



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

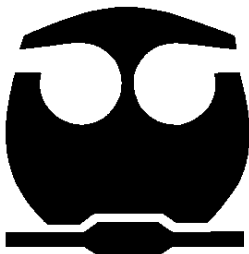
**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN REACTORES A ESCALA LABORATORIO
A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA MEZCLA DE
LACTOSUERO Y ESTIÉRCOL DE VACA**

TESIS

**QUE PARA OPTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

AMARANTA LÓPEZ ROCHA



Ciudad Universitaria, C.D.MX.

diciembre, 2019



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: María Rafaela Gutierrez Lara

VOCAL: Sergio Adrian Garcia Gonzalez

SECRETARIO: Adalberto Noyola Robles

1^{er} SUPLENTE: Alejandra Mendoza Campos

2^{do} SUPLENTE: Hector Javier Martinez Grimaldo

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA), Edificio 5,
Intituto de Ingeniería, CU – UNAM.

ASESOR:

Dr. Adalberto Noyola Robles

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. C. Margarita Elizabeth Cisneros Ortiz

SUSTANTE:

Amaranta López Rocha



El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

**No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del
09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020**

Financiamiento

Este trabajo se realizó dentro del marco del proyecto *Tecnologías sustentables para transformar los residuos agropecuarios, en una diversidad de bioenergéticos para consumo in situ*, financiado por el Fondo SENER-CONACYT, con número de registro 232937. El Sujeto de Apoyo fue la UNAM (Facultad de Ingeniería) y el Responsable Técnico, el Dr. Alejandro Ramírez Reivich.

Abreviaturas

AGVs - Ácidos grasos volátiles

CEIPSA - Centro de enseñanza práctica e investigación en producción y salud animal

DQO - demanda química de oxígeno

PBM - Potencial bioquímico de metano

gSV - gramos de solidos volatiles

INEGI - Instituto nacional de estadística y geografía

LIA - Laboratorio de ingeniería química

SAGARPA - Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación

SIAP - Servicio de Información agroalimentaria y pesquera

α - Relación alfa

Resumen

El uso de energías renovables resulta de suma importancia para la sociedad actual, la búsqueda de independencia respecto a los combustibles fósiles, el descenso de gases de efecto invernadero, así como darles un uso a los residuos orgánicos, dan lugar a nuevas tecnologías. La producción de biogás utilizando la digestión anaerobia es una propuesta que el presente trabajo plantea para la disposición de estiércol de vaca y lactosuero (subproducto de la preparación de quesos); dichos residuos han ido en aumento conforme ha aumentado la producción de ganado bovino en México en los últimos años. Estos residuos al no tener una correcta disposición final afectan al medio ambiente, ya sea liberando gases de efecto invernadero a la atmósfera o contaminando los recursos hídricos superficiales y subterráneos. El objetivo del presente es identificar, en un esquema de co-digestión utilizando estiércol de vaca y lactosuero, la relación más adecuada para la producción de biogás en reactores anaerobios a escala laboratorio. Para ello se plantearon cuatro series de pruebas de potenciales bioquímicos de metano con una relación sustrato/inóculo de 0.5, variando la cantidad de masa del sustrato y del inóculo (siendo el inóculo lodo anaerobio). Cada potencial bioquímico de metano constó de cinco mezclas estiércol/lactosuero (por duplicado), 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100, con un blanco y un control con ácido acético. Los ensayos se realizaron en botellas de 250 mL con un volumen de trabajo de 40 mL; dichas botellas se sometieron a agitación constante, a una temperatura de 37°C y a una presión atmosférica de 0.771 atm y en ausencia de oxígeno en el interior. Para la composición del biogás se utilizó un cromatógrafo de gases.

Los resultados muestran que la mayor producción de metano se obtuvo con el ensayo 25/75. Sin embargo, si el objetivo es aprovechar energéticamente los residuos de una granja, siendo el estiércol el residuo predominante, la relación 75/25 es la más recomendable.

Índice

Resumen	IV
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	3
1.1. Producción de ganado bovino y la industria lechera.....	3
1.1.1. Problemática	5
1.1.2. Producción de biogás como alternativa de uso	7
1.1.2.1 Estiércol de vaca y lactosuero como sustratos.....	8
1.2. Digestión Anaerobia.....	10
1.2.1. Etapas de la Digestión Anaerobia	11
1.2.1.1 Hidrólisis	13
1.2.1.2 Fermentación o Acidogénesis	13
1.2.1.3 Acetogénesis	14
1.2.1.4 Metanogénesis.....	15
1.2.2. Factores que Influyen en la Digestión Anaerobia	15
1.2.2.1 Parámetros fisicoquímicos	16
1.2.2.2 Parámetros operacionales	18
1.2.2.3 Co-digestión.....	20
1.2.2.4 Inhibición de la Digestión Anaerobia	20
1.3. Biogás.....	21
1.4. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)	23
1.4.1. Sustrato.....	23
1.4.2. Inóculo	23
1.4.3. Blancos y Controles	23
1.4.4. Preparación de ensayos.....	24
1.4.5. Recopilación de datos.....	24
Objetivo	25
Capítulo 2. Metodología Experimental.....	26
2.1. Diagrama General.....	26
2.2. Muestreo	26
2.3. Caracterización Fisicoquímica.....	27
2.3.1. Técnicas Analíticas	27
2.3.1.1 Determinación de Sólidos Totales (ST), Volátiles (SV) y Fijos (SF).....	27
2.3.1.2 Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQO _s).....	28

2.3.1.3	pH, alcalinidad y relación alfa.....	29
2.3.1.4	Ácidos grasos Volátiles (AGVs).....	30
2.3.1.5	Caracterización de producción de biogás (Cromatógrafo de gases).....	30
2.3.2.	Caída de pH del lactosuero	31
2.4.	Potencial Bioquímico de Metano	32
2.4.1.	Establecimiento de los PBM.....	32
2.4.2.	Condiciones de trabajo del PBM	34
2.4.3.	Montaje del PBM.....	35
Capítulo 3.	Resultados y Análisis	37
3.1.	Caracterización fisicoquímica de sustratos.....	37
3.1.1.	Caída de pH del lactosuero (ensayos 1 y 2)	38
3.2.	1 ^{er} Potencial Bioquímico de Metano	38
3.3.	2 ^{do} Potencial Bioquímico de Metano.....	44
3.4.	3 ^{er} Potencial Bioquímico de Metano	49
3.5.	4 ^{to} Potencial Bioquímico de Metano	54
3.6.	Comparación de los Potenciales Bioquímicos de Metano	58
Capítulo 4.	Conclusión	62
Anexo A.....		63
Diseño experimental para los PBM.....		63
Caracterización de los ensayos		69
Determinación de producción teórica de metano		73
Anexo B.....		75
4.1.	Ensayos 100/0	75
4.2.	Ensayos 75/25	75
4.3.	Ensayos 50/50	76
4.4.	Ensayos 25/75	76
4.5.	Ensayos 0/100	77
Anexo C.....		78
1 ^{er} Potencial Bioquímico de Metano.....		78
2 ^{do} Potencial Bioquímico de Metano		80
3 ^{er} Potencial Bioquímico de Metano.....		83
4 ^{to} Potencial Bioquímico de Metano.....		85
Referencias		88

Índice de Figuras

Figura 1.1.1. Ganado bovino según función zootécnica (INEGI-ENA, 2017).....	3
Figura 1.1.2. Producción nacional de leche bovino (SIAP-SAGARPA).	4
Figura 1.1.3. Partición en la producción de quesos por tipo [enero-noviembre 2017], (SIAP-SAGARPA, 2017).	4
Figura 1.2.1. Esquema de la Digestión (Vernero, 2011).....	12
Figura 2.1.1. Diagrama General de la Metodología Experimental.	26
Figura 2.2.1. Muestreo de estiércol.....	27
Figura 2.3.1. Determinación de sólidos.	28
Figura 2.3.2. Adición de solución catalizadora.	29
Figura 2.3.3. Medición de biogás.	31
Figura 2.4.1. Sistema del PBM.	34
Figura 2.4.2. Volúmenes para el PBM en los ensayos.	35
Figura 2.4.3. Sistema de PBM.	36
Figura 3.2.1. 1 ^{er} PBM. Gráfica de producción de metano.....	39
Figura 3.2.2. 1 ^{er} PBM. AGVs.....	43
Figura 3.3.1. 2 ^{do} PBM. Gráfica de producción de metano	44
Figura 3.3.2. 2 ^{do} PBM. AGVs	48
Figura 3.4.1. 3 ^{er} PBM. Gráfica de producción de metano.....	49
Figura 3.4.2. 3 ^{er} PBM. AGVs.....	52
Figura 3.5.1. 4 ^{to} PBM. Gráfica de producción de metano.....	54
Figura 3.5.2. 4 ^{to} PBM. AGVs.....	57
Figura 3.6.1. Comparativa de producción de metano de los ensayos de los diferentes PBM	58
Figura C.1. 1 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 100/0 vs Blanco.....	78
Figura C.2. 1 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 75/25 vs Blanco.....	78
Figura C.3. 1 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 50/50 vs Blanco.....	79
Figura C.4. 1 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 25/75 vs Blanco.....	79
Figura C.5. 1 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 0/100 vs Blanco.....	80
Figura C.6. 2 ^{do} PBM. Producción de CH ₄ , 100/0 vs Blanco.....	80
Figura C.7. 2 ^{do} PBM. Producción de CH ₄ , 75/25 vs Blanco.....	81
Figura C.8. 2 ^{do} PBM. Producción de CH ₄ , 50/50 vs Blanco.....	81
Figura C.9. 2 ^{do} PBM. Producción de CH ₄ , 25/75 vs Blanco.....	82
Figura C.10. 2 ^{do} PBM. Producción de CH ₄ , 0/100 vs Blanco.....	82
Figura C.11. 3 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 100/0 vs Blanco.....	83
Figura C.12. 3 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 75/25 vs Blanco.....	83
Figura C.13. 3 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 50/50 vs Blanco.....	84
Figura C.14. 3 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 25/75 vs Blanco.....	84
Figura C.15. 3 ^{er} PBM. Producción de CH ₄ , 0/100 vs Blanco.....	85
Figura C.16. 4 ^{to} PBM. Producción de CH ₄ , 100/0 vs Blanco.....	85
Figura C.17. 4 ^{to} PBM. Producción de CH ₄ , 75/25 vs Blanco.....	86
Figura C.18. 4 ^{to} PBM. Producción de CH ₄ , 50/50 vs Blanco.....	86
Figura C.19. 4 ^{to} PBM. Producción de CH ₄ , 25/75 vs Blanco.....	87
Figura C.20. 4 ^{to} PBM. Producción de CH ₄ , 0/100 vs Blanco.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1.2.1. Residuos orgánicos de diversos orígenes (Vernero, 2011).	16
Tabla 1.3.1. Composición de biogás producido por diferentes fuentes de sustratos (Deublein y Steinhauser, 2008).	22
Tabla 1.3.2. Características generales del biogás (Durán, 2014).	22
Tabla 2.3.1. Relación sustrato/inóculo para determinar la caída de pH en el lactosuero..	32
Tabla 2.4.1. Carga orgánica de las cuatro series para la determinación del PBM.	33
Tabla 3.1.1. Caracterización fisicoquímica de sustratos	37
Tabla 3.2.1. 1 ^{er} PBM. Sólidos Volátiles	39
Tabla 3.2.2. 1 ^{er} PBM. Relación S/X ₀ experimental	40
Tabla 3.2.3. 1 ^{er} PBM. DQO _{Soluble}	41
Tabla 3.2.4. 1 ^{er} PBM. Alcalinidad, pH y relación α	42
Tabla 3.2.5. 1 ^{er} PBM. Comparativa de producción de CH ₄ entre esperada (teórica) y experimental	43
Tabla 3.3.1. 2 ^{do} PBM. Sólidos Volátiles	45
Tabla 3.3.2. 2 ^{do} PBM. Relación S/X ₀ experimental	45
Tabla 3.3.3. 2 ^{do} PBM. DQO _{Soluble}	46
Tabla 3.3.4. 2 ^{do} PBM. Alcalinidad, pH y relación α (* ver texto)	47
Tabla 3.3.5. 2 ^{do} PBM. Comparativa de producción de CH ₄ entre esperada y experimental	48
Tabla 3.4.1. 3 ^{er} PBM. Sólidos Volátiles	50
Tabla 3.4.2. 3 ^{er} PBM. Relación S/X ₀ experimental	50
Tabla 3.4.3. 3 ^{er} PBM. DQO _{Soluble}	51
Tabla 3.4.4. 3 ^{er} PBM. Alcalinidad, pH y relación α	52
Tabla 3.4.5. 3 ^{er} PBM. Comparativa de producción de CH ₄ entre esperada y experimental	53
Tabla 3.5.1. 4 ^{to} PBM. Sólidos Volátiles	55
Tabla 3.5.2. 4 ^{to} PBM. Relación S/X ₀ experimental	55
Tabla 3.5.3. 4 ^{to} PBM. DQO _{Soluble}	56
Tabla 3.5.4. 4 ^{to} PBM. Alcalinidad, pH y relación α	56
Tabla 3.5.5. 4 ^{to} PBM. Comparativa de producción de CH ₄ entre esperada y experimental	58
Tabla A.1. Preparación de ensayos 75/25 para los cuatro PBM	64
Tabla B.1. Diseño experimental para los ensayos 100/0 de todos los PBM	75
Tabla B.2. Diseño experimental para los ensayos 75/25 de todos los PBM	75
Tabla B.3. Diseño experimental para los ensayos 50/50 de todos los PBM	76
Tabla B.4. Diseño experimental para los ensayos 25/75 de todos los PBM	76
Tabla B.5. Diseño experimental para los ensayos 0/100 de todos los PBM	77

Introducción

En los últimos años la producción de ganado bovino en México ha ido en aumento, con base en los datos reportados por INEGI de 2014 y 2017, donde se muestra un incremento de 10.7% en tres años. Como consecuencia, se presenta un aumento de residuos de granja, particularmente de estiércol, el cual no es tratado y, en el mejor de los casos, se usa como abono. La mala disposición de dicho residuo genera contaminación en los recursos hídricos superficiales y subterráneos, en los suelos, por liberación de materia orgánica y nitrógeno, así como en la atmósfera por la emisión de gases de efecto invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno y ozono).

Por otra parte, la industria láctea se enfrenta a otro residuo altamente contaminante, el cual es el subproducto de la producción de queso, conocido como suero de queso o lactosuero. Este residuo conserva el 55% de los nutrientes de la leche, siendo la lactosa la más abundante, además de contener lípidos, proteínas, sales minerales y ácido láctico. Los tratamientos fisicoquímicos tienden a ser exitosos para las empresas lácteas con altos volúmenes de procesamiento y suficiente capital. Por el contrario, para las pequeñas y medianas empresas la disposición de lactosuero es un reto debido a que no tienen los recursos económicos necesarios para el tratamiento y la valorización adecuada. Por lo que, prefieren entregar sin costo el lactosuero para alimentación de animales de granjas. En varios casos, se dispone del efluente líquido en el sistema de alcantarillado municipal, sin cumplir con la normativa de descargas. Aproximadamente en México el 47% del lactosuero producido por año es desechado al medio ambiente, generando graves problemas de contaminación a suelos, ríos y acuíferos, considerando su elevada carga orgánica contaminante (> 60 gDQO/L).

La digestión anaerobia es una alternativa para la disposición de estos residuos, dándoles el uso de co-sustratos para la producción de biogás, constituido principalmente por metano, dióxido de carbono y gases traza. El biogás, al ser una fuente de energía renovable puede ser usada como energía calorífica o generar

electricidad para la industria láctea, reduciendo así el uso de combustibles fósiles, como también la emisión de gases de efecto invernadero.

El lactosuero a pesar de su alta carga orgánica se ve limitado en su producción de biogás debido a su bajo pH y su baja alcalinidad lo que provoca inestabilidad o la inhibición de la digestión anaerobia. Por su parte, el estiércol tiene un potencial de biogás medio, menor cantidad de AGVs y le proporciona al lactosuero alcalinidad, favoreciendo la estabilidad del proceso, siendo la co-digestión de estos sustratos una excelente alternativa.

Capítulo 1.

Antecedentes

1.1. Producción de ganado bovino y la industria lechera

La producción de ganado bovino es una actividad relevante en México. En el 2014 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), reporto 28 millones 415 mil 337 cabezas de ganado y para el 2017 se contaba con un total de 31 millones 948 mil 274 cabezas, para la cría de becerros, producción de leche, en desarrollo, reemplazo, en engorda y otros (Figura 1.1.1.). Las principales entidades productoras de ganado bovino son Veracruz, Jalisco, Tabasco, Chihuahua y Chiapas.

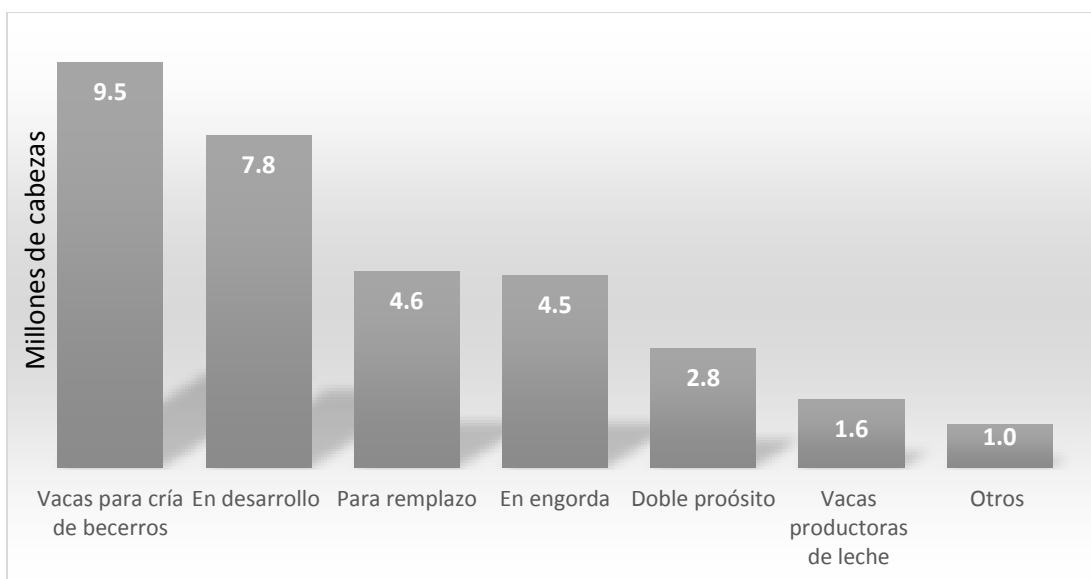


Figura 1.1.1. Ganado bovino según función zootécnica (INEGI-ENA, 2017).

