permite sugerir que el pH no fue el causante de la caída de la producción tras alcanzar su mejor resultado, ya que es deseable que el pH sea neutro.

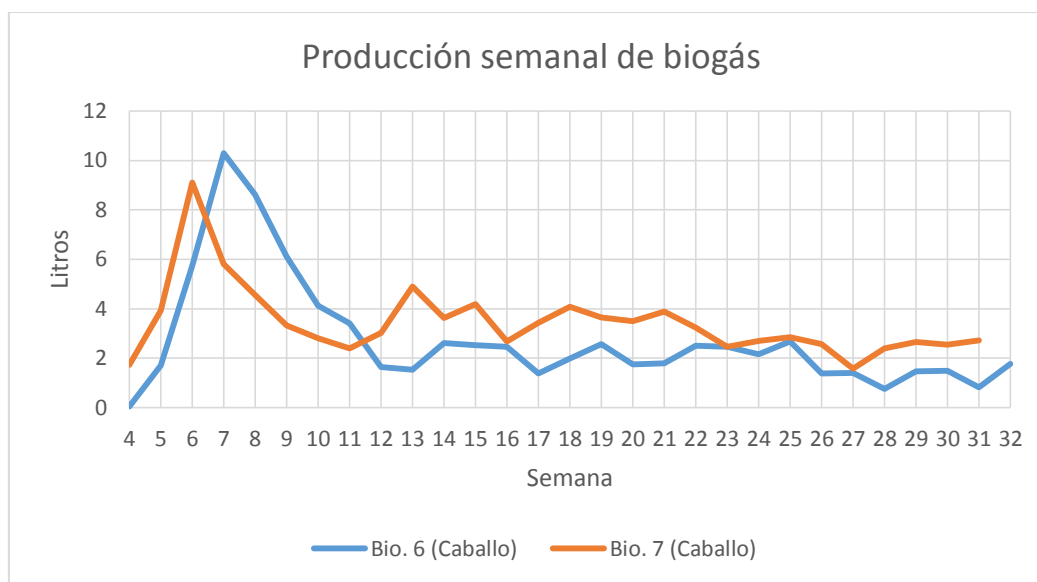
### Ap.1.3.4 Porcentaje de metano en el biogás



Gráfica Ap. 1. 16. Porcentaje de metano presente en el biogás producido por los sustratos 6 y 7.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 16, el biogás producido por los sustratos a base de excretas de caballo presentó un contenido de metano similar para ambas diluciones y fue flamable a partir de la novena semana. Desde la cuarta semana y hasta la semana 23, el porcentaje de metano aumentó gradualmente, pero a partir de esa fecha y hasta la semana 26 se mantuvo relativamente constante. Posteriormente, el contenido de metano en el biogás del sustrato 6 comenzó a disminuir ligeramente, mientras que el biogás del sustrato 7 volvió a aumentar.

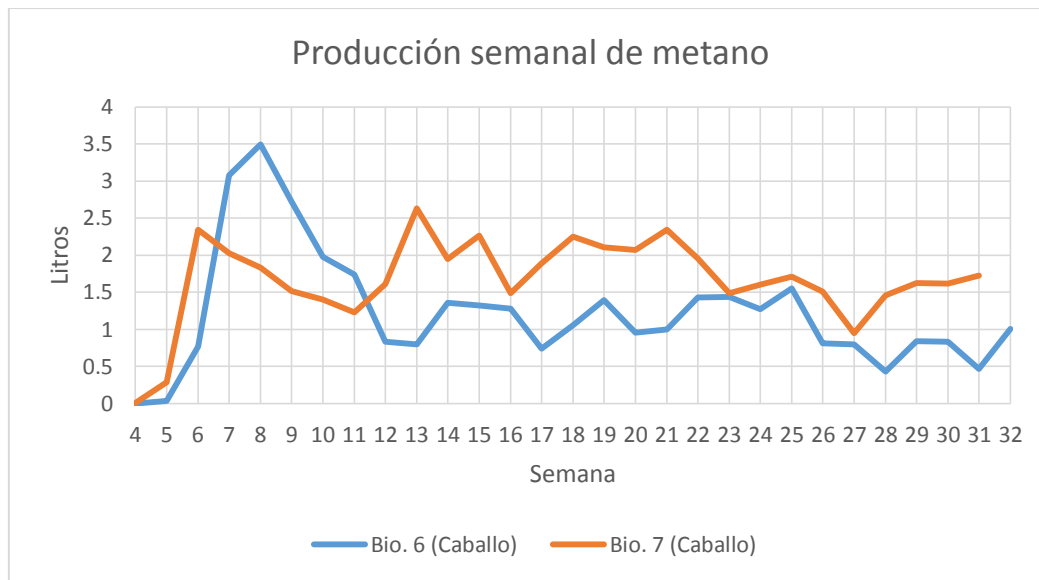
### Ap.1.3.5 Producción semanal de biogás