Doble propósito: Vacas para cría de becerros y ordeña.

Otros: Incluye, sementales, reses para el trabajo y no clasificados.

Por otra parte en México, al cierre de 2017, la producción de leche bovino alcanzó 11 mil 807 millones de litros, es decir, 1.7% (199 millones 156 mil litros), más que en el mismo periodo de 2016 (SIAP-SAGARPA, 2017).

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), reporta que del 2012 al 2017 ha ido en aumento la producción de leche bovino, tal como se muestra en la Figura 1.1.2.



Figura 1.1.2. Producción nacional de leche bovino (SIAP-SAGARPA).

Las principales entidades productoras de leche (en miles de litros) en el 2017 son: Jalisco (2,306,316), Coahuila (1,358,884), Durango (1,208,808) y Chihuahua (1,095,174) (SIAP-SAGARPA, 2017).

Por otra parte, la elaboración de derivados y fermentados lácteos como quesos, crema y yogurt alcanzó un volumen de un millón 50 mil 493 toneladas, de las cuales la industria de quesos produjo 361 mil 20 toneladas en el 2017 (SIAP-SAGARPA, 2017). En la Figura 1.1.3. se muestra la distribución en porcentaje de los quesos producidos a lo largo del año.

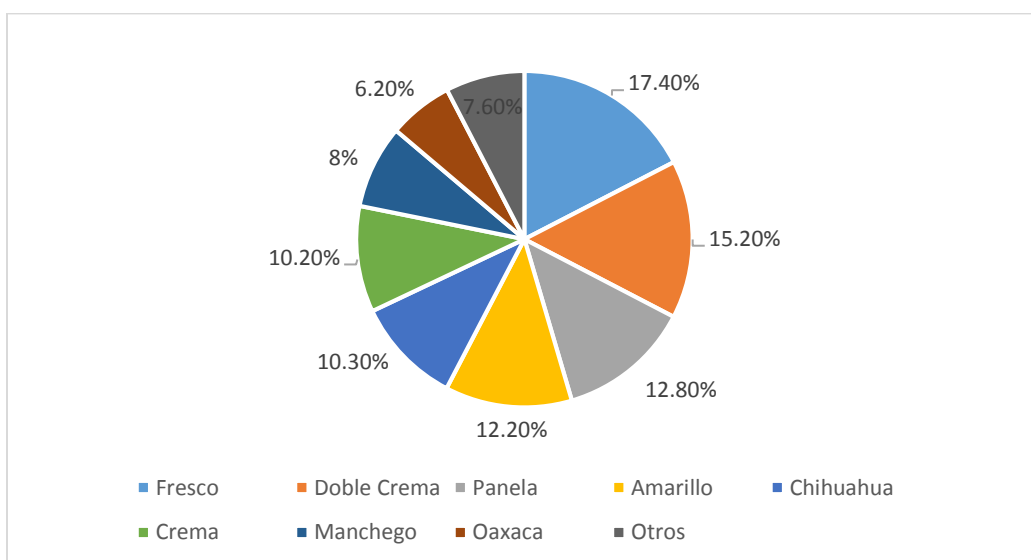


Figura 1.1.3. Partición en la producción de quesos por tipo [enero-noviembre 2017], (SIAP-SAGARPA, 2017).

1.1.1. Problemática

El aumento en el número de cabezas de ganado ha aumentado la producción de residuos como lo es el estiércol. La cantidad total estimada de estiércol de vaca producido en México en 2007 fue de 75 millones 928 mil 914 toneladas fracción sólida/año (INEGI, 2007). Esta cifra se calcula en función del número de bovinos en 4 rangos de edades (menos de 1 año, 1 a 2 años, 2 a 3 años y más de 3 años) con la correspondiente producción de estiércol por animal (4, 8, 10, 25 kg/animal día) la cual se estima sólo para la fracción sólida de estiércol (estiércol mezclado con orina y paja). En las unidades de ordeño mecanizadas, el estiércol está en forma de suspensión (estiércol mezclado con orina y agua utilizada para la limpieza de la unidad de ordeño) (Vera, Martínez, Estrada, & Ortiz, 2014). Siguiendo esta metodología, en 2017 la producción de estiércol bovino asciende a 120 millones de toneladas fracción sólida por año.

La gran cantidad de estiércol producido no tiene un tratamiento previo o adecuado para su disposición final, lo cual implica mantener un foco de infección latente perjudicial para la comunidad en general (Vera et al., 2014). Comúnmente el estiércol de vaca se almacena en pilas; el tiempo de almacenamiento y las medidas asociadas dependerán del tamaño de la unidad de producción. El estiércol almacenado se aplica en tierras agrícolas como abono, sin embargo, cuando existe un exceso de estiércol en un sitio de producción, el sobrante se vende a productores de composta y/o se les regala a otros agricultores. Sin embargo, el usar estiércol como abono tiene un inconveniente, ya que el estiércol tarda aproximadamente un año en acondicionarse para poder ofrecer todos sus nutrientes de manera asimilable (Herrick & Lai, 1996; Aaron et al., 2004; Vadas et al., 2011). Otra desventaja es que al descomponerse en presencia del aire la reacción que se presenta es exotérmica a través de la fermentación, el calor producido eleva la temperatura a su alrededor y es capaz de inhibir la germinación de la semilla provocando daño a las plántulas, lo cual es resultado de una relación incorrecta de tierra/estiércol (Vera et al., 2014). Una mala disposición que se le da al estiércol en épocas de lluvias es verterlo a canales, ya que no es posible recogerlo (Vera et al., 2014).

Aunado a esto, la industria láctea elabora diversos quesos; en el proceso de su elaboración no sólo llega a producir aguas residuales (lavado de equipos), sino que también se genera un subproducto al cual se le llama suero de leche o lactosuero, que es un líquido resultante de la precipitación y separación de la caseína de la leche durante la fabricación de quesos (Soler, 2015). Se puede estimar que el lactosuero obtenido varía de 4 a 11.3 kg (litro) de lactosuero por kg de queso (Valencia, 2008; Venetsaneas et al., 2009).

Debido al alto contenido orgánico en el lactosuero, se han desarrollado alternativas para su aprovechamiento como:

- Fertilizante
- Producción de biogás por medio de tratamientos biológicos (anerobios)
- Tratamientos fisicoquímicos para producir y recuperar compuestos valiosos como proteínas y lactosa.

Los tratamientos fisicoquímicos tienden a ser exitosos para las compañías lácteas con altos volúmenes de procesamiento y suficiente capital para invertir en su implementación. Por el contrario, para las pequeñas y medianas empresas, la disposición del lactosuero es un reto debido a que no tienen los recursos económicos necesarios para el tratamiento y la valorización adecuada. Por ello, estas empresas, prefieren donar los residuos para alimentación de animales de granjas o descargarlos en el sistema de alcantarillado municipal (Prazeres, Carvalho, & Rivas, 2012).

La descarga anual del lactosuero en México es alrededor de 1.04 millones de metros cúbicos (FOA, 2015), que contiene casi 50,000 toneladas de lactosa potencialmente transformable y 9000 toneladas de proteína potencialmente recuperable (Carrillo Aguado, 2006). Las continuas descargas del lactosuero en el suelo pueden poner en peligro la estructura química y física del mismo, reduciendo los rendimientos de los cultivos y llevar a graves problemas de contaminación a los campos acuíferos (Kavacik & Topaloglu, 2010).

El lactosuero conserva un 55% de los nutrientes de la leche, siendo la más abundante la lactosa (45 – 50 g/L), además de contener lípidos (4 – 5 g/L), proteínas solubles (6 – 8 g/L), sales minerales (8 – 10% de extracto seco) y ácido láctico (Ergüder, Tezel, Güven, & Demirer, 2001). El lactosuero cuando es vertido sin tratamiento se convierte en un problema ambiental grave debido a la elevada cantidad de materia orgánica que aporta (60 g DQO/ L) al cause receptor (Soler, 2015).

El incremento de la DQO y de la DBO en los cuerpos receptores de agua incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en el agua con la consecuente afectación de los ecosistemas acuáticos. Así mismo, un incremento de sólidos suspendidos totales provoca que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática (Valencia & Ramírez, 2009).

En México, del total de lactosuero generado por año se utiliza aproximadamente el 53%, de los cuales el 62% es usado para alimento de animales, el 33% se transforma en derivados de lactosa, caseína, caseinatos y concentrados de proteínas, el 4% es convertido en polvo de suero y solo el 1% se trata como residuo líquido descargado (Valencia & Ramírez, 2009).

El 47% del lactosuero restante es desechado al medio ambiente. Esto representa una significativa pérdida de recursos y causa graves problemas de contaminación. Particularmente para fábricas de queso de tamaño medio, que tienen crecientes problemas de disposición y no pueden pagar altos costos de inversión para las tecnologías de valorización del lactosuero (Valencia & Ramírez, 2009).

1.1.2. Producción de biogás como alternativa de uso

Una alternativa que se les puede dar a estos dos residuos (estiércol de vaca y lactosuero) aprovechando la cantidad de materia orgánica que contienen, es su uso como sustrato para la generación de energía a partir de un proceso de digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es una tecnología biológica establecida a nivel mundial para estabilizar los lodos municipales, para el tratamiento de aguas industriales y para la

digestión de residuos orgánicos tanto municipales como de granjas. Esto se debe a su relativo bajo costo de operación, y sobre todo, a la producción de energía renovable, ya sea en forma de biogás o de hidrógeno, reduciendo de esta forma el uso de combustibles fósiles y por ende, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero (Mancillas, Rodríguez, & Ríos, 2012).

La degradación de residuos orgánicos de digestión anaerobia genera dos productos: biogás y digestato. El biogás, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible y/o para producir electricidad. El digestato que es la parte líquida o los lodos remanentes que no fueron convertidos a biogás, contiene nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, entre otros), materia orgánica recalcitrante, es decir, materia orgánica difícil de degradar, además de microorganismos muertos. El digestato tiene un alto valor como fertilizante (Martí, Pino, & Joaquín, 2017). De esta forma, la digestión anaerobia, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola en un subproducto potencialmente aprovechable (bio-abonos) y al mismo tiempo, producir energía (biogás) (Venero, 2011).

1.1.2.1 Estiércol de vaca y lactosuero como sustratos

La composición del lactosuero depende mucho del tipo y la calidad de la leche, como así mismo de la técnica de producción de queso, la cantidad de levadura, el periodo de coagulación y la temperatura (Kavacik & Topaloglu, 2010).

El lactosuero cuenta con una elevada carga orgánica de 68 a 94 g/L de DQO, variando entre 40 y 65 gSV/L (Escalante, Castro, Amaya, Jaimes, & Jaimes-Estévez, 2018). Tiene una alta biodegradabilidad de hasta 99% y relativamente una alta alcalinidad del orden de los 2,600 mg/L de CaCO_3 (Mawson, 1994), cuenta con un pH ácido, en un intervalo de 3 a 6.5, el cual depende del tipo de queso producido (Escalante et al., 2018). El lactosuero, a pesar de su alto contenido de materia orgánica, puede verse limitado en su rendimiento de producción de metano, debido a su pH que favorece la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs) durante la fermentación de la lactosa. Por esta razón la acumulación de ácidos orgánicos

puede provocar una disminución mayor en el pH, el crecimiento de bacterias acetogénicas y la inhibición de la actividad metanogénica. (Yang et al., 2003). El tratamiento anaerobio del lactosuero con frecuencia encuentra dificultades para mantener una operación estable (Malaspin et al., 1996; Yan et al., 1988; Mockaitis et al., 2006). Se puede presentar una caída de pH debido a su baja alcalinidad, por lo que se requiere un suplemento de bicarbonato para evitar la falla del proceso anaerobio (Kavacik & Topaloglu, 2010).

El estiércol de vaca tiene un potencial de biogás medio, debido a que se compone de dos fracciones: una de fácil biodegradación (que es soluble en agua) y una parte de lenta biodegradación, que es principalmente fibra lignocelulósica. El estiércol es menos biodegradable que el lactosuero, por lo que la rapidez de producción de AGV es menor, además de que proporciona alcalinidad, nutrientes adicionales y elementos traza que son importantes para el crecimiento de microorganismos. Estas características favorecen la estabilidad en el proceso de digestión anaerobia, por lo que la co-digestión de estos dos sustratos es una excelente alternativa (Escalante et al., 2018).

El estiércol de vaca se caracteriza por tener una baja relación carbono/nitrógeno (Esposito et al., 2012). Debido al alto contenido de nitrógeno en el estiércol, el amoníaco tiende a acumularse en los digestores, lo que resulta en una inhibición de los procesos microbianos de la digestión anaerobia (Nielsen & Angelidaki, 2008). Varios estudios han demostrado que la co-digestión del lactosuero con el estiércol puede mantener un pH favorable y mejorar la producción de biogás (Gelegenis et al., 2007; Ghaly, 1996), sin embargo, la relación óptima de co-digestión y el rendimiento teórico de biogás varía mucho según cada caso específico (Esposito et al., 2012; Saddoud et al., 2007).

Comino (2012), en su estudio "*Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey*" menciona que se puede lograr una co-digestión 50/50 (% $V_{\text{estiércol}}/V_{\text{lactosuero}}$), sin el uso de químicos para neutralizar el digestor, dando como resultado un rendimiento de metano de 343.41 L-CH₄/kg SV, a partir de una carga orgánica de 2.65 gSV/L día.

Por otra parte, el aumento de la fracción de lactosuero de 0 a 60% mejora el rendimiento de metano como resultado del mayor contenido de materia orgánica biodegradable del lactosuero (Bertin, Grilli, Spagni, & Fava, 2013).

En su estudio de co-digestión, estiércol de vaca y lactosuero, Kavacik (2010), menciona que, al tratarse directamente el lactosuero sin diluir en reactores anaerobios, surgen problemas de estabilidad. De igual forma hace la mención que el incremento de lactosuero y de temperatura en la co-digestión con estiércol de vaca, incrementa tanto la producción de biogás como la remoción de DQO.

El potencial de metano para el lactosuero esperado se encuentra en un intervalo de 350 – 850 mL-CH₄/gSV (Demirel, Yenigun, & Onay, 2005), mientras que el del estiércol ese encuentra entre 330 – 550 mL-CH₄/gSV (Risberg et al., 2013).

1.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico complejo de fermentación y degradación de la materia orgánica que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, y en el cual participan diferentes comunidades microbianas. En ella, la fracción biodegradable de la materia orgánica se convierte en una mezcla de gases denominada "biogás" constituida principalmente por dióxido de carbono y metano. Por otra parte, se genera un residuo (sustrato digerido) al término del proceso, denominado "digestato" (Tchobanoglous et al, 1993).

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir residuos orgánicos como vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles (Vernero, 2011).

¿Por qué usar un proceso anaerobio y no un proceso aerobio?, en un sistema aerobio, un 65% de la energía producida por el metabolismo microbiano se transforma en nuevas células (lodos), el 35% restante se disipa como resultado de la liberación de energía que acompaña a los procesos vitales de la célula. Mientras tanto en un sistema anaerobio, el 90% de la energía contenida en él se encuentra

en la molécula de metano, y tan solo el 10% de la energía de sustrato se transforma en nuevas células a disponer en forma de lodos (Noyola et al., 2013).

1.2.1. Etapas de la Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas (Vernero, 2011), la cual es considerada un proceso de etapas múltiples de reacciones en serie y paralelo (Pavlostathis, 1991).

El proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica se divide en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Fermentativa o acidogénesis
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

En la Figura 1.2.1. se muestra el proceso de digestión anaerobia y algunos productos intermediarios.