Gráfica Ap. 1. 17. Producción semanal de biogás de los sustratos 6 y 7.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 17, el sustrato 6 presentó su mejor producción entre las semanas 6 y 10, alcanzando una producción máxima de 10.29 L de biogás. Sin embargo, entre las semanas 14 y 25 su producción rondó aproximadamente los 2 L de biogás. Por su parte, el sustrato 7 logró su mejor producción entre las semanas 5 y 8, para luego presentar una disminución gradual hasta la semana 11. Entre las semanas 13 y 21 su producción osciló entre 2.6 y 4.9 L de biogás. Por lo tanto, ambos sustratos tuvieron una producción muy irregular de biogás.

### Ap.1.3.6 Producción semanal de metano



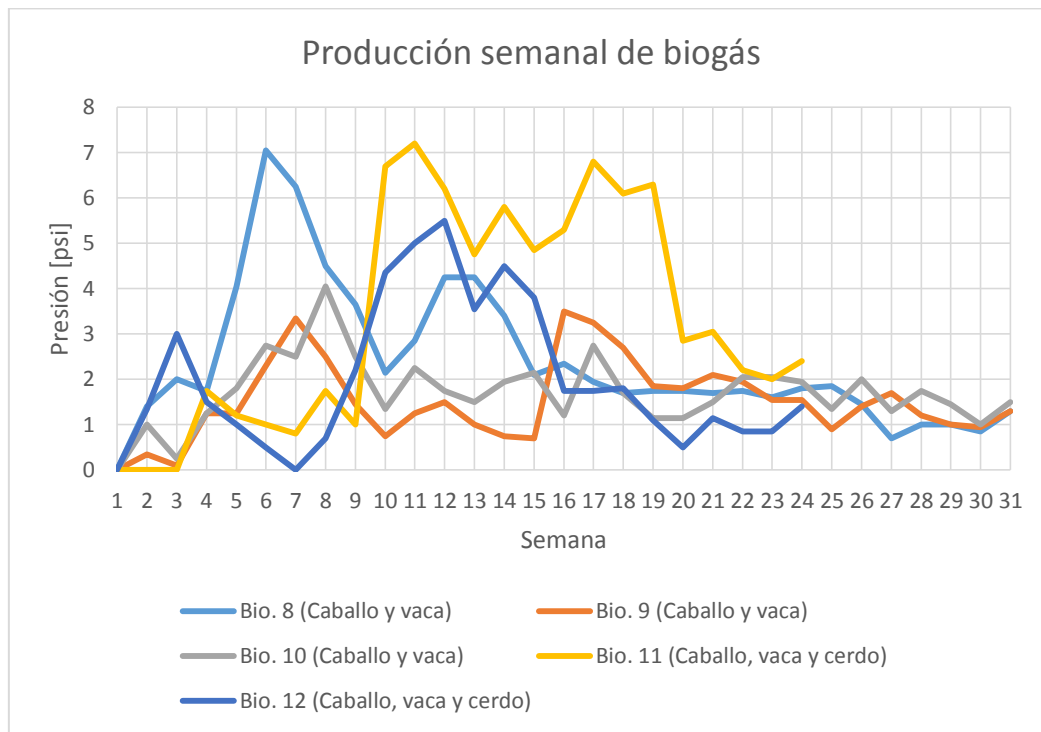
Gráfica Ap. 1.18. Producción semanal de metano.