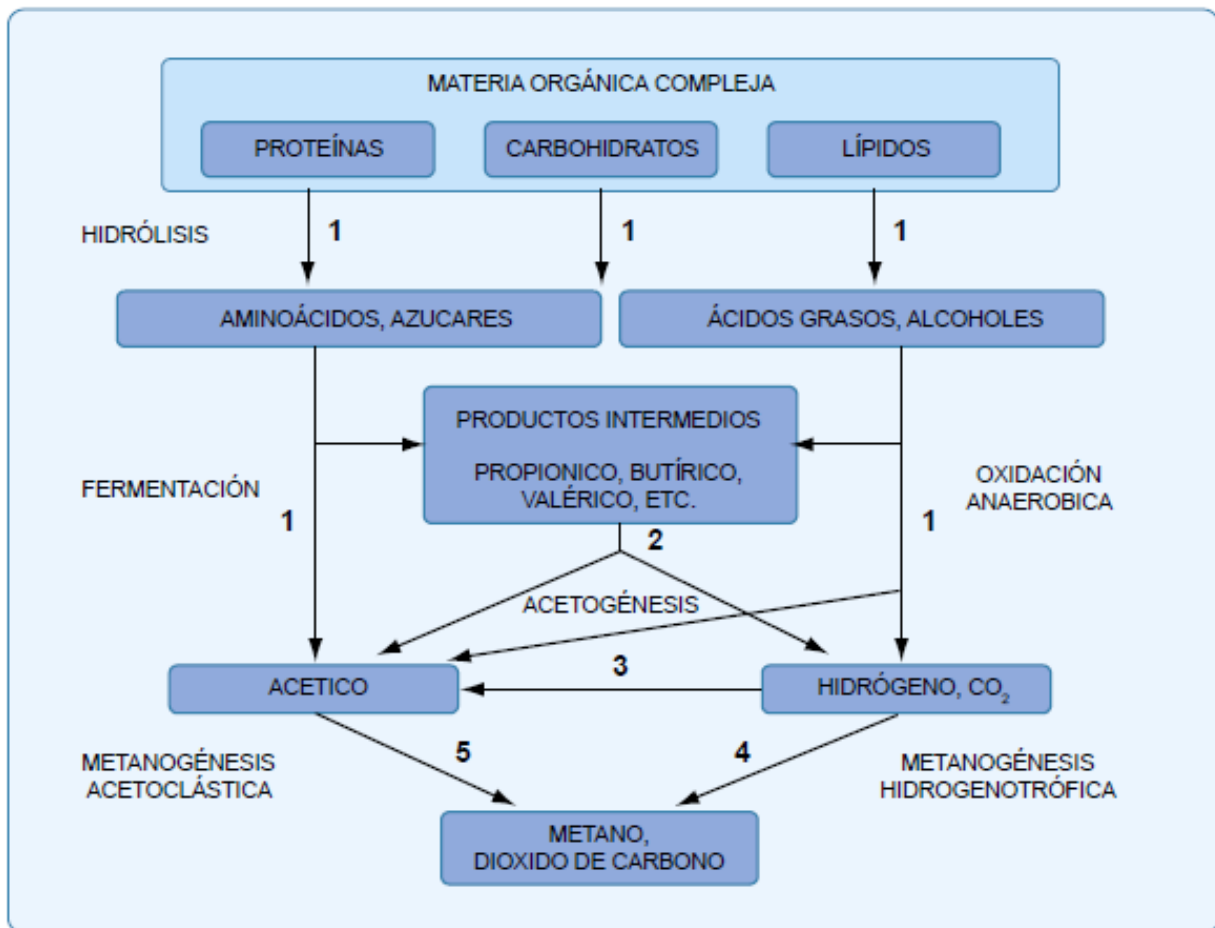


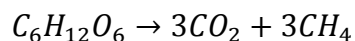
Figura 1.2.1. Esquema de la Digestión (Vernero, 2011).

La numeración indica los microorganismos responsables del proceso:

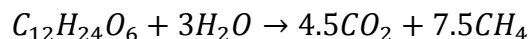
1. Bacterias hidrolíticas, acidogénicas o fermentativas.
2. Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno.
3. Bacterias acetogénicas consumidoras de hidrogeno
4. Arqueas metanogénicas reductoras de dióxido de carbono.
5. Arqueas metanogénicas acetoclásticas.

A continuación, se presentan la Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3, donde se muestra de manera general, los productos obtenidos a partir de las macromoléculas (Durán et al., 2014).

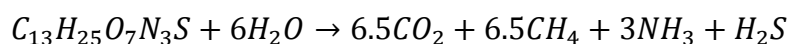
Ecuación 1. Obtención de metano a partir de carbohidratos.



Ecuación 2. Obtención de metano a partir de grasas.



Ecuación 3. Obtención de metano a partir de proteínas.



1.2.1.1 Hidrólisis

La hidrólisis es una descomposición biológica de polímeros orgánicos a monómeros o dímeros. Esta transformación de las macromoléculas es necesaria para reducir su tamaño y que de esa forma puedan pasar a través de la membrana celular bacteriana para metabolizarlas (Soler, 2015).

En esta etapa las moléculas poliméricas (carbohidratos, grasas y proteínas) se rompen en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y algunos alcoholes, entre otros), mediante la acción de enzimas extracelulares secretadas por algunos microorganismos como las celulasas, amilasas, proteasas y lipasas (Schunurer & Jarvis, 2010).

Carrillo (2004), menciona que cada una de las etapas de bioconversión de materiales orgánicos a metano presentan diferente rapidez: mientras que la degradación de la celulosa ocurre en semanas, la de las hemicelulosas y proteínas se lleva a cabo en días y la de las moléculas más simples, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, emplea horas.

1.2.1.2 Fermentación o Acidogénesis

Los monómeros y dímeros producidos durante la hidrólisis son degradados por las bacterias acidogénicas a productos de fermentación intermedios como ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, dióxido de carbono, amoníaco, hidrógeno, entre otros (Soler, 2015). Los ácidos volátiles mayores al acético pueden también ser degradados a acetato e hidrógeno, siendo estos últimos, los principales precursores del metano generado por las arqueas metanogénicas (Durán et al., 2014)

La fermentación se define como la conversión de compuestos orgánicos sin un aceptor específico de electrones, para producir compuestos oxidados o reducidos. Los mayores grupos sujetos a la fermentación bajo condiciones anaerobias son los azúcares y los aminoácidos (Batstone & Jensen, 2011).

La fermentación de aminoácidos puede ser por oxidación directa o por fermentación en pares mediante una vía acoplada, denominada "Digestión Stickland", la cual presenta las siguientes características (Batstone & Jensen, 2011):

- Los aminoácidos son degradados en pares.
- Uno de los aminoácidos del par actúa como aceptor de electrones y el otro como donador.
- El aminoácido donador es oxidado a NH_3 , CO_2 y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido donador.
- El aminoácido aceptor es reducido a NH_3 y a ácido carboxílico con una cadena de longitud igual a la del aminoácido original.
- En general, hay una deficiencia de 10% en aminoácido aceptores de electrones en las proteínas que se encuentran comúnmente.

Uno de los componentes clave del proceso son los ácidos grasos volátiles (AGV), dado que tienden a disminuir el pH e interferir con el desarrollo de la reacción, provocando la inhibición de la actividad metanogénica (Neves, Oliveira, & Alves, 2009).

1.2.1.3 Acetogénesis

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas (Vernero, 2011).

Durán (2014) menciona que las reacciones dependen de la concentración del hidrógeno existente. Para que la acetogénesis tenga lugar, es necesario que el hidrógeno generado en la etapa de acidogénesis se consuma con igual rapidez de

la que se produce. Cuando la producción de hidrógeno en el gas es muy baja (5 a 50 ppm), las reacciones que ocurren son termodinámicamente favorables, por lo que existirá una mayor formación de ácido acético. El caso contrario ocurre cuando la eliminación de hidrógeno es menos eficiente, aumentando su concentración y con ello, la acumulación de ácidos grasos de cadena corta, tales como los ácidos propiónicos, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico, entre otros, lo que puede llevar a una acidificación, disminuyendo así el pH, provocando la inhibición de la metanogénesis.

El ácido propiónico se ha identificado como el más tóxico de los ácidos volátiles y puede ejercer su toxicidad en concentraciones < 5 mg/L (Gerardi, 2003).

1.2.1.4 Metanogénesis

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas (Vernero, 2011).

El 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato (Soler, 2015). El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol (Soler, 2015).

1.2.2. Factores que Influyen en la Digestión Anaerobia

El proceso de digestión anaerobia es altamente susceptible a los cambios en las condiciones ambientales, en especial por los microorganismos metanogénicos. Por ello, se requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales, propiedades fisicoquímicas y operacionales. Como lo son: temperatura, alcalinidad, pH, composición del sustrato, toxicidad, entre otros. A continuación, se presentarán algunos:

1.2.2.1 Parámetros fisicoquímicos

1.2.2.1.1. Sustrato

La materia prima que ingresa a un proceso de biogás es llamada sustrato (alimento), el cual tiene una gran influencia en la estabilidad y eficiencia del proceso. La composición del sustrato es importante tanto para la cantidad de gas producido como para la calidad del gas. La composición también afecta la calidad del residuo de la digestión (digestato), tanto en términos de contenido de nutrientes para las plantas como de contaminación potencial (metales, compuestos orgánicos, organismos causantes de enfermedades, etc.). Elegir el material adecuado da la oportunidad de influir en el resultado del proceso, maximizar la producción de energía y producir un biofertilizante de buena calidad (Schunurer & Jarvis, 2010).

Vernero (2011), menciona que existen diversas materias primas para la digestión anaerobia. Pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, forestal, doméstico u otros, algunos se muestran en la tabla 1.2.1.

Tabla 1.2.1. Residuos orgánicos de diversos orígenes (Vernero, 2011).

Residuos de origen animal	Estiércol, orina, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescado.
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	Algas, maleza acuática.

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaerobio. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, otros) (Vernero, 2011).

Las sustancias de origen vegetal con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostaje) a fin de liberar la celulosa de la estructura de lignina que la protege. En el caso de estiércoles animales, la degradación de cada uno de ellos

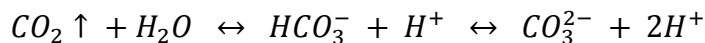
dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que haya recibido (Vernero, 2011).

Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias. Esto es debido al sinnúmero de factores que pueden intervenir en el proceso, que hacen difícil la comparación de resultados (Vernero, 2011).

1.2.2.1.2. Alcalinidad y pH

La alcalinidad está presente principalmente en forma de iones de bicarbonato (HCO_3^-) que están en equilibrio con el dióxido de carbono (CO_2) como se muestra en la ecuación 4. Cuanto mayor sea la alcalinidad, mayor será la capacidad buffer del proceso, lo que promueve un valor de pH estable (Schunurer & Jarvis, 2010).

Ecuación 4. Dióxido de carbono en equilibrio con ácido carbónico y carbonatos



Mientras la digestión anaerobia prosiga con normalidad en un digestor de lodos, la alcalinidad oscilará entre 1000 y 5000 mgCaCO₃/L (Rubio Loza, 2004).

Un criterio para verificar si la carga orgánica suministrada es la adecuada para el proceso anaerobio, es la relación α de alcalinidad. El valor de α debe mantenerse arriba de 0.5, lo cual indica que existe un equilibrio entre los bicarbonatos producidos por la descarboxilación del acetato durante la producción de metano por las bacterias metanogénicas acetoclásticas, y de los AGVs producidos durante la etapa de acidogénesis. Valores de α inferiores a 0.5 son debido a la acumulación de AGVs, lo cual indica que el sistema no tiene la capacidad para consumir la cantidad de sustrato suministrada, debido a que la velocidad de consumo del sustrato de las bacterias fermentativas es mayor que la de las bacterias metanogénicas consumidoras de AGVs. Valores superiores a 0.6 habla de una operación estable (Noyola, 1994).

Los niveles óptimos de pH para la actividad de los microorganismos acidogénicos se encuentran entre 5.5 y 6.5; y para los metanogénicos, entre 7.0 y 7.4. Por lo tanto, el pH óptimo para los cultivos mixtos se encuentra en un intervalo de 6.8 y

7.4, siendo el pH neutro el ideal (Durán et al., 2014). Dicho rango es apropiado para la operación de la digestión anaerobia, con una adecuada conversión de los ácidos volátiles a metano y en dióxido de carbono (Gerardi, 2003).

En los procesos anaerobios, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV). En un sistema anaerobio óptimo la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en el rango de 50 - 250 mg/L de ácido acético. (Durán et al., 2014).

En muchos casos, para mantener un pH óptimo en el biodigestor, es necesaria la adición de alcalinidad utilizando sustancias como bicarbonato de sodio (NaHCO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de amonio (NH_2OH), hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) o carbonato de calcio (CaCO_3) (Vernero, 2011).

1.2.2.2 Parámetros operacionales

1.2.2.2.1. Temperatura

Los procesos anaerobios, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás (Vernero, 2011).

La temperatura óptima para el crecimiento rápido de los organismos y un trabajo eficiente, varía en cuanto a la especie (Schunurer & Jarvis, 2010).

Los microorganismos se clasifican en psicrófilos cuando sus temperaturas óptimas de crecimiento son bajas (inferiores a 20 °C), mesófilos cuando son moderadas (20 - 40 °C), termófilos cuando son altas (50 - 80 °C) e hipertemófilos cuando son muy altas (superiores a 80 °C) (Atlas & Bartha, 2002).

Un proceso de producción de biogás se caracteriza por una gran diversidad de microorganismos, y en cierta medida, difieren en cómo responder a la temperatura (Schunurer & Jarvis, 2010). Sin embargo, el proceso de biogás usualmente opera a

temperatura mesofílica, es decir, en un rango alrededor de 35°C - 37°C, que resulta ser la más adecuadas para las plantas de digestión anaerobia (Durán et al., 2014).

Si la temperatura cae por debajo del intervalo óptimo, los organismos acidogénicos continuaran produciendo ácidos grasos y alcoholes y, por consiguiente, habrá una acumulación excesiva de estas sustancias, debido a la inactividad de los organismos metanogénicos, provocando una caída en el pH del sistema (Schunurer & Jarvis, 2010).

En general, existen menos especies de microorganismos que están presentes de forma activa en condiciones termofílicas, en comparación con las especies presentes en condiciones mesofílicas. De esta forma, el proceso mesofílico involucra una mayor diversidad de organismos y puede tener más estabilidad, razón por la cual este intervalo de temperatura presenta un mayor grado de descomposición de algunos compuestos orgánicos complejos (Durán et al., 2014).

1.2.2.2. Agitación

La mezcla facilita el contacto entre los microorganismos, el sustrato y los nutrientes, proporcionando una temperatura uniforme durante todo el proceso. La mezcla también facilita el contacto y la transferencia de hidrógeno entre las bacterias acidogénicas y las arqueas productoras de metano (Schunurer & Jarvis, 2010). Un mezclado deficiente favorecerá la creación de gradientes de temperatura, conglomeración de sólidos y que haya una transferencia baja del biogás desde el lodo hacia la fase gaseosa; por otro lado, si la agitación es muy alta podrían afectar las relaciones microbianas (Durán et al., 2014).

1.2.2.3. Carga Orgánica

La descomposición biológica de la materia orgánica ocurre continuamente en un proceso de biogás. Si no se agrega material nuevo, el proceso gradualmente se detiene. "Carga" es un término que indica la cantidad de materia orgánica nueva que se agrega al proceso por unidad de tiempo y por unidad de volumen de reactor. Por lo general se le conoce como "carga orgánica" (CO) o "tasa de carga orgánica" (TCO) (Schunurer & Jarvis, 2010). Tal como se muestra en la ecuación 5:

Ecuación 5. Carga Orgánica

$$CO = \frac{Q * C_{SV}}{V} = \frac{C_{SV}}{TRH} [=] \frac{kg SV}{m^3 * d}$$

Donde:

- Q: Flujo volumétrico a la entrada, (m³/d)
- C_{sv}: Concentración de sólidos volátiles en la alimentación, (kg SV/m³)
- V: Volumen útil del reactor

La carga puede expresarse con base en la concentración de sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO) o demanda biológica de oxígeno (DBO) (Rowse, 2011).

1.2.2.3 Co-digestión

La co-digestión anaerobia significa la digestión de dos o más residuos crudos juntos en un proceso, que puede mejorar la velocidad de éste, la biodegradación, la estabilización de los residuos, digestato y la producción de metano (Soler, 2015). La co-digestión se utiliza para aumentar el rendimiento de la DA debido a sus múltiples beneficios, por ejemplo, la dilución de componentes tóxicos, el incremento de la carga de materia orgánica biodegradable, la mejora del balance de nutrientes, el efecto sinérgico de los microorganismos, el aumento en el rendimiento de biogás, el incremento en la rapidez de degradación y la estabilidad del sistema.

1.2.2.4 Inhibición de la Digestión Anaerobia

Bajo condiciones de sobrecarga y presencia de inhibidores, la actividad microbiológica metanogénica no puede convertir el hidrógeno y los ácidos grasos volátiles tan rápido como son producidos, lo que ocasiona la acumulación de estos, agotando la capacidad amortiguadora del medio y disminuyendo por lo tanto el pH (Durán et al., 2014).

Las sustancias inhibidoras de las metanogénicas se pueden encontrar dentro del sustrato o bien generarse durante el proceso. Algunos de estos componentes son: metales pesados que son considerados inhibidores en concentraciones de 0.1 – 10 mg/L, el grupo amonio en concentraciones mayores a 300 mg/L y otros inhibidores

como sulfuro, compuestos orgánicos sintéticos, acumulación de ácidos grasos volátiles, etc. (Parkin & Owen, 2008).

Otros factores que provocan la inhibición se deben a cambios en las condiciones ambientales (pH, temperatura, potencial redox), limitación de nutrientes o a una sobre carga de sustrato. Dichos factores pueden provocar una acumulación de acetato e hidrógeno lo cual provoca que la presión parcial de hidrógeno sea excesiva, e inhiba severamente y en primer lugar a las bacterias que degradan al ácido propiónico, provocando la acumulación de éste (Vernero, 2011). Es por ello que un aumento de ácido propiónico es a menudo una clara indicación de que la interacción entre fermentación/oxidación anaerobia y la formación de metano no se está llevando de una manera óptima (Schunurer & Jarvis, 2010).

1.3. Biogás

Como ya se mencionó, el biogás es un gas combustible producto de la degradación de materia orgánica por acción de microorganismos en un sistema anaerobio (en ausencia de oxígeno) y a pH cercano a la neutralidad.

El biogás se compone principalmente de metano (CH_4 , 55 - 70 %) y de dióxido de carbono (CO_2 , 30 - 45%) (Deublein & Steinhauser, 2008). También contiene trazas de otros componentes, como agua (H_2O , 2 - 7%), sulfuro de hidrógeno (H_2S , 0.005 - 2%), siloxanos (0 - 0.02%), hidrocarburos halogenados (VOC < 0.6%), amoníaco (NH_3 < 1%), oxígeno (O_2 0 - 1%), monóxido de carbono (CO < 0.6%) y nitrógeno (N_2 , 0 - 2%) (Ryckebosh *et al.*, 2011).