Si bien la producción de biogás de los sustratos 6 y 7 fue irregular, la producción de metano de éste último resultó mucho más estable; mientras que la del sustrato 6 continuó mostrando poca regularidad. De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 18, el sustrato 6 tuvo básicamente dos periodos de producción, uno superior entre las semanas 6 y 12, y otro inferior entre las semanas 13 y 27. Esta situación hace difícil proponer un tiempo de retención hidráulico apropiado para el sustrato 6, pues si se cierra tras el periodo de producción superior se estaría desperdiciando una cantidad considerable de metano, pero si se cierra tras el periodo inferior se requeriría un volumen mayor en el biodigestor. Lo ideal sería aprovechar la mayor cantidad de metano obtenible mientras el biodigestor ocupa el menor espacio posible, de modo que la elección del tiempo de retención hidráulico dependería del espacio disponible para el biodigestor. Si se cuenta con poco espacio, el TRH sería de 13 semanas, pero si es posible construir un biodigestor más voluminoso, su TRH sería de 27 semanas.

En el caso del sustrato 7, la producción semanal oscila entre 1.2 y 2.6 L de metano, pero es relativamente estable entre las semanas 6 y 26, de modo que el TRH sugerido es de 27 semanas.

## Ap.1.4 Sustratos a base de mezclas de excretas

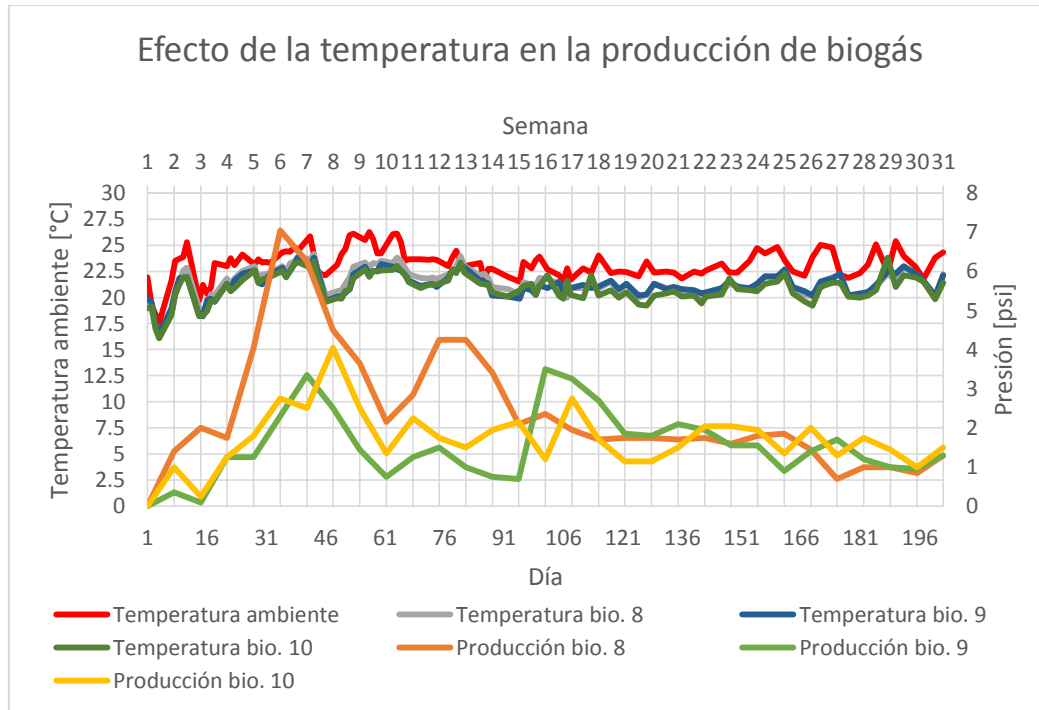
### Ap.1.4.1 Presión acumulativa



Gráfica Ap. 1. 19. Producción semanal de biogás de los sustratos 8 a 12.

La gráfica Ap. 1. 19 indica que los 5 sustratos de mezclas de excretas alcanzaron su mejor producción en distintos momentos, lo que sugiere que el tiempo que un sustrato tarda en alcanzar su clímax depende de la dilución de la mezcla, y por lo tanto, del porcentaje de masa seca en la misma. Además, los sustratos 8 y 11 alcanzaron producciones máximas similares, pero a diferencia del sustrato 8, el sustrato 11 sí logró mantener sus producciones posteriores en valores cercanos al máximo. También el sustrato 12 obtuvo una producción interesante durante un lapso prolongado de tiempo (8 semanas), pero no fue tan productivo como el sustrato 11. En cuanto a los sustratos 9 y 10, es evidente que sus producciones fueron las menores de entre las 5 mezclas. Por lo tanto, la mejor mezcla de estiércol de caballo y vaca fue la del sustrato 8, mientras que el sustrato 11 fue el mejor de entre todas las mezclas realizadas.

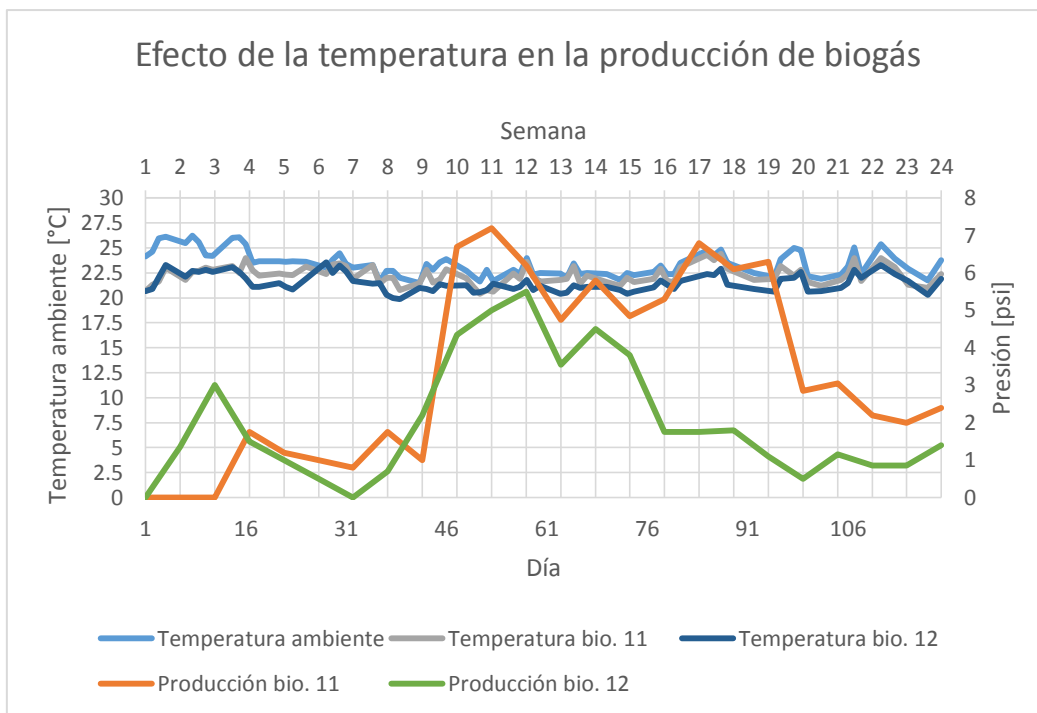
## Ap.1.4.2 Efecto de la temperatura en la producción de biogás



Gráfica Ap. 1. 20. Efecto de la temperatura en la producción de biogás de los sustratos 8, 9 y 10.