La composición del biogás depende principalmente del tipo de sustrato degradado y de los parámetros operacionales bajo los cuales se lleve a cabo el proceso de digestión anaerobia (Mshandete *et al.*, 2006), tal como se muestra en la Tabla 1.3.1.

Tabla 1.3.1. Composición de biogás producido por diferentes fuentes de sustratos (Deublein y Steinhauser, 2008).

Componente del gas	Aguas residuales	Residuo agrícola	Relleno sanitario
Metano (CH ₄) % vol.	65 – 75	45 – 75	45 – 55
Dióxido de carbono (CO ₂) % vol.	20 – 35	25 – 55	25 – 30
Monóxido de carbono (CO) % vol.	< 0.2	<0.2	<0.2
Nitrógeno (N ₂) % vol.	3.4	0.01 – 5	10 – 25
Oxígeno (O ₂) % vol.	0.5	0.01 – 2	1 – 5
Hidrógeno (H ₂) % vol.	Trazas	0.5	0
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) mg/Nm ³	<8,000	10 – 30,000	<8,000
Amoniaco (NH ₃) mg/Nm ³	Trazas	0.1 – 2.5	Trazas
Siloxanos mg/Nm ³	<0.1 – 5	Trazas	<0.1 – 5
Benceno, Tolueno, Xileno mg/Nm ³	<0.1 – 5	0.00	0.1 - 5

En la tabla 1.3.2, se muestra de manera generalizada la composición y características del biogás.

Tabla 1.3.2. Características generales del biogás (Durán, 2014).

Propiedades	Cantidad
Composición	55 - 70 % metano (CH ₄) 30 - 45 % dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 - 6.5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo crudo/m ³ biogás
Límite de Explosión	6 - 12 % de biogás de aire
Presión crítica	74 - 88 atm
Temperatura	- 82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (por contenido de H ₂ S)

1.4. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

El potencial bioquímico de metano (PBM), es la producción específica de metano a partir de un sustrato, por un tiempo de degradación indefinido. En otras palabras, el PBM cuantificar el volumen máximo de metano generado por un sustrato (en términos de SV o DQO agregado) (Angelidaki et al., 2009).

1.4.1. Sustrato

El sustrato a probar debe ser caracterizado, en particular con los siguientes parámetros: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) los cuales son la fracción biodegradable de la materia y demanda química de oxígeno (DQO) (Angelidaki et al., 2009; Durán et al., 2014). Cabe resaltar la determinación de DQO para sustratos sólidos heterogéneos siempre es difícil y está abierta a cierta incertidumbre (Buffiere et al. 2006; Raposo et al. 2008).

1.4.2. Inóculo

El inóculo debe ser "fresco" de algún tipo de reactor anaerobio y con una amplia composición microbiana trófica para asegurar que diferentes sustratos no enfrenten ninguna limitación en su degradación. En caso de que el reactor donde se origina el inóculo tenga una composición de alimentación muy simple, se deben mezclar diferentes inóculos, por ejemplo, lodos de aguas residuales digeridos junto con gránulos (Angelidaki et al., 2009).

La concentración del inóculo siempre debe ser mayor a la del sustrato (en términos de sólidos volátiles) y la relación sustrato - inóculo (S/X) debe reconocerse como uno de los principales parámetros que afectan los resultados de los ensayos anaerobios (Neves, Oliveira, & Alves, 2004).

1.4.3. Blancos y Controles

La producción de metano a partir del inóculo (producción endógena) se determina en ensayos denominados "blanco", con el mismo medio mineral de las botellas prueba y sin sustrato. La producción de metano obtenida se resta de la producción de metano de los ensayos con sustrato. El procedimiento de control de la actividad del inóculo se determina en uno o más recipientes con sustrato estándar,

dependiendo de la naturaleza del sustrato probado. El ácido acético es el más utilizado. Los ensayos de control indican la respuesta del inóculo hacia los sustratos (Angelidaki et al., 2009).

1.4.4. Preparación de ensayos

Los ensayos deben realizarse cada uno mínimo por duplicado para cada dilución utilizada, la cual depende de la complejidad (homogeneidad) de los sustratos y la reproducibilidad de la prueba. Cuando se usan sustratos con alta heterogeneidad deben ser usados más de tres réplicas para obtener resultados confiables (Angelidaki et al., 2009).

Para nuevos sustratos con características de degradación desconocida, se requieren varias disoluciones diferentes del sustrato (Angelidaki et al., 2009).

El sistema debe mantenerse en condiciones anaerobias; por lo general los ensayos se preparan en una cámara anaerobia, la cual se purga y se le suministra un flujo de N_2/CO_2 (80/20% volumen).

1.4.5. Recopilación de datos

El biogás se puede medir por medio de diferentes técnicas: métodos volumétricos (típicamente desplazamiento de agua básica para la solubilización del CO_2), manométricos (determinación de la variación de presión por transductores), métodos de cromatografía de gases con detectores de ionización de llama (FID) o conductividad térmica (TCD): Por lo general, el metano acumulado en el espacio de cabeza del ensayo se mide por cromatografía de gases y la muestra de gas debe ser tomada con una jeringa hermética. Finalmente, la masa de metano contenida en la muestra y cuantificada por el cromatógrafo debe ser llevada al volumen de cabeza de la botella muestreada (Angelidaki et al., 2009).

Objetivo

Identificar la relación entre los sustratos, estiércol de vaca y lactosuero, más adecuada para la producción de metano en reactores anaerobios a escala laboratorio a partir de la realización de Potenciales Bioquímicos de Metano, usando diferentes mezclas (proporciones) estiércol/lactosuer.

Capítulo 2.

Metodología Experimental

2.1. Diagrama General

En la Figura 2.1.1. se presenta el diagrama de la metodología experimental en general, la cual se describirá a detalle en este capítulo.

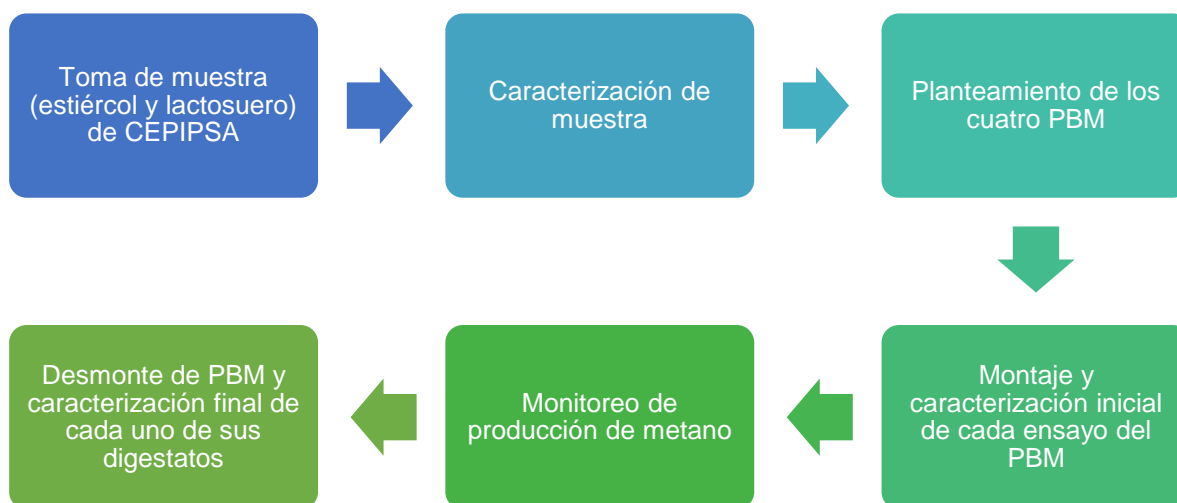


Figura 2.1.1. Diagrama General de la Metodología Experimental.

2.2. Muestreo

El muestreo de estiércol de vaca y lactosuero se llevó a cabo en el Centro de Enseñanza Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEIPSA) de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia, UNAM, la cual se encuentra ubicada en Topilejo Tlalpan, Ciudad de México.

A lo largo de la tesis se realizaron dos muestreos, para cada uno se tomó aproximadamente 4 kg de estiércol fresco de vaca y 4 L de lactosuero de queso de hebra.

La muestra de estiércol se obtuvo directamente de los corrales evitando que se mezclara con paja, mientras que el lactosuero, se proporcionó por personal de la quesería, el cual se obtuvo de la producción de queso de hebra de ese día (Figura 2.2.1).



Figura 2.2.1. Muestreo de estiércol.

Se realizaron cuatro pruebas de PMB, los dos primeros corresponden al primer muestro y los dos últimos al segundo.

Las muestras se preservaron en el cuarto frío del Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) en el Edificio 5 del Instituto de Ingeniería (IINGEN), a una temperatura de 4 °C.

2.3. Caracterización Físicoquímica

La caracterización se aplicó para cada uno de los ensayos y cada uno de los digestatos obtenidos al finalizar los PBM, para así, poder hacer una comparativa, obtener información sobre la remoción de materia orgánica del sustrato (estiércol/lactosuero) y obtener conclusiones con respecto al desempeño de producción de metano.

La caracterización físicoquímica constó de las siguientes técnicas analíticas, las cuales se realizaron por duplicado para cada muestra y ensayo:

2.3.1. Técnicas Analíticas

2.3.1.1 Determinación de Sólidos Totales (ST), Volátiles (SV) y Fijos (SF)

Se tomaron 25 mL de cada una de las muestras y se vertieron en su respectiva cápsula. Previamente las cápsulas fueron puestas a peso constante, es decir que estuvieron una hora en la mufla a 550 °C, posteriormente, de 15 a 20 min en la

estufa a 103 °C y por finalizar, nuevamente de 1 hora a 2 en un desecador para que a continuación se pudieran pesar en una balanza analítica y así tomar el peso 1. A continuación se vertieron los 25 mL muestra.

Una vez que las muestras se encontraban en su respectiva cápsula, éstas se introdujeron a la estufa durante toda la noche a 103 °C, asegurando así, que el agua se haya evaporado por completo. A continuación, las cápsulas se pasaban a un desecador por uno 1 hora a 2, para posteriormente pesarlas en la balanza analítica y tomar el peso 2.

Finalmente se introdujeron en la mufla a 550 °C durante 30 min y después se pasaron a la estufa a 103 °C durante 15 a 20 min, posteriormente se llevaron al desecador por un tiempo de 1 hora a 2 y, por último, se tomó el peso 3 (Figura 2.3.1). Los cálculos para la determinación de ST, SV y SF se encuentra en el Anexo.



Figura 2.3.1. Determinación de sólidos.

2.3.1.2 Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs)

Debido a que las muestras presentan una cantidad significativa de sólidos suspendidos, se centrifugaron en una microcentrifuga a 10,500 rpm durante 30 minutos, en tubos Eppendorf de 2 mL.

Posteriormente se realizaron diluciones del sobrenadante obtenido de la centrifugación. Las diluciones dependieron de la turbiedad del sobrenadante que se apreciaba a simple vista, variando la disolución entre 1:10 a 1:100.

Una vez que se realizaron las disoluciones se tomó una alícuota de 2.5 mL de cada una, como también de agua para realizar el blanco y se vertió respectivamente en un tubo Hach previamente etiquetado. Una vez que todos los tubos contenían su respectiva muestra, se le adicionó a cada uno 1.5 mL de solución digestora, dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), al finalizar la adición se prosiguió a verter 3.5 mL de solución catalizadora a cada uno de los tubos, dicha solución contiene ácido sulfúrico (H_2SO_4) con sulfato de plata (Ag_2SO_4) (Figura 2.3.2).



Figura 2.3.2. Adición de solución catalizadora.

Se cerraron bien los tubos y se agitaron suavemente de un lado a otro; a continuación, se introdujeron los tubos en el digestor HACH, el cual ya se encontraba a una temperatura de 150 °C. Al pasar dos horas, se extrajeron del digestor y se dejaron enfriar para posteriormente leer su concentración (mgDQO/L) en el espectrofotómetro HACH a una longitud de onda de 610 nm.

2.3.1.3 pH, alcalinidad y relación alfa

En primer lugar, se montó el sistema para titulación, el cual consta de una parrilla de agitación, un agitador magnético, un soporte con pinzas para sostener una bureta de 50 mL, la cual contiene H_2SO_4 , a una concentración de 0.2 N.

Se tomaron 25 mL de muestra los cuales se vertieron en un vaso de precipitados y se introdujo el agitador magnético, posteriormente se colocó el vaso en la parrilla de agitación.

Se midió el valor inicial de pH de la muestra con ayuda de un potenciómetro. Posteriormente se da inicio a la agitación para empezar a titular hasta llegar a un pH de 5.75, una vez anotado el valor del ácido consumido, se lleva la muestra a un pH de 4.3, finalmente se anota el ácido consumido.

La relación de los volúmenes al alcanzar los valores de pH deseados (5.75 y 4.3), da el valor de la relación alfa. Con el volumen del ácido consumido para llegar a un pH de 4.3, la normalidad de este y la cantidad de muestra utilizada se obtiene el valor de alcalinidad de la muestra: Para más detalle con respecto a los cálculos, consultar Anexo I.

2.3.1.4 Ácidos grasos Volátiles (AGVs)

Se tomaron 5 mL de muestra y se dividieron en dos tubos Eppendorf, a cada uno de los tubos se le agregó de dos gotas de ácido clorhídrico (HCl), dilución 1:1. A continuación, se prosiguió a centrifugar a 10,500 rpm por 30 min, debido a la alta cantidad de sólidos que contenía cada una de las muestras.

Al finalizar la centrifugación, se extrae 2 mL de sobrenadante, el cual se pasa por un filtro de nitrocelulosa con un tamaño de poro de 0.25 μm recibiendo la muestra en un vial previamente etiquetado.

Las muestras se guardaron y se conservaron en refrigeración a 4 °C para posteriormente inyectarlas en el cromatógrafo de gases "SRI" con una columna de sílice (Alltech EC-1000) y nitrógeno como gas acarreador y un tiempo de análisis de 5 min. La señal generada en el cromatógrafo se integraba con el software "Clarity", el cual calculaba la concentración de cada ácido, con base en un estándar previamente inyectado, que contenía concentraciones conocidas de los ácidos acético, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico y valérico.

2.3.1.5 Caracterización de producción de biogás (Cromatógrafo de gases)

Una vez montado el PBM, se tomaba una muestra de gas, extrayendo 0.5 mL de biogás con una jeringa pressure-lock (hermética), para posteriormente inyectar en el cromatógrafo de gases "FISHER gas partition model 1200" el cual tiene un

detector de conductividad térmica y una columna empacada con Porapak Q donde pasa el biogás acarreado por helio. El tiempo de análisis es de 1.5 min.

El software “Clarity” integra los datos para cada componente del biogás (nitrógeno, metano y dióxido de carbono), y entrega su fracción volumétrica con base en una curva de calibración previamente introducida al sistema (Figura 2.3.3).

La primera medición de biogás se empezaba 3 horas después de haber montado el PBM y se realizaba dos veces por día. Una vez que las mediciones empezaban a mostrar poco incremento en la producción de metano con cierta constancia entre los valores o disminución de la producción, la medición se realizaba una vez al día.

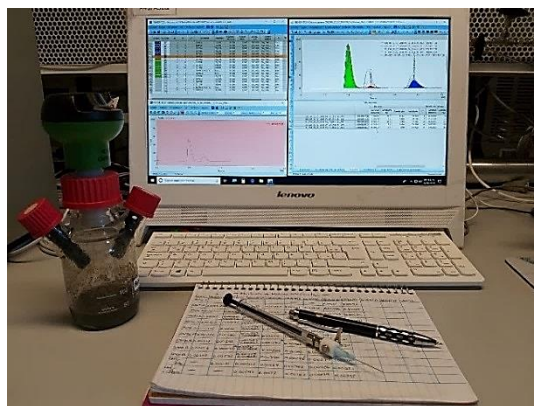


Figura 2.3.3. Medición de biogás.

2.3.2. Caída de pH del lactosuero

Debido al bajo pH del lactosuero se realizó una prueba previa para registrar la caída de pH en las condiciones de la prueba de PBM, partiendo de un lactosuero neutralizado.

Para dicha prueba se partió de un volumen de lactosuero (pH de 4.67), el cual se neutralizó con bicarbonato de sodio (NaHCO_3). Con este sustrato se realizaron dos ensayos preliminares con una relación $\text{gSV}_{\text{sustrato}}/\text{gSV}_{\text{inóculo}}$ de 0.5 pero diferente masa de ambos componentes. En la Tabla 2.3.1., se muestra la cantidad de gSV de lactosuero e inóculo por botella.

Tabla 2.3.1. Relación sustrato/inóculo para determinar la caída de pH en el lactosuero

Ensayo	1	2
S/X_0	0.5	0.5
(g SV _{sustrato} /g SV _{inóculo})	2 / 4	4 / 8

Los ensayos se realizaron en constante agitación y a una temperatura de 37 °C; se monitorearon por tres días midiendo el pH dos veces al día.

2.4. Potencial Bioquímico de Metano

2.4.1. Establecimiento de los PBM

Se realizaron cuatro series de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) utilizando estiércol y lactosuero como sustratos a diferentes proporciones en % de gSV. Como inóculo se usó lodo anaerobio procedente de un reactor anaerobio que trata las aguas residuales de una industria cervecera.

Las proporciones en % de gSV estiércol/lactosuero son las siguientes:

- 100/0
- 75/25
- 50/50
- 25/75
- 0/100

En cada serie se consideró un blanco y un control:

- Blanco. Inóculo/Agua
- Control. Inoculo/Ác. Acético/Agua

Cada ensayo tenía un duplicado (A y B) siendo así diez ensayos con un blanco y un control; en total cada PBM tenía de doce botellas.

Se fijó una relación $gSV_{\text{sustrato}}/gSV_{\text{inóculo}}$ de 0.5, para las cuatro series de PBM, variando la masa de compuestos (carga orgánica inicial) como se muestran en la Tabla 2.4.1.