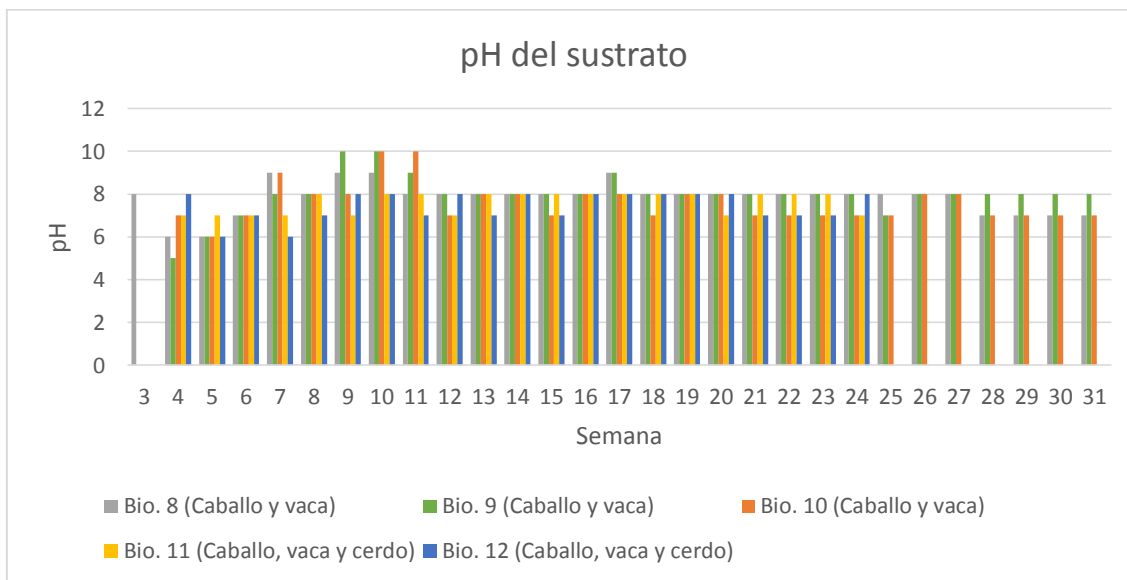
La gráfica Ap. 1. 20 indica que al inicio de la semana 7 se produjo un descenso de casi 5 °C en el interior de los biodigestores. Este descenso coincide con una caída pronunciada en la producción del sustrato 8, aunque no es contemporánea del inicio de su descenso, como sí lo es con el descenso del sustrato 9. En ambos casos se puede afirmar que la variación de la temperatura influyó en alguna medida en la disminución del biogás producido por los sustratos 8 y 9. En cuanto al descenso de la producción del sustrato 10, éste ocurrió una semana después de la caída de temperatura registrada en la semana 7, por lo que es difícil atribuirlo al cambio de temperatura citado anteriormente.

En lo concerniente a los sustratos de mezcla de estiércol de caballo, vaca y cerdo, el efecto de la temperatura en su producción de biogás se muestra en la gráfica Ap. 1. 21. En esta gráfica se aprecia un descenso en la producción de biogás y en la temperatura dentro de los biodigestores en la semana 4. A lo largo del periodo que duraron las pruebas de ambos sustratos se registraron disminuciones y aumentos en la temperatura dentro de los biodigestores, sin embargo, no parecen ser tan significativos como para haber propiciado alguna inhibición bacteriana.



Gráfica Ap. 1.21. Efecto de la temperatura en la producción del biogás de los sustratos 11 y 12.

### Ap.1.4.3 pH de los sustratos



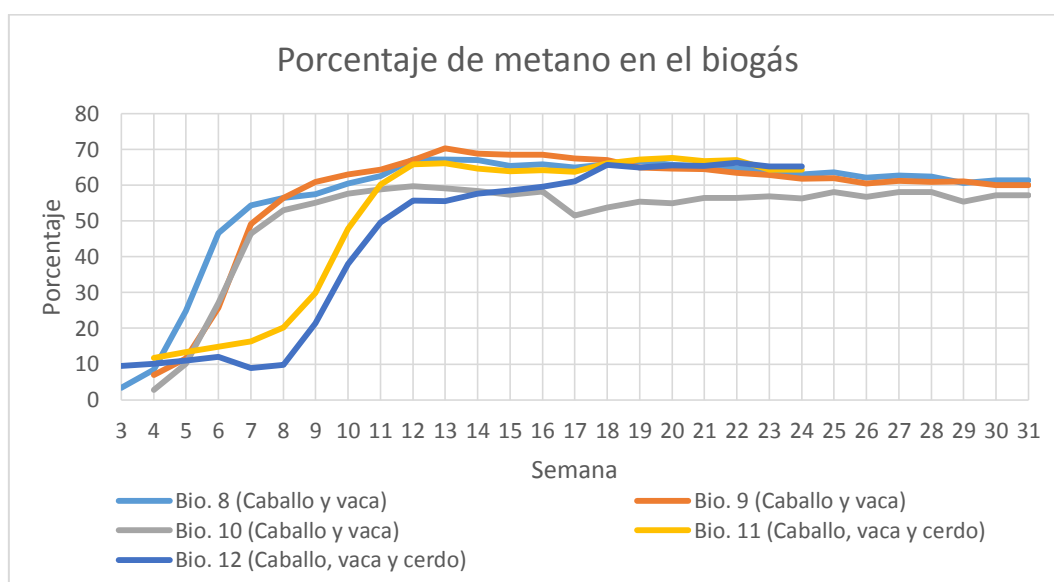
Gráfica Ap. 1. 22. pH de los sustratos 8 a 12.