Tabla 2.4.1. Carga orgánica de las cuatro series para la determinación del PBM.

Potencial Bioquímico de Metano				
Serie	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{ero}	4 ^{to}
S/X_0 (g SV_{sustrato}/g $SV_{\text{inóculo}}$)	0.5 0.25 / 0.5	0.5 0.5 / 1	0.5 0.75 / 1.5	0.5 1 / 2
Ensayos est/lac	Carga orgánica de sustrato (gSV) est/lac			
100/0	0.25 / 0	0.5 / 0	0.75 / 0	1 / 0
75/25	0.19 / 0.06	0.38 / 0.12	0.56 / 0.19	0.75 / 0.25
50/50	0.125 / 0.125	0.25 / 0.25	0.375 / 0.375	0.5 / 0.5
25/75	0.06 / 0.19	0.13 / 0.38	0.19 / 0.56	0.25 / 0.75
0/100	0 / 0.25	0 / 0.5	0 / 0.75	0 / 1

El desarrollo de esta tabla se realizó a través de los resultados de la concentración de SV del estiércol y lactosuero obtenidos después de su caracterización.

De igual forma se realizaron cálculos para la cantidad de estiércol, lactosuero, inóculo, agua y bicarbonato que se iban a usar para cada uno de sus ensayos de cada PBM. Los ensayos tuvieron una duración variable, de 22 a 80 días.

2.4.2. Condiciones de trabajo del PBM

Los ensayos se realizaron en botellas de vidrio de 250 mL tal como se muestra en la Figura 2.4.1., adecuados para la extracción de biogás mediante una jeringa.



Figura 2.4.1. Sistema del PBM.

Se manejó un volumen de trabajo de 40 mL de la mezcla de sustratos con inóculo y agua (si fuese requerida), con un volumen de espacio de cabeza de 210 mL como se muestra en la Figura 2.4.2.

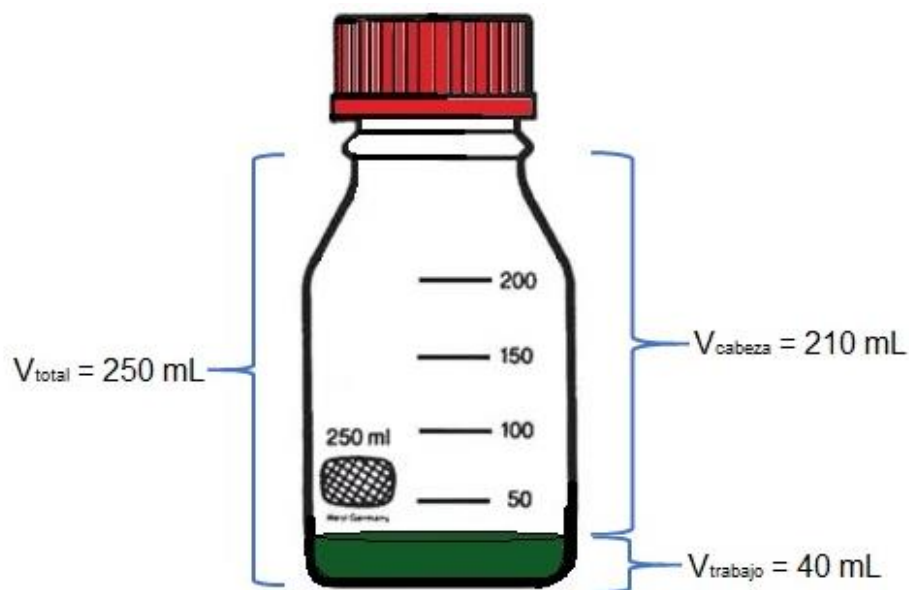


Figura 2.4.2. Volúmenes para el PBM en los ensayos.

Las botellas se encontraban en agitación constante, a una temperatura de 37 °C con una presión atmosférica de 0.771 atm (Ciudad de México) y una atmósfera anaerobia en el interior.

2.4.3. Montaje del PBM

En cada uno de los ensayos de los PBM se realizaron 4 duplicados, dos para correr la prueba del PBM y dos para la caracterizar las condiciones de inicio.

Se preparó una solución madre para cada uno de los ensayos que contenía lactosuero, la cual constaba de lactosuero, NaHCO_3 y agua (ver Anexo). Posteriormente se adicionó a su botella respectiva con el estiércol en la cantidad correspondiente previamente pesada (a excepción de los ensayos 100/0).

Cabe resaltar que el desarrollo de prueba se basó en los gSV de ambos sustratos. Sin embargo, para el trabajo experimental se partió de la relación $\text{gSV}_{\text{estiércol}}$ por $\text{g}_{\text{estiércol}}$ base húmeda. Esto fue necesario para poder manejar el estiércol en gramos base húmeda ($\text{g}_{\text{estiércol}}$).

Para la elaboración del blanco solo se le agregó el agua a utilizar en su botella respectiva. Mientras que para el control se realizó una solución madre, donde se

tomaron 100 mL de agua a la cual se le agregó el volumen de ácido acético (CH_3COOH) a usar (ver Anexo), neutralizada con NaHCO_3 . Una vez neutralizada la solución se tomó la cantidad requerida (ver Anexo) y se vertió en su respectiva botella.

Una vez que cada botella contuviera la porción requerida de sustrato, agua y NaHCO_3 se prosiguió a la adición de inóculo, el cual lleva al volumen de trabajo a 40 mL. Para ello se requirió de la cámara anaerobia para asegurar la ausencia de oxígeno en las botellas listas para iniciar las pruebas. Una vez que se terminó de agregar el inóculo, se prosiguió a cerrar las botellas y llevarlas al cuarto caliente, para ponerlas en agitación constante y a temperatura constante de $37\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2.4.3).



Figura 2.4.3. Sistema de PBM.

Al finalizar el PBM se prosigue a caracterizar los ensayos.

Capítulo 3.

Resultados y Análisis

3.1. Caracterización fisicoquímica de sustratos

En la tabla 3.1.1., se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos (estiércol bovino y lactosuero) de los dos muestreos que se realizaron en CEPIPISA.

Tabla 3.1.1. Caracterización fisicoquímica de sustratos

Sustrato	Estiércol		Lactosuero	
	1 ^{er} Muestreo	2 ^{do} Muestreo	1 ^{er} Muestreo	2 ^{do} Muestreo
pH	6.82	6.75	4.61	4.54
DQO _{soluble} (g/L)	15.31	13.14	73.98	64.45
Sólidos Totales (gST/L)	146.27	153.23	66.09	61.85
Sólidos Volátiles (gSV/L)	124.32	136.66	58.90	55.14
Sólidos Fijos (gSF/L)	21.95	16.57	7.19	6.71

Se muestra que el lactosuero cuenta con una concentración de DQO soluble prácticamente cuatro veces mayor que el estiércol bovino y una concentración de sólidos volátiles dos veces menor que el mismo. Es de señalar que el lactosuero es un residuo fundamentalmente líquido, en comparación con el estiércol que tiene una consistencia más sólida y es altamente heterogéneo. Esta característica conlleva a que el tratamiento experimental arroje valores poco confiables en la caracterización de la DQO total de la muestra. Por tal motivo, se utilizó la concentración de sólidos volátiles como parámetro de referencia en las pruebas de PBM.

El intervalo de pH para que se lleve a cabo la digestión anaerobia es entre 6.8 y 7.4, siendo ideal un pH 7. Debido al pH ácido que tiene el lactosuero es necesario que los ensayos se neutralicen para poder dar las condiciones a que se lleve a cabo la digestión anaerobia.

Por otra parte, Comino (2012), plantea que es posible realizar la digestión anaerobia a partir de la co-digestión estiércol/lactosuero, en una proporción 50/50 (% V/V), sin el uso de químicos que tengan efecto en el pH.

3.1.1. Caída de pH del lactosuero (ensayos 1 y 2)

Al inicio de las pruebas, ambos ensayos tenían un pH neutro, el cual se midió con un potenciometro; al pasar seis horas se les midió el pH, teniendo ambos un pH de 8. Al día siguiente el ensayo 1 (2 gSV_{sustrato} / 4 gSV_{inóculo}), tenía un pH de 4 y el ensayo 2 (4 gSV_{sustrato} / 8 gSV_{inóculo}) un pH de 5, al finalizar el día y a la mañana del día siguiente, ambos tenían un pH de 4. Se decidió neutralizar cada una de las botellas cuantificando la cantidad de NaHCO₃ requerida. Esta fue posteriormente utilizada para las pruebas de PBM con base en la siguiente relación:

$$1 \text{ gSV}_{\text{Lactosuero}} \text{ requiere } 0.5 \text{ g NaHCO}_3$$

3.2. 1^{er} Potencial Bioquímico de Metano

La primera serie de PBM fue la de menor concentración de las cuatro realizadas (0.25 gSV de sustrato y 0.5 gSV de inóculo) como se muestra en la Tabla 2.4.1. (pag. 33).

En la gráfica 3.2.1. se muestra la producción de metano bruta (L-N CH₄/kgSV_i), que se produjo a lo largo de 480 horas (20 días). Donde se muestra que el ensayo 25/75 es el que tiene la mejor producción al inicio del PBM (257 L-N CH₄/kgSV_i en 48 h) para después estabilizarse y terminar prácticamente a la par de los ensayos 100/0 y 75/25. El ensayo con mezcla 50/50 presentó caída a partir de la hora 144, por un problema de fuga, ya que en el ensayo no puede haber consumo de metano. Se puede también identificar que la tasa inicial más baja la presentó el ensayo 100/0, alcanzando sin embargo la mayor producción al término de la serie. Así mismo, se aprecia que el ensayo control y el blanco tardan de un día a dos en mostrar su producción de metano. Un cálculo con base en la estequiometría de la reacción,

indica que el control debió producir 374 L-CH₄/kg SV (conversión total del ácido acético a metano). Sin embargo, la producción experimental máxima fue de 115 L-CH₄/kg SV. Este resultado sugiere que, o bien el inóculo no era suficientemente activo, o que la carga de acético tuvo un efecto inhibitorio.

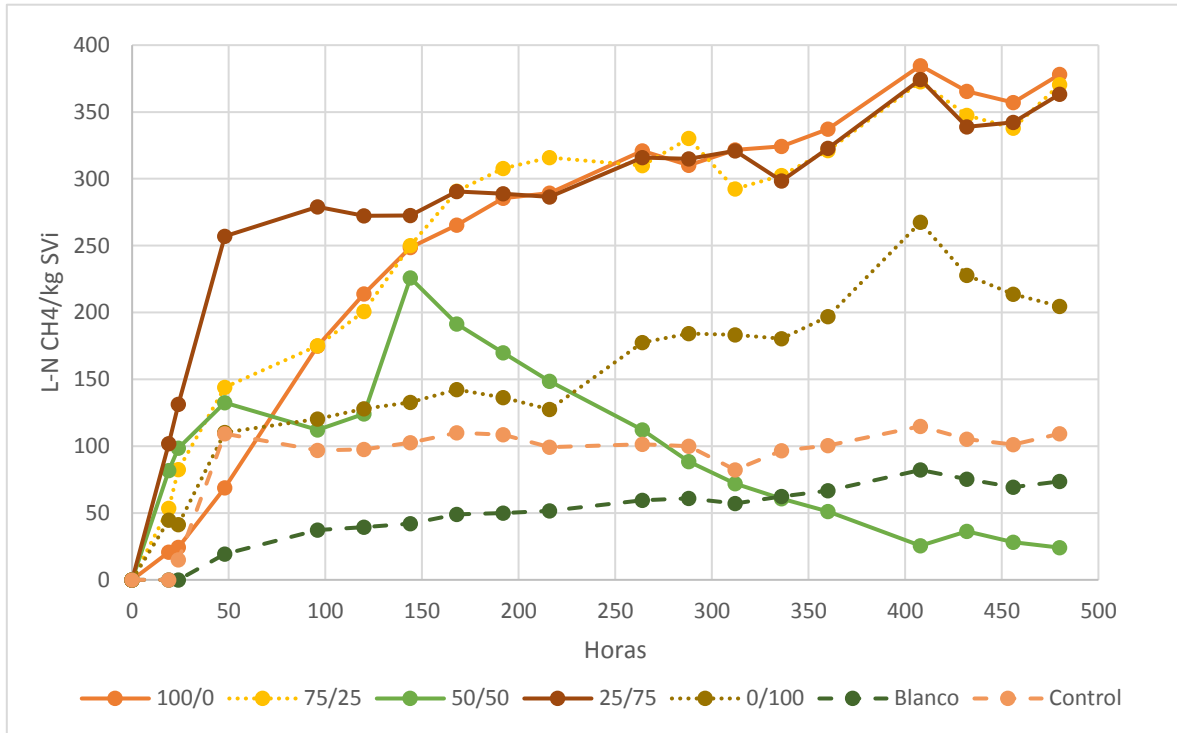


Figura 3.2.1. 1^{er} PBM. Gráfica de producción de metano

Nota: Los ensayos 75/25 y 0/100, representados con línea punteada, no se promediaron sus dos ensayos, debido a que uno presentó posibles fugas y a que el otro presenta una posible inhibición, respectivamente.

En la tabla 3.2.1., se presenta los gSV al inicio y al final del PBM, como también su remoción.

Tabla 3.2.1. 1^{er} PBM. Sólidos Volátiles

Ensayo est/lac	Sólidos Volátiles (gSV)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	0.173	0.132	24%
75/25	0.197	0.155	21%
50/50	0.178	0.108	39%
25/75	0.230	0.107	53%
0/100	0.109	0.035	68%
Blanco	0.212	0.157	26%

El valor deseado para cada botella al inicio del PBM es de 0.25 gSV. Sin embargo, en la realidad esto no se logró, como se muestra en la tabla 3.2.1, siendo el ensayo 25/75 el que se acerca más a lo esperado. Por otro lado, en promedio en cada botella se agregó 0.38 gSV de inóculo experimentalmente, siendo el deseado 0.5 gSV. En la tabla 3.2.2. se presentan la relación sustrato/inóculo real con las que se inició la serie 1 de BPM, con su respectivo % de error de desviación del valor deseado (0.5).

Tabla 3.2.2. 1^{er} PBM. Relación S/X₀ experimental

Ensayo est/lac	S/X ₀	% Error
100/0	0.45	-10%
75/25	0.51	+2%
50/50	0.46	-8%
25/75	0.60	+19%
0/100	0.27	-46%

Es apreciable que el ensayo 75/25 es el que tienen un menor % de error, mientras que el ensayo 0/100 es el de mayor % de error, teniendo una relación casi dos veces más baja de la esperada, lo cual pueda explicar que sea el ensayo con menor producción de metano. Por el contrario, el ensayo 25/75, tuvo una relación mayor a la esperada, a pesar de que fue el primero en producir mayor cantidad de metano, no fue el ensayo con mayor producción; esto podría deberse a que su comportamiento muestra una fuga a partir de las 48 horas que es donde se muestra un evidente descenso, teniendo una recuperación lenta.

En cuanto a los porcentajes de remoción de SV, el mayor valor fue el alcanzado en el ensayo 0/100 (68%) (Tabla 3.2.1), siendo la remoción más baja (21%) la del ensayo 75/25 (cercana a la alcanzada con sólo estiércol: 24%). Esto a pesar de presentar unos de los valores más altos de producción de metano. Es posible identificar que la remoción va aumentando conforme es mayor la proporción de lactosuero (a excepción del ensayo 75/25). Esto muestra las ventajas de la co-digestión de estos dos sustratos y que el estiércol, al contener fibra lignocelulósica, es más difícil de biodegradar que el lactosuero.

En la tabla 3.2.3. se presentan los valores de DQO soluble al inicio y al final de la serie 1 de PBM. Se muestra un aumento en la DQO soluble inicial conforme va aumentando la presencia del lactosuero, como era de esperarse, dada la característica líquida del lactosuero vs. la más sólida del estiércol. Sin embargo, el valor del ensayo 0/100 es muy bajo. Esto puede deberse a un error en la determinación de DQO soluble.

Tabla 3.2.3. 1^{er} PBM. DQO_{Soluble}

Ensayo est/lac	DQO _{Soluble} (gDQO/L)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	6.01	1.181	80%
75/25	26.60	2.695	90%
50/50	51.03	18.254	64%
25/75	82.82	4.925	94%
0/100	(3.76)	2.702	28%
Blanco	3.140	1.700	46%

El ensayo 25/75 muestra la mayor remoción, el cual se presume presentó fugas. Es posible que, al llegar a cierta presión, el sello falló provocando la fuga una de las dos botellas, lo que redujo el promedio de ambas.

Los ensayos 75/25 y 100/0 de igual forma tuvieron una buena remoción como la mayor producción de metano. En cuanto al ensayo 0/100, tuvo la remoción más baja, en parte debido a la baja carga orgánica que se le agregó. Sin embargo, cabe resaltar, que los valores obtenidos de la DQO soluble inicial están muy por arriba de los esperados. Como ejemplo, si se considera el ensayo 100/0 (100% estiércol), debería tener una DQO soluble inicial de aproximadamente de 0.711 g/L, partiendo de que la DQO soluble del estiércol crudo es de 14.22 g/L y la dilución para este ensayo es de una relación 1:20. Lo cual muestra un error general en la determinación de DQO soluble, para esta serie. Como se verá más adelante, la misma situación se presentó en el 2^o PBM.

A continuación, en la tabla 3.2.4 se presenta la alcalinidad, el pH y la relación alfa de cada uno de los ensayos al inicio y final de la serie 1 de PBM. Es notorio el aumento de alcalinidad inicial conforme va aumentando la cantidad de lactosuero,

debido a la adición de NaHCO_3 el cual se incrementa conforme el aumento de lactoseuro (ver sección 3.1.1). Los ensayos 100/0, 75/25 y 50/50 al inicio de la prueba tienen una alcalinidad baja, pero se recupera a lo largo del PBM.

Tabla 3.2.4. 1^{er} PBM. Alcalinidad, pH y relación α

Ensayo est/lac	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)		pH		α	
	Iniciales	Finales	Iniciales	Finales	Inicial	Final
100/0	200	2480	8.04	7.97	0.60	0.61
75/25	120	2260	6.96	7.98	0.67	0.71
50/50	400	1780	8.19	7.73	0.75	0.41
25/75	960	2820	8.23	7.97	0.75	0.77
0/100	1200	3040	7.94	8.25	0.75	0.78
Blanco	980	4600	8.01	8.48	0.80	0.66

El intervalo óptimo de pH se encuentra entre el 6.8 y 7.4. Con esta base, se puede decir que el ensayo 75/25 fue el único con un pH adecuado para efectuar la digestión anaerobia. Sin embargo, este proceso se puede realizar fuera de este intervalo óptimo, particularmente cuando se alcanzan valores más básicos (8.0). Es entonces posible que se hayan presentado condiciones de inhibición por pH alto en los ensayos 0/100 y el blanco.

El ensayo 50/50 presenta una relación alfa al final del PBM por debajo del 0.5 lo cual indica que se presentó una acumulación de AGVs, a diferencia del resto de los ensayos. Al parecer, en este ensayo hubo limitaciones para que los microorganismos transformaran los AGV a metano. Esto se manifiesta en la figura 3.2.1 en los datos experimentales hasta el tiempo 144 h, por debajo de las demás mezclas.

En la figura 3.2.2., se presentan la cantidad de AGVs en parte por millón (mg/L) donde únicamente se reportan los AGV's de los ensayos 100/0 y 0/100, debido a que los resultados del resto de los ensayos no son confiables.

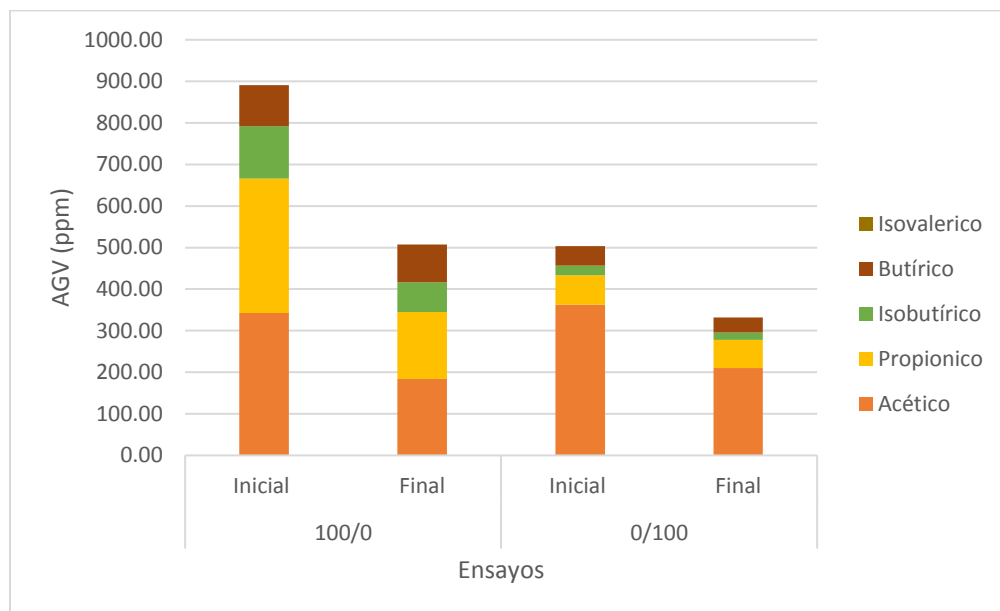


Figura 3.2.2. 1^{er} PBM. AGVs

A continuación, la tabla 3.2.5., presenta la producción teórica (mínima y máxima) de metano esperada contra la producción máxima experimental (ver Anexo). Estos datos se basan en la producción neta debida al sustrato, excluyendo la endógena, es decir que se les restó la producción del blanco. En dicha tabla se muestra que los ensayos no alcanzan la cantidad mínima esperada. El ensayo con mayor producción experimental fue el 100/0, seguido del 75/25 y a continuación el 25/75. Esta última mezcla, en una evaluación teórica, presentaría la mayor producción cuando se aborda una co-digestión: Sin embargo, como se mencionó, este ensayo pudo presentar fugas a lo largo del PBM.

Tabla 3.2.5. 1^{er} PBM. Comparativa de producción de CH₄ entre esperada (teórica) y experimental

Ensayo est/lac	1 ^{er} PMB (L-N CH ₄ /kg SV _i) neto			
	Relación	Mín. CH ₄ Teo	Máx. CH ₄ Exp	Máx. CH ₄ Teo
100/0	0.45	330	296	550
75/25	0.51	335	282	625
50/50	0.46	340	136	700
25/75	0.60	345	280	775
0/100	0.27	350	153	850

3.3. 2^{do} Potencial Bioquímico de Metano

Para esta segunda prueba de PBM a cada ensayo se le agregó 0.5 gSV de sustrato y 1 gSV de inóculo, con una duración de 492 horas (20 días y medio). En la figura 3.3.1. se presenta la producción de metano “bruta”, en la cual se muestra que el ensayo con mejor producción de metano al iniciar el PBM es el 75/25, seguido por el 50/50. Los ensayos 100/0, 25/75 y 0/100 presentan un letargo, teniendo una producción por debajo del control. A partir de la hora 63, el ensayo 25/75 rebasa la producción de metano del control, y a partir de 108 horas empieza a presentar la máxima producción de esta segunda serie de PBM. Por su parte, el ensayo 0/100, después de una prolongada fase de latencia, a las 260 horas supera la producción del control, hasta alcanzar la máxima producción de los ensayos 25/75 y 50/50 al final de la prueba, siendo los ensayos con mayor producción el ensayo 25/75 y el 0/100.

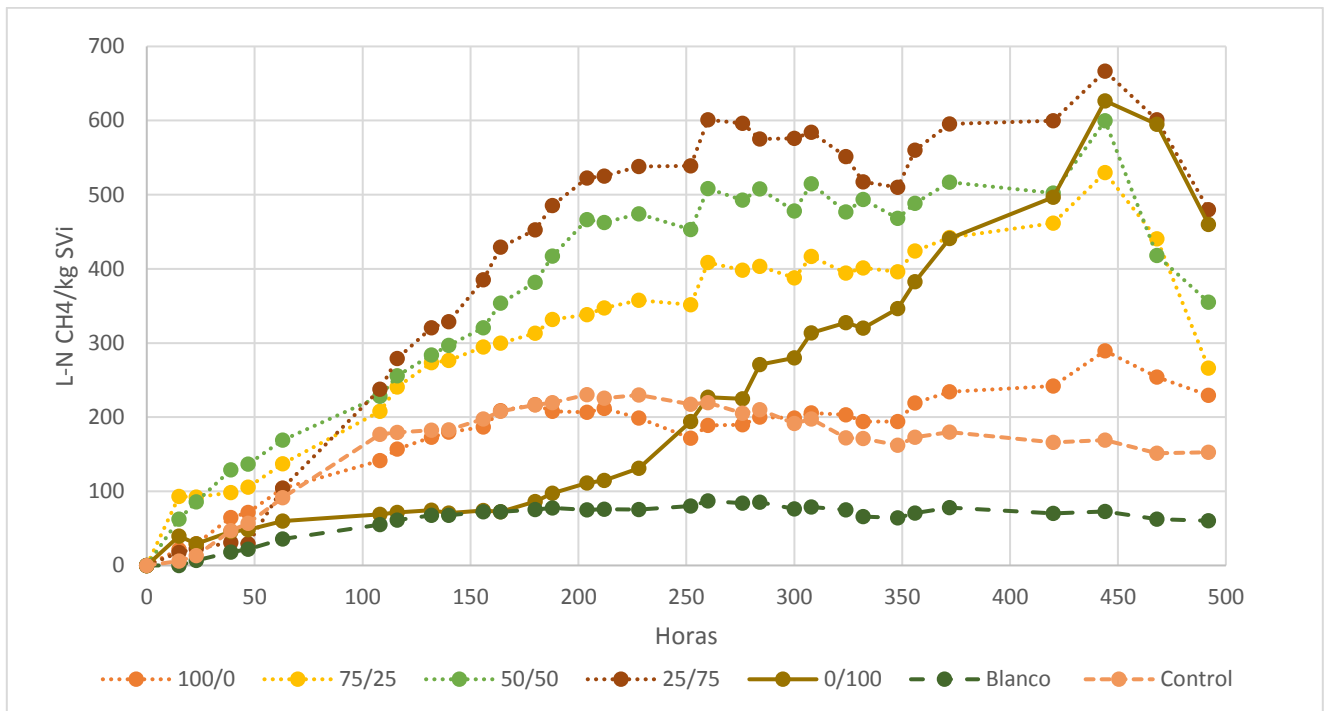


Figura 3.3.1 .2^{do} PBM. Gráfica de producción de metano

Nota: Se promediaron ambas botellas para el ensayo 0/100 (línea continua). Para los demás, se consideró únicamente la botella con mayor producción de biogás (líneas punteadas).

Se presenta en la tabla 3.3.1. los gSV iniciales y finales de la segunda prueba de PBM para cada ensayo, recordando que la cantidad de sustrato esperada al inicio es 0.5 gSV. Los ensayos que más se acercan a dicho valor son el ensayo 100/0 y el blanco. Esta desviación del valor esperado (0.5 gSV) se debió a la falta de exactitud en el desarrollo experimental. Esta imprecisión también se presentó al momento de agregar el inóculo, que debió haber sido 1 gSV para esta serie de PBM; sin embargo, a cada botella se le agregó 0.59 gSV de inóculo.

Tabla 3.3.1. 2^{do} PBM. Sólidos Volátiles

Ensayo est/lac	Sólidos Volátiles (gSV)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	0.453	0.140	69%
75/25	0.429	0.140	67%
50/50	0.370	0.107	71%
25/75	0.381	0.041	89%
0/100	0.345	0.035	90%
Blanco	0.461	0.272	41%

En la tabla 3.3.2., se presenta la relación sustrato/inóculo que se agregó experimentalmente y su % de error con respecto al esperado ($S/X_0=0.5$).

Tabla 3.3.2. 2^{do} PBM. Relación S/X_0 experimental

Ensayo	S/X_0	% Error
100/0	0.76	+53%
75/25	0.72	+45%
50/50	0.62	+25%
25/75	0.64	+29%
0/100	0.58	+16%

Se muestra que todos los ensayos presentan entre un 16% y 53% de error, siendo en todos los casos una relación mayor a la esperada. El ensayo 100/0 es el que presenta la relación más alta, lo que implica una sobrecarga, lo que pudo haber inhibido la prueba y con ello alcanzado remociones más bajas y la consecuente producción de metano baja.

La remoción de gSV (tabla 3.3.1) presenta un aumento conforme aumenta la proporción de lactosuero y a diferencia del primer PBM, este tiene remociones mayores a 60% a excepción del blanco, el cual tuvo casi la misma producción de metano que el blanco del primer PBM. La remoción alcanzada por la prueba 100/0 es alta en relación con la producción de metano registrada. Las mejores remociones las tienen los ensayos 25/75 y 0/100, como así mismo tienen las mayores producciones de metano.

En la tabla 3.3.3, se muestra el resultado para la DQO soluble al inicio y al final del PBM, así como la remoción. Al inicio del PBM la DQO soluble aumentó conforme la proporción de lactosuero, sin embargo, el ensayo 50/50, contiene mayor concentración de DQO de la que debería, posiblemente por un error en la determinación.

Tabla 3.3.3. 2^{do} PBM. DQO_{Soluble}

Ensayo est/lac	DQO _{Soluble} (gDQO/L)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	3.03	2.25	26%
75/25	6.78	2.11	69%
50/50	12.18	1.47	88%
25/75	9.06	1.93	79%
0/100	9.26	4.55	51%
Blanco	2.15	1.08	50%

El ensayo 100/0 presenta una baja remoción, lo cual podría deberse a la sobrecarga de materia orgánica que contenía, como ya fue mencionado. La remoción de la DQO aumentó conforme aumentó la cantidad de lactosuero en los ensayos. Sin embargo, el ensayo 0/100 presenta una remoción baja en comparación a los ensayos 75/25, 50/50 y 25/75, la cual se podría deber a algún error experimental, debido a que dicho ensayo no sólo es uno de los que tuvo una buena producción de biogás, sino que también tuvo una buena remoción de SV. Así mismo, como fue mencionado en la sección de la Tabla 3.2.3, la determinación de DQO soluble inicial y en general para todos los ensayos, presenta valores mayores a los esperados, siendo el valor

esperado del ensayo 100/0 de 1.42 g/L, partiendo de que la dilución correspondiente fue de 1:10.

En la tabla 3.3.4., se muestra que el ensayo 50/50 presenta una baja alcalinidad y una relación alfa por debajo de 0.5, indicando que la proporción entre los bicarbonatos y los AGVs favorece a estos últimos, lo cual podría ser a una mayor proporción de lactosuero en dicho ensayo, justificando la DQO mayor a la esperada y la baja alcalinidad debido a una menor cantidad de NaHCO_3 adicionado al inicio. Sin embargo, esto no afectó la producción de metano, teniendo al término un buen pH y una recuperación en alcalinidad y relación alfa.

Tabla 3.3.4. 2^{do} PBM. Alcalinidad, pH y relación α (* ver texto)

Ensayo est/lac	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)		pH		α	
	Iniciales	Finales	Iniciales	Finales	Inicial	Final
100/0	960	1020	7.44	7.66	0.42	0.47
75/25	560	2920	6.9	7.57	0.57	0.90
50/50*	480	3480	6.46	7.67	0.25	0.56
25/75	1800	3880	7.06	7.92	0.69	0.90
0/100	2200	3960	7.24	8.12	0.75	0.76
Blanco	840	3520	8.21	8.38	0.71	0.75

En la figura 3.3.2., se muestra la cantidad de AGVs antes y después del PBM, donde se muestra únicamente los ensayos 25/75 y 0/100, debido a que los valores de los demás ensayos no son confiables.

Ambos ensayos presentaron un retraso en la producción de metano, particularmente el 0/100, y valores apropiados de alcalinidad, pH y relación alfa, indicando que los AGVs fueron consumidos en una buena proporción.

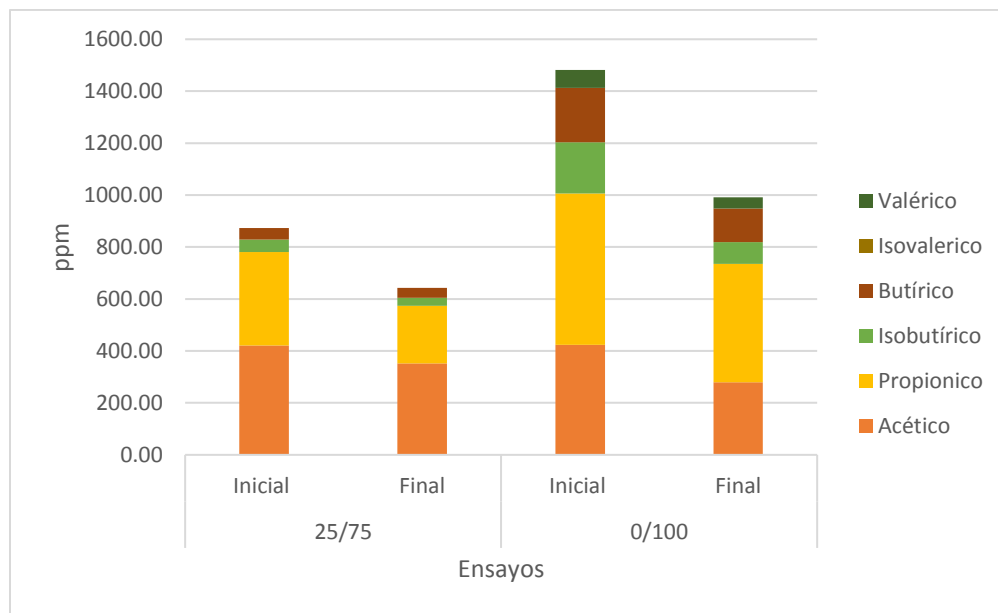


Figura 3.3.2. 2^{do} PBM. AGVs

En la tabla 3.3.5., se muestra que todos los ensayos a excepción del ensayo 100/0 se encuentran dentro del rango de producción de metano esperado (teórico), siendo la mejor producción la del ensayo 25/72 (545 L-N CH₄/kg SV_i). El ensayo 100/0 se encuentra por debajo de lo mínimo esperado, posiblemente debido a la sobrecarga orgánica que se contenía. Como se mencionó, a pesar de que la cantidad en gSV de sustrato agregado era muy cercana a la esperada, la cantidad de inóculo fue menor, casi la mitad (0.59 gSV) de lo esperado (1 gSV).

Tabla 3.3.5. 2^{do} PBM. Comparativa de producción de CH₄ entre esperada y experimental

Ensayo est/lac	2 ^{do} PBM (L-N CH ₄ /kg SV _i) neto			
	Relación	Mín. CH ₄ Teo	Máx. CH ₄ Exp	Máx. CH ₄ Teo
100/0	0.76	330	187	550
75/25	0.72	335	398	625
50/50	0.62	340	454	700
25/75	0.64	345	545	775
0/100	0.58	350	504	850

3.4. 3^{er} Potencial Bioquímico de Metano

El tercer PBM consistió en 0.75 gSV de sustrato y 1.5 gSV de inóculo, como se muestra en la figura 3.4.1. El monitoreo se llevó a cabo durante 1289 horas (53 días y medio) para todos los ensayos excepto 100/0 el cual se monitoreo hasta las 1457 horas (60 días y medio), debido a que presentó una limitada, pero constante producción de metano, cuando todos los demás mostraban una disminución. La prueba duró hasta tres veces más que el 1^{er} y 2^{do} PBM, lo cual se debió a que los ensayos 100/0, 50/50, 25/75 y 0/100 empezaron a tener una mayor producción de metano a partir de las 449 horas (18 días y medio), por lo que se decidió continuar con el PBM.