De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 22, el pH de los sustratos 8, 9, 10 y 11 fue predominantemente alcalino, especialmente entre las semanas 7 a 27. Hacia el final de las pruebas de los sustratos 8 y 10, estos vieron su pH neutralizado, mientras que el sustrato 9 continuó siendo alcalino. Por su parte, el sustrato 12 alternó continuamente su pH entre 7 y 8.

El sustrato 11 es el único que nunca acusó una acidificación, ni siquiera durante el lapso comprendido entre las semanas 4 y 7, en las que los otros sustratos mostraron acidez en al menos una ocasión.

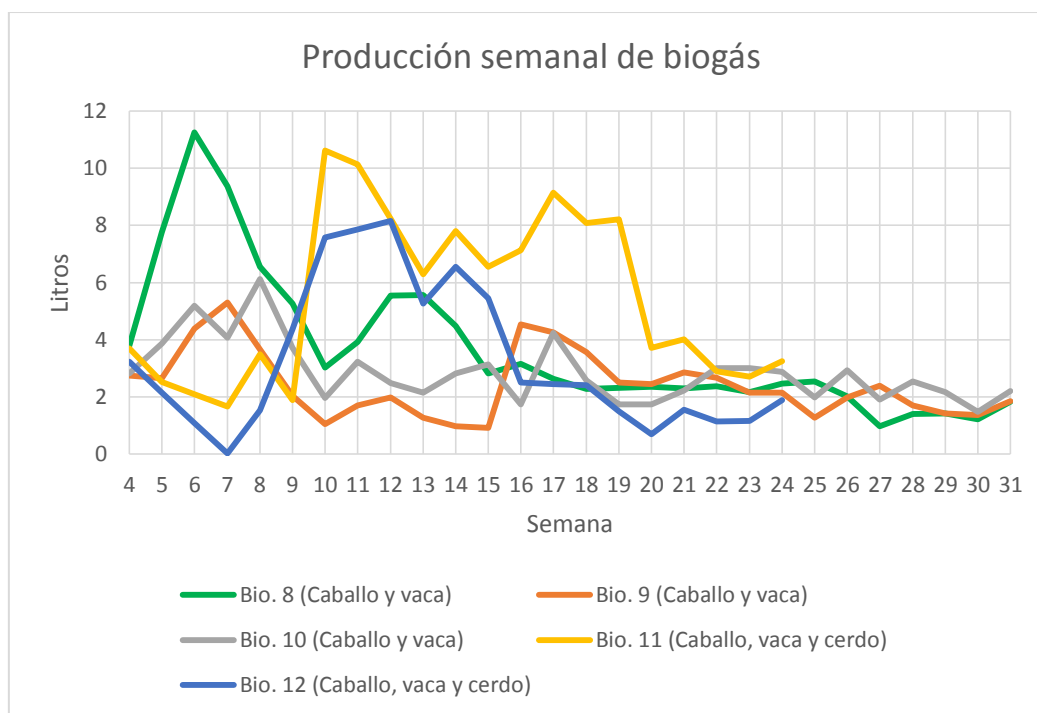
#### Ap.1.4.4 Porcentaje de metano en el biogás



Gráfica Ap. 1. 23. Porcentaje de metano presente en el biogás producido por los sustratos 8 a 12.

La gráfica Ap. 1. 23 muestra que el biogás de los sustratos de estiércol de vaca y caballo alcanzó un porcentaje de metano flamable 3 semanas antes que el biogás producido por sustratos de caballo, vaca y cerdo. La gráfica también hace evidente que el sustrato 9 produjo un mejor porcentaje de metano que el resto de los sustratos de mezcla de estiércol, mientras que el sustrato 10 produjo el menor porcentaje de metano en esta rama. Esto se puede explicar por las proporciones de estiércol de vaca y caballo empleadas en los sustratos 9 y 10, ya que en general, los sustratos de vaca producen biogás con un mayor contenido de metano y el sustrato 9 contiene el doble de estiércol de vaca que el sustrato 10.

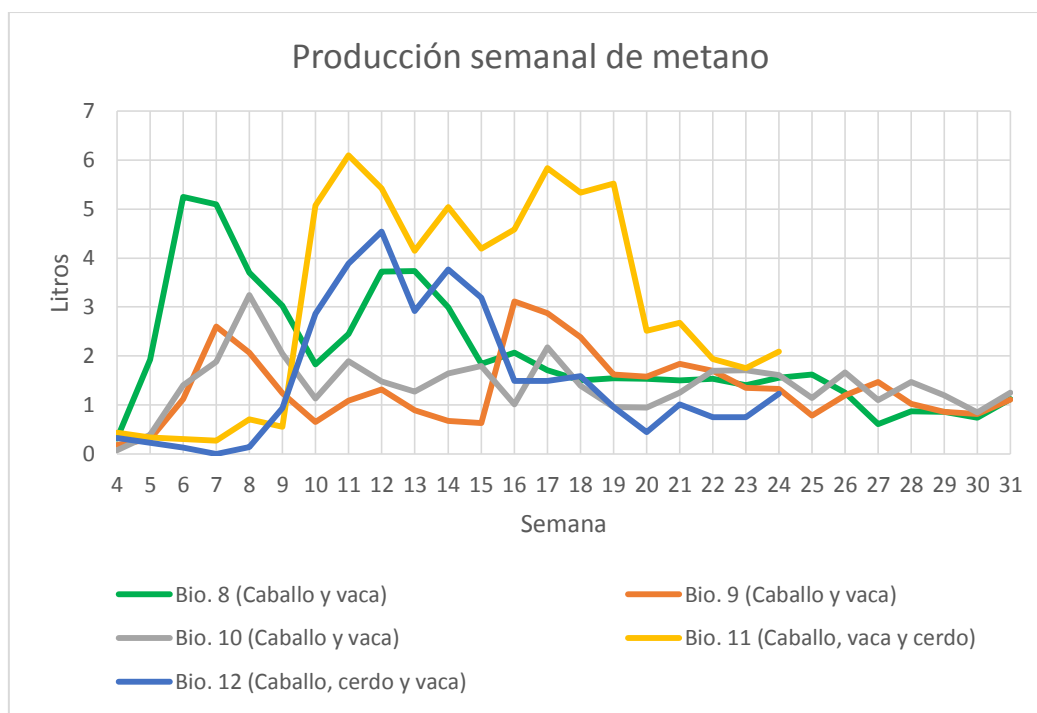
### Ap.1.4.5 Producción semanal de biogás



Gráfica Ap. 1.24. Producción semanal de biogás de los sustratos 8 a 12.

La gráfica Ap. 1. 24 muestra que los sustratos 9 y 10 obtuvieron las menores producciones de biogás entre los 5 sustratos de mezclas de estiércol, mientras que el sustrato 11 tuvo la mejor producción en este rubro. Sin embargo, al igual que ocurrió con el contenido de metano, los sustratos de mezclas de caballo y vaca alcanzaron su producción más alta en un tiempo más breve que los sustratos de excretas de caballo, vaca y cerdo.

### Ap.1.4.6 Producción semanal de metano



Gráfica Ap. 1. 25. Producción semanal de metano de los sustratos 8 a 12.

De acuerdo con la gráfica Ap. 1. 25, el tiempo de retención hidráulico del sustrato 8 sería de 18 semanas, ya que entre las semanas 5 y 17 presenta una producción considerable gracias a la existencia de dos picos en su curva de producción de metano. En cambio, el TRH del sustrato 9 sería notablemente más largo, quizá de 25 semanas, ya que su pico máximo de producción semanal ronda los 3 L de metano, pero antes de alcanzar este valor produjo 0.63 L, lo que hace atractivas a las producciones de entre 1.2 L y 1.8 L que alcanzó durante las semanas 20 y 24. El tiempo de retención hidráulico propuesto para el sustrato 9 también es sugerido para el sustrato 10, cuya producción de metano es similar al de su antecesor pero ligeramente mayor a la de él.

En cuanto al sustrato 11, que obtuvo la segunda mejor capacidad de generación de energía eléctrica, el TRH podría ser de 21 semanas, ya que entre las semanas 10 y 19 produjo al menos 4.15 L de metano por semana e incluso en la semana 20, cuando su producción cayó drásticamente, produjo 2.5 L de metano.

El TRH del sustrato 12 sería de aproximadamente 18 semanas, ya que aunque su mejor lapso de producción ocurrió entre las semanas 10 y 15, en las semanas 16, 17 y 18 obtuvo una producción

semanal nada desdeñable de alrededor de 1.5 L de metano. A partir de ese momento la producción de este sustrato cayó y tan sólo superó la producción de 1 L en una ocasión.