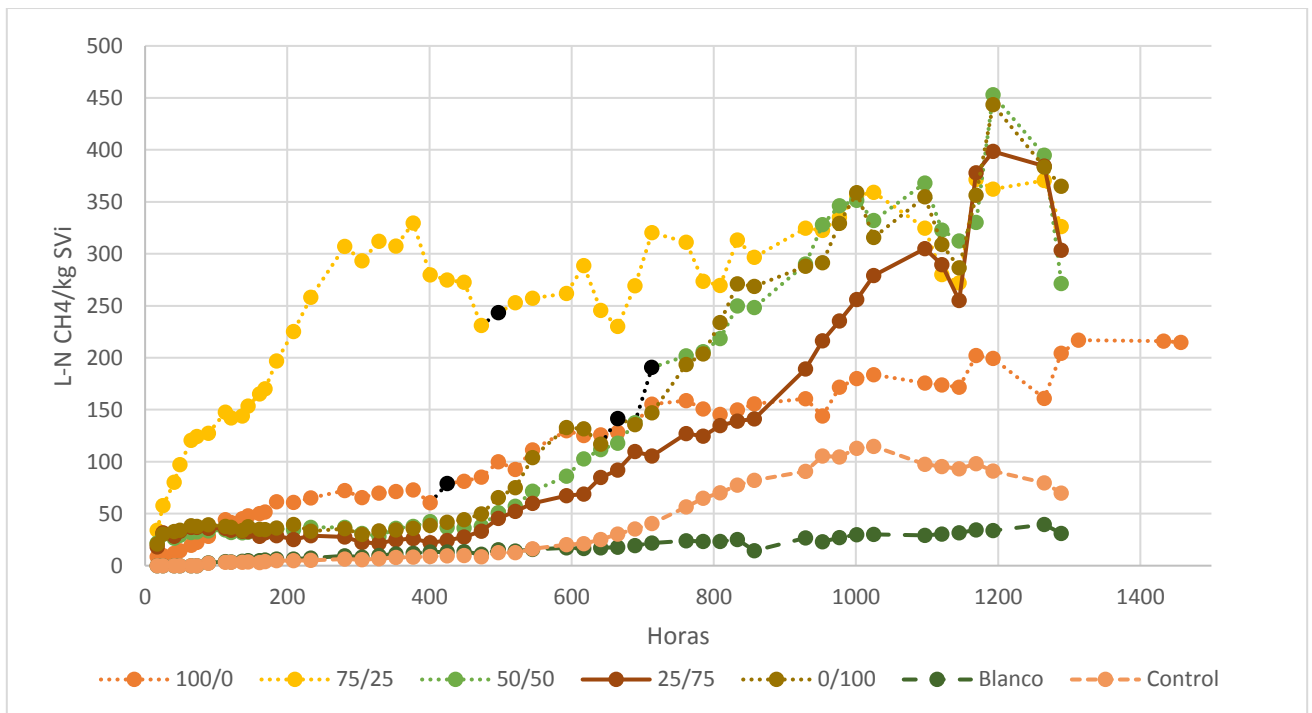


Figura 3.4.1. 3^{er} PBM. Gráfica de producción de metano

Nota: Para los ensayos 100/0, 75/25, 50/50 y 0/100, se promediaron sus duplicados hasta que se presentó una notable diferencia (punto negro), a partir de ese punto se utilizó la botella con mayor producción (línea punteada), para el ensayo 25/75 se promediaron sus duplicados (línea continua).

El ensayo 75/25 fue el primero que inició la producción de metano, teniendo un comportamiento irregular a partir de las 473 horas, siendo el ensayo con mejor producción por 929 horas. Los ensayos 50/50, 25/75 y 0/100 logran recuperarse de

su letargo de casi 500 horas, teniendo producciones mayores a 371.56 L-N CH₄/kg SV_i que es el pico más alto del ensayo 75/25.

En la tabla 3.4.1. se muestra los gSV al inicio y final del PBM, así como su remoción.

Tabla 3.4.1.3^{er} PBM. Sólidos Volátiles

Ensayo est/lac	Sólidos Volátiles (gSV)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	0.729	0.198	73%
75/25	0.756	0.172	77%
50/50	0.795	0.150	81%
25/75	0.733	0.136	81%
0/100	0.826	0.159	81%
Blanco	1.441	0.305	79%

El valor deseado de sustrato para cada botella es de 0.75 gSV, siendo el valor que más se aleja el del ensayo 0/100, el cual tiene una carga orgánica ligeramente mayor a la esperada. En promedio a cada botella se le agrego 1.44 gSV, de inóculo, siendo el ideal 1.5 gSV. Es claro que en esta serie de PBM se tuvo un mejor control en la adición tanto del sustrato como del inóculo. En la tabla 3.4.2., se presenta la relación sustrato/inóculo experimental con su respectivo % de error, el cual muestra que la relación experimental no esta tan alejada de la relación esperada, a excepción del ensayo 50/50 y 0/100, estando sus cargas orgánicas por arriba de lo esperado.

Tabla 3.4.2. 3^{er} PBM. Relación S/X₀ experimental

Ensayo est/lac	S/X ₀	% Error
100/0	0.53	+5%
75/25	0.52	+5%
50/50	0.55	+10%
25/75	0.51	+2%
0/100	0.57	+15%

Las mejores remociones (tabla 3.4.1.) las obtuvieron los ensayos 50/50, 25/75 y 0/100 (81%), los cuales tuvieron los mejores valores de producción de metano. Muy cercana quedó la remoción en el ensayo 75/25, con un valor de 77%.

En la tabla 3.4.3., se muestran los valores de DQO soluble, al inicio y final del PBM, como así mismo su remoción. Al inicio del PBM se muestra un aumento en la concentración de DQO conforme al aumento de lactosuero. De esta misma forma, la remoción depende de la proporción del lactosuero, que va aumentando conforme aumenta la cantidad de este. A pesar de que el blanco tiene una remoción mayor al 50% tanto en SV, como en $DQO_{soluble}$, presenta una producción de metano, por debajo de los 50 L-N $CH_4/kgSV_i$, siendo la más baja en comparación del 1^{er} y 2^{do} PBM.

Tabla 3.4.3. 3^{er} PBM. $DQO_{Soluble}$

Ensayo est/lac	DQO_{Total} (gDQO/L)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	3.24	1.35	58%
75/25	7.87	2.46	69%
50/50	11.63	2.94	75%
25/75	35.52	2.77	92%
0/100	41.22	5.00	88%
Blanco	2.83	0.89	69%

En la tabla 3.4.4. se muestra la alcalinidad, el pH y la relación alfa, al inicio y al final del PBM, donde se muestra que el ensayo 100/0 es el que presenta valores más bajos de estos tres parámetros, en comparación con los demás ensayos. En particular, es de considerar la relación alfa, la cual se encuentra muy por debajo de 0.5, lo que refleja que la alcalinidad no fue del todo suficiente en la etapa inicial de este ensayo. Sin embargo, al final de la prueba alcanzó valores adecuados de estos tres parámetros.

Tabla 3.4.4. 3^{er} PBM. Alcalinidad, pH y relación α

Ensayo est/lac	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)		pH		α	
	Iniciales	Finales	Iniciales	Finales	Inicial	Final
100/0	620	2960	6.68	7.26	0.27	0.69
75/25	1080	3340	7.26	7.49	0.81	0.80
50/50	2440	3980	7.26	7.72	0.84	0.81
25/75	2900	4720	7.3	7.60	0.78	0.84
0/100	3400	5200	7.21	7.79	0.79	0.80
Blanco	838	3320	7.81	8.04	0.51	0.67

Es posible notar que los ensayos 50/50, 25/75 y 0/100 presentaron un retraso en el inicio de la producción de metano y también una mayor alcalinidad.

En la figura 3.4.2. se presentan los AGVs antes y después del PBM, a excepción del blanco, debido a que sus valores no fueron confiables. Todos los ensayos a excepción del control contienen ácido acético, isobutírico y butírico.

El ensayo que tiene mejor remoción de AGVs es el ensayo 50/50 (88%), seguido del 75/25 (61%) y por último el ensayo 25/75 (61%). Los AGVs que presenta este 3^{er} PBM son similares al del 1^{er} PBM, siendo mayor los valores de AGVs del 2^{do} PBM.

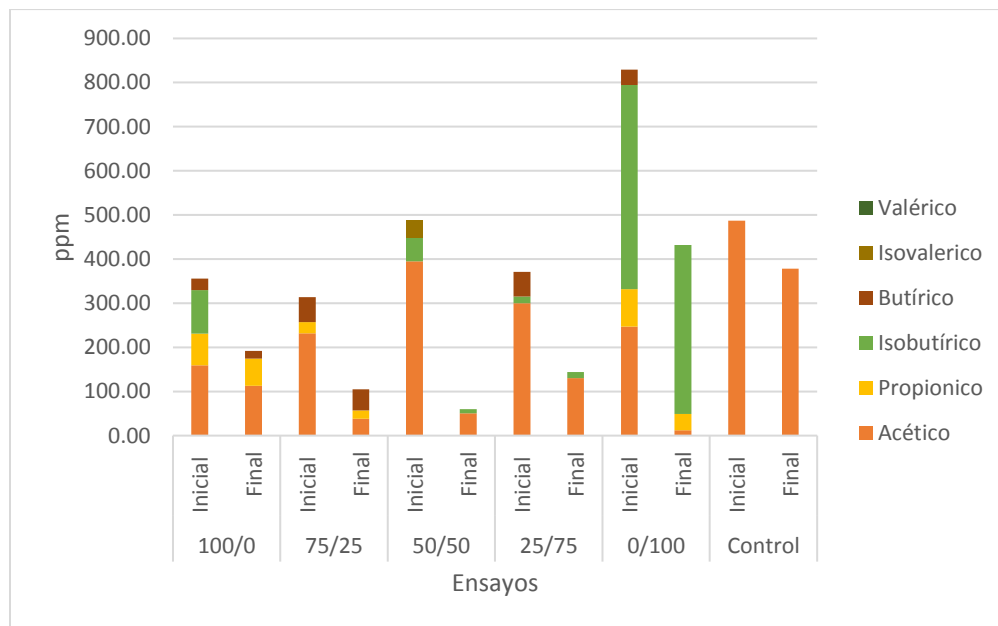


Figura 3.4.2. 3^{er} PBM. AGVs

En la tabla 3.4.5. se muestra que la máxima producción neta la obtuvo el ensayo 25/75, siendo el único que se encontró en el intervalo de producción de metano teórico; el resto se ubicó por debajo de lo esperado.

Tabla 3.4.5. 3^{er} PBM. Comparativa de producción de CH₄ entre esperada y experimental

Ensayo est/lac	3 ^{er} PBM (L-N CH ₄ /kg SV _i) neto			
	Relación	Mín. CH ₄ Teo	Máx. CH ₄ Exp	Máx. CH ₄ Teo
100/0	0.53	330	169	550
75/25	0.52	335	332	625
50/50	0.55	340	321	700
25/75	0.51	345	351	775
0/100	0.57	350	332	850

3.5. 4^{to} Potencial Bioquímico de Metano

Para este último PBM, siendo el más concentrado, se le agrego 1 gSV de sustrato y 2 gSV de inóculo, el cual fue monitoreado por 1985 horas (82 días y medio), debido que a las 497 horas (20 días y medio) se seguían mostrando producción de metano y a partir de las 785 horas (32 días y medio) los ensayos 25/75 y 0/100 empezaron a incrementar su producción de metano (figura 3.5.1.).

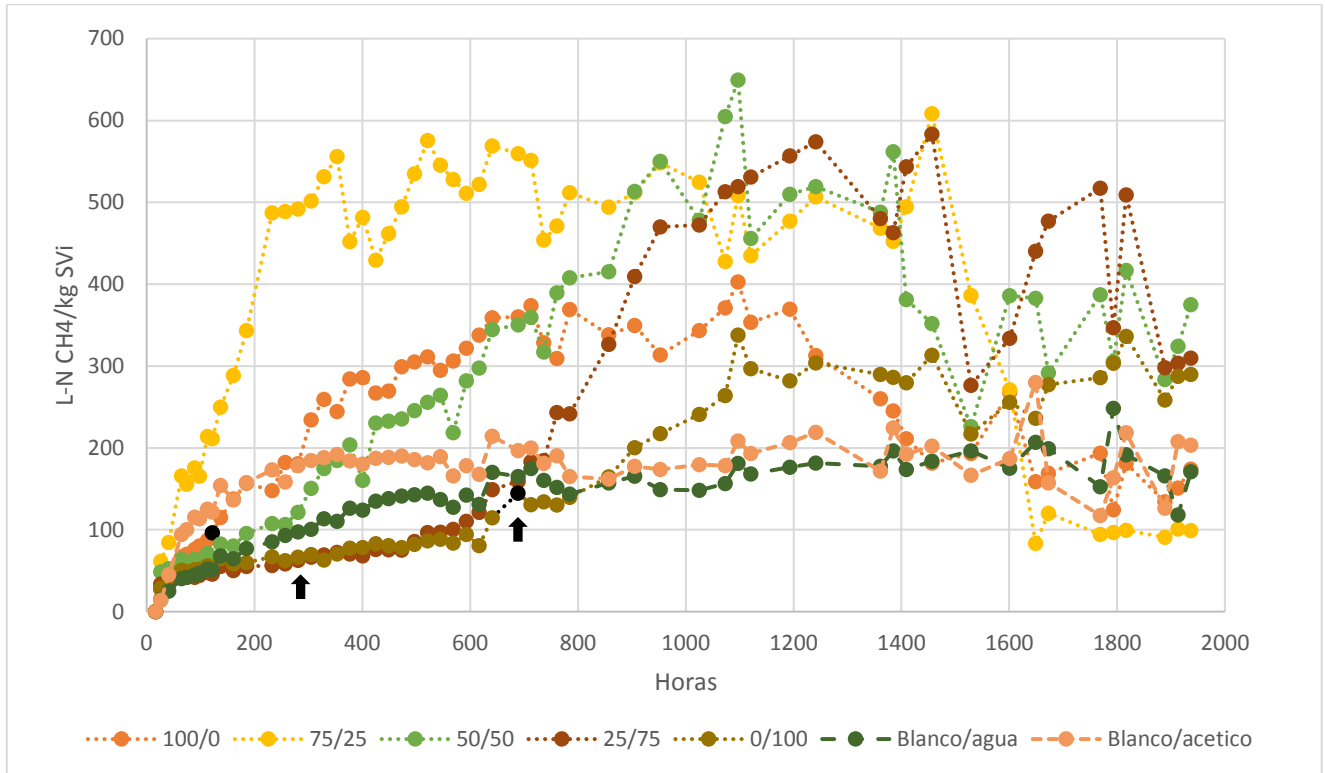


Figura 3.5.1. 4^{to} PBM. Gráfica de producción de metano

Nota: Para los ensayos 100/0, 25/75 y 0/100, se promediaron sus duplicados hasta que se presentó una notable diferencia (punto negro y/o flecha), a partir de ese punto se utilizó la botella con mayor producción (línea punteada). Para los ensayos 75/25 y 50/50 se tomó el duplicado con mejor producción (línea punteada).

En la figura 3.5.1., se muestra que el ensayo 75/25 es el ensayo con mejor producción de metano al iniciar el PBM, seguido por el control.

El ensayo 100/0 empieza a tener una mejor producción de metano rebasando el control a las 281 horas, mientras que el ensayo 50/50, lo rebasa a las 377 horas. Los ensayos 25/75 y 0/100 presentaron una prolongada fase de latencia, del orden de 600 horas, siendo la primera la que mostró un claro incremento en la tasa de

producción de metano, ya que superó el volumen producido por las mezclas con mejor comportamiento en el día 1121. Por su parte, el ensayo 0/100 el último en rebasar tanto al control como al blanco a las 857 horas, manteniendo una limitada tasa de producción de metano a lo largo del experimento. El control y el blanco presentan un comportamiento similar a partir de la hora 593.

En la tabla 3.5.1., se muestran los gSV al inicio y al final del PBM, como así mismo su remoción, donde se observa que todos los ensayos tiene una remoción limitada, siendo la mezcla 75/25 la que alcanzó el mayor valor (62%), lo cual explica que la producción de metano de este ensayo es similar a la del 2^{do} PBM, ya que no se degradó toda la materia orgánica disponible.

Tabla 3.5.1. 4^{to} PBM. Sólidos Volátiles

Ensayo est/lac	Sólidos Volátiles (gSV)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	1.306	0.610	53%
75/25	1.010	0.386	62%
50/50	0.990	0.419	58%
25/75	0.934	0.422	55%
0/100	0.859	0.448	48%
Blanco	1.660	0.859	48%

El valor deseado para cada ensayo al inicio del PBM es de 1 gSV siendo los ensayos 75/25 y 50/50 los que más se acercan. En cuanto al inóculo, en promedio a cada ensayo se le agregó 1.66 gSV, siendo el deseado 2 gSV. En la tabla 3.5.2., se muestra la relación experimental con su respectivo % de error. Mostrando que el % de error va disminuyendo conforme aumenta la cantidad de lactosuero.

Tabla 3.5.2. 4^{to} PBM. Relación S/X₀ experimental

Ensayo est/lac	S/X ₀	% Error
100/0	0.79	+57%
75/25	0.61	+22%
50/50	0.60	+19%
25/75	0.56	+12%
0/100	0.52	+3%

En la tabla 3.5.3., se presenta la DQO soluble al inicio y final del PBM, como así mismo su remoción. La DQO aumenta tanto al inicio como al final del PBM conforme va aumentando el lactosuero. Sin embargo, la remoción no presenta el mismo comportamiento, la mayor remoción la tiene el ensayo 75/25, seguido de 50/50 y finalmente el ensayo 25/75, siendo estos los ensayos con una remoción mayor al 50%, como así mismo son los que tiene una buena producción de metano, como lo muestra la figura 3.5.1.

Tabla 3.5.3. 4^{to} PBM. DQO_{Soluble}

Ensayo est/lac	DQO _{Soluble} (gDQO/L)		
	Iniciales	Finales	Remoción
100/0	6.26	4.52	28%
75/25	27.69	8.55	69%
50/50	44.86	15.53	65%
25/75	55.87	20.91	63%
0/100	63.22	30.15	52%
Blanco	5.91	3.11	47%

En la tabla 3.5.4., se muestra la alcalinidad, el pH y la relación alfa. Al inicio se presentan bajos valores para los ensayos 25/75 y 0/100, los cuales se recuperan plenamente conforme el desarrollo del PBM.

Tabla 3.5.4. 4^{to} PBM. Alcalinidad, pH y relación α

Ensayo est/lac	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)		pH		α	
	Iniciales	Finales	Iniciales	Finales	Inicial	Final
100/0	1600	4680	7.75	7.66	0.50	0.85
75/25	2760	4920	7.26	8.04	0.71	0.81
50/50	2040	4840	7.46	7.53	0.85	0.84
25/75	2298	4740	6.85	7.57	0.47	0.85
0/100	2565	4800	6.74	7.27	0.42	0.72
Blanco	4860	5200	7.84	7.91	0.63	0.81

En la figura 3.5.2., se presentan los valores de AGVs contenidos en las muestras antes y después del PBM, a excepción del blanco y el control, debido a que sus valores, no fueron confiables.

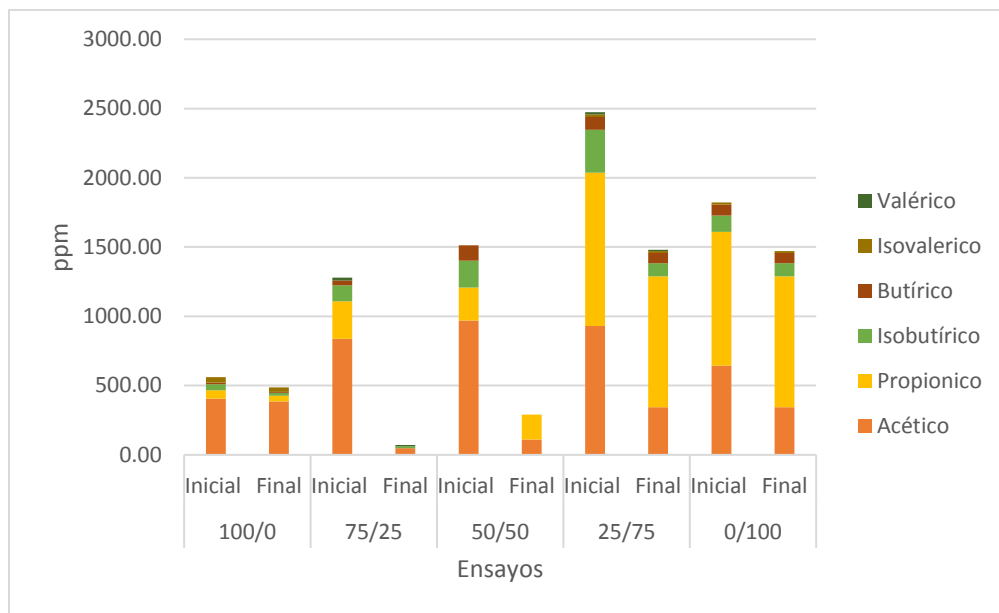


Figura 3.5.2. 4^{to} PBM. AGVs

Los ensayos 25/75 y 0/100 son los que presentan mayores valores de AGV al inicio y al final de la prueba. Destaca en ambos ensayos la alta concentración de propiónico (965 – 1107 ppm), lo cual pudo haber afectado la producción de metano ocasionando un retraso, en particular para la mezcla 0/100. El valor de la relación alfa para el ensayo 0/100 al final es alto, aunque el menor de la serie, lo que corrobora lo mostrado en la figura 3.5.2. Por el contrario, las mejores remociones de AGVs, las presentan los ensayos 75/25 y 50/50, los cuales presentaron un comportamiento de la producción de metano más estable.

En la tabla 3.5.5. se muestra la producción mínima y máxima esperada (teórica) contra la producción máxima experimental. En dicha tabla se muestra que los ensayos 100/0 y 0/100 se encuentran por debajo de lo esperado, lo cual podría deberse a la sobrecarga que presenta el ensayo 100/0 y a la aparente alta alcalinidad (en comparación con los demás ensayos) del ensayo 0/100. Los ensayos 75/25, 50/50 y 25/75 se encuentran dentro del intervalo. La mayor producción la alcanzó el ensayo 75/25, seguida del ensayo 25/72. La misma tendencia se obtuvo en el 1^{er} PBM, considerando únicamente las mezclas de co-digestión.

Tabla 3.5.5. 4^o PBM. Comparativa de producción de CH₄ entre esperada y experimental

Ensayo est/lac	4 ^o PBM (L-N CH ₄ /kg SV _i) neto			
	Relación	Mín. CH ₄ Teo	Máx. CH ₄ Exp	Máx. CH ₄ Teo
100/0	0.79	330	207	550
75/25	0.61	335	392	625
50/50	0.60	340	357	700
25/75	0.56	345	387	775
0/100	0.52	350	138	850

3.6. Comparación de los Potenciales Bioquímicos de Metano

En la figura 3.6.1., se muestra la producción de metano de los diferentes ensayos de los cuatro PBM con su respectiva relación sustrato/inóculo experimental.

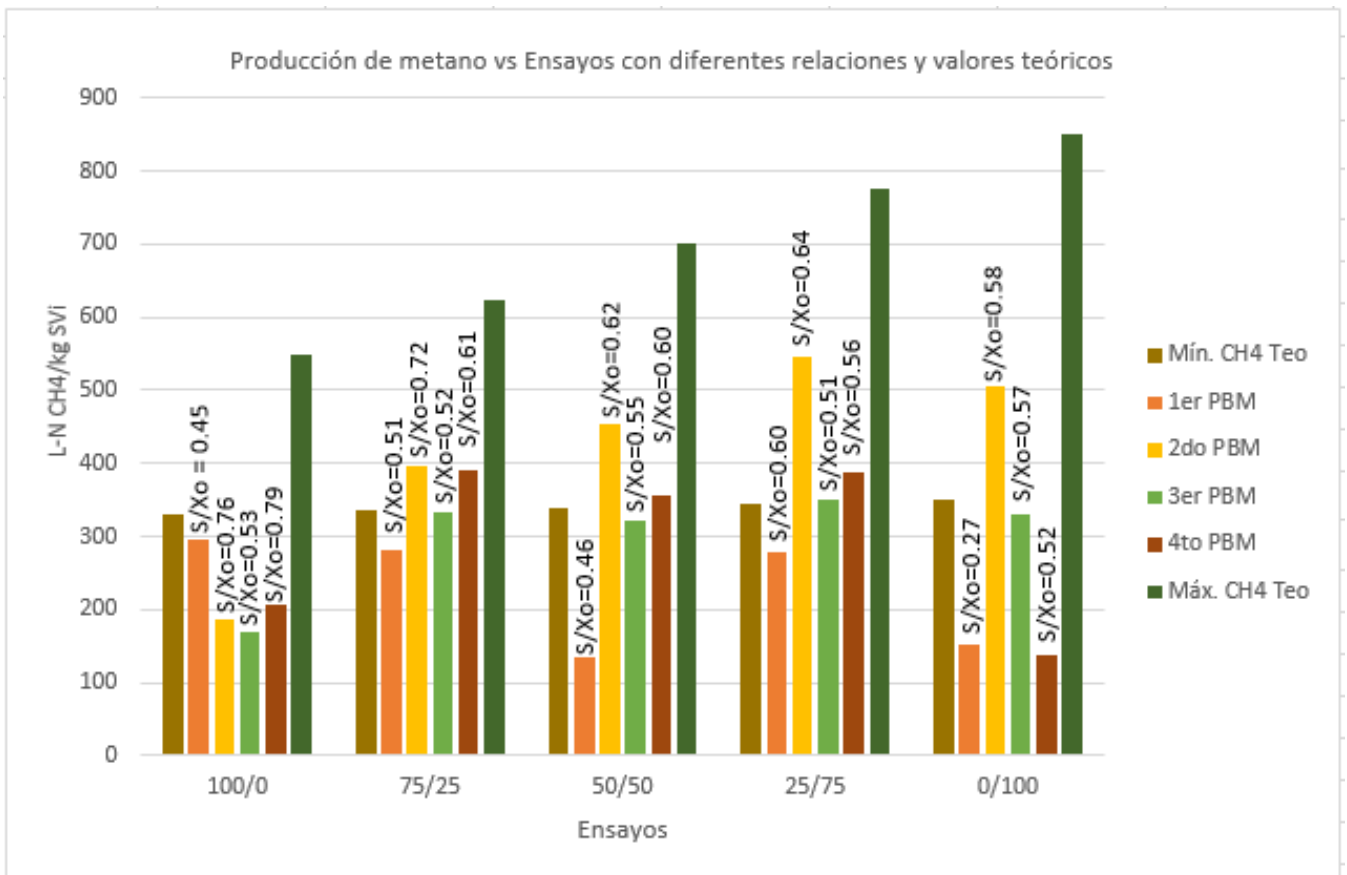


Figura 3.6.1. Comparativa de producción de metano de los ensayos de los diferentes PBM

Nota: Condiciones experimentales: 1^{er} PBM S/Xo=0.25/0.5; 2^{do} PBM S/Xo=0.5/1; 3^{er} PBM S/Xo=0.75/1.5; 4^{to} PBM S/Xo=1/2

Al comparar los ensayos 100/0, se identifica un comportamiento descendente conforme va aumentando la cantidad de sustrato (exceptuando el ensayo perteneciente al 4^{to} PBM), lo que podría deberse a que, a mayor cantidad de estiércol, mayor fue la dificultad por parte de los equipos en mantener un mezclado homogéneo en las botellas. En los 4 PBM con esta relación de sustratos (100/0), la producción de metano fue menor a la mínima teórica esperada.

Para las comparaciones de los ensayos 75/25, 50/50 y 25/75, se muestra un comportamiento ascendente para cada uno de ellos, conforme va aumentando la cantidad de sustrato (a excepción de los ensayos del 2^{do} PBM que tienen una mayor producción sobre los demás en los tres casos). Esta tendencia sugiere que la implementación de la co-digestión para estos sustratos, es mejor opción que usarlos por separado, al obtener mayor producción de metano.

Por otra parte, algunos ensayos no alcanzan la producción mínima teórica esperada, tal como sucedió en los ensayos con la mezcla 100/0. En particular, los ensayos del 1^{er} PBM (relación sustrato/inóculo de 0.25/0.5) presentaron la menor producción de metano por unidad de SV alimentado, comparado con los otros PBM (excepto en el ensayo 100/0 y marginalmente en el 0/100). Este comportamiento puede estar relacionado con la mayor dilución del sustrato al llevar el volumen de la prueba a un valor constante (40 mL) para todos los PBM, independientemente del volumen de la mezcla a probar. Por ejemplo, para el ensayo 100/0 del 1^{er} PBM, la dilución redujo la concentración del sustrato en una relación 1:20 (2 mL de estiércol más 6 mL de inóculo más 32 mL de agua). La DQO soluble del estiércol (promedio 14.22 g/L de la tabla 3.1.1) se reduciría a 0.711 g/L en la botella, valor del mismo orden de magnitud de la constante de velocidad media o de afinidad (K_s) de la ecuación Michaelis – Menten, lo que sitúa al experimento en una situación de limitación de sustrato.

Al igual que el 1^{er} PBM, el 3^{er} PBM mantuvo el rendimiento de metano por abajo del valor teórico, salvo en el ensayo 25/75, donde se alcanza (iguala) la producción mínima esperada. En relación con el 4^{to} PBM, se alcanza la producción mínima solo

en los ensayos de co-digestión (75/25, 50/50 y 25/75), rendimiento que no lograron los ensayos 100/0 y 0/100.

El 2^{do} PBM fue el que presentó un comportamiento conforme a lo esperado, con excepción del ensayo 100/0. Para ese PBM, en el resto de las mezclas se alcanzaron productividades intermedias entre los mínimos y máximos teóricos, además de los mayores valores generales.

Ahora bien, hablando de los ensayos únicamente con lactosuero (0/100), es difícil marcar una tendencia. Sin embargo, al exceptuar el 1^{er} PBM, se podría identificar un descenso conforme aumenta la concentración en las botellas (menor dilución) Este comportamiento puede resultar de la característica ácida del lactosuero y a la alcalinidad (bicarbonato de sodio) que se agregó, con su correspondiente incremento en sodio y una eventual inhibición. Este fenómeno pudo presentarse particularmente en el ensayo del 4^{to} PBM, por el mayor volumen añadido de lactosuero. Una confirmación de lo anterior son los altos valores de alcalinidad que se obtuvieron al finalizar los PBM de los ensayos 0/100 (1^{er} PBM=3040 mgCaCO₃/L, 2^{do} PBM=3960 mgCaCO₃/L, 3^{er} PBM=5200 mgCaCO₃/L, 4^{to} PBM=4800 mgCaCO₃/L).

El 2^{do} PBM es el único que muestra que, a mayor cantidad de lactosuero, mayor es la producción de metano, mientras que los demás PBM se muestran irregulares. Se esperaba que la producción de metano para el ensayo 0/100 fuese el de mayor producción, sin embargo, no lo fue debido probablemente a lo descrito en el párrafo anterior.

La figura 3.6.1 muestra que la relación S/X deseada (0.5) no fue lograda en la práctica, ya que varió de 0.27 a 0.79 si se incluyen todos los ensayos de los 4 PBM probados. Solo el 3^{er} PBM, logro acercarse al valor deseado, al presentar variaciones entre 0.52 y 0.57. Este desajuste experimental hace variable la relación S/X y con ello se dificulta la comparación de los resultados. Al comparar estas relaciones se observa que los mayores valores de rendimiento de metano los tienen los ensayos del 2^{do} PBM, con relaciones entre 0.58 y 0.72.

Finalmente, los resultados obtenidos por el control (acético) y el blanco (agua) permiten decir que el lodo de inóculo estaba en condiciones aceptables, y se comportó como esperado, salvo en el 3^{er} PBM que mostró una prolongada fase latencia (adaptación) que rebasó los 20 días (ver figuras en Anexo C). Este hecho no tiene una explicación, ya que el lodo de inóculo fue el mismo en toda la experimentación.

Capítulo 4.

Conclusión

Las cuatro pruebas de Potencial Bioquímico de Metano presentaron variaciones de origen (relación sustrato/microorganismo) que resultaron en condiciones no directamente comparables entre las diferentes condiciones experimentales. La dilución descendente (concentración de sustrato en incremento) en las botellas del 1^{er} PBM al 4^{to} PBM también pudo introducir un efecto sobre la disponibilidad de sustrato y la cinética de conversión a metano, de acuerdo con la ecuación de Michaelis-Menten (constante K_s).

La mayor producción (rendimiento) de metano se obtuvo con la relación 25/75 (estiércol/lactosuero) en el 2^{do} PBM con un valor de 540 N-L CH₄/kgSV. Sin embargo, la relación 75/25 presentó resultados de rendimiento más cercanos en las cuatro pruebas de PBM probados (398 N-L CH₄/kgSV para el 2^{do} PBM). Siendo que ambas mezclas oscilan en el mismo intervalo de valores de producción de metano. Con base en esto, si el objetivo es aprovechar energéticamente los residuos de una granja, siendo el estiércol el residuo predominante, la relación 75/25 es la más recomendable, teniendo en cuenta un tratamiento previo como trituración y tamizado del estiércol.

Anexo A

Memoria de cálculo

Diseño experimental para los PBM

Se escogió una relación sustrato/inóculo (S/X_0) de 0.5 gSV_{sustrato}/g SV_{inóculo}, planteando así, cuatro PBM:

- 0.25 gSV de sustrato entre 0.5 gSV de inóculo
- 0.5 gSV de sustrato entre 1 gSV de inóculo
- 0.75 gSV de sustrato entre 1.5 gSV de inóculo
- 1 gSV de sustrato entre 2 gSV de inóculo

Con cinco ensayos diferentes, es decir, mezclas en % gSV/gSV (estiércol/lactosuero):

- 100/0
- 75/25
- 50/50
- 25/75
- 0/100

Considerando un blanco y un control:

- Blanco. Inóculo – agua
- Control. Inóculo – ácido acético – agua

Se establecieron las siguientes condiciones de trabajo:

- Volumen total de la botella= 250 mL
- Volumen de trabajo = 40 mL
- Volumen de espacio de cabeza = 210 mL

Todos los cálculos se hicieron con base en los sólidos volátiles de los sustratos y del inóculo, por ende, cada uno se caracterizó y se obtuvo la siguiente información

para los sustratos obtenidos de CEPIPSA - UNAM, con base en la cual se realizaron todos los cálculos:

- Estiércol – 124.3 gSV/L
 - $\rho_{\text{estiércol aparente}} = 1026 \text{ g/L}$
 - $\% \text{humedad}_{\text{estiércol}} = 85.7$
- Lactosuero – 58.9 gSV/L
- Inóculo – 82.6 gSV/L

La tabla A.1. muestra los volúmenes y las masas a utilizar para la preparación de los ensayos 75/25 % gSV/gSV (estiércol/lactosuero) de las cuatro cinéticas:

Tabla A.1. Preparación de ensayos 75/25 para los cuatro PBM.

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v)	75/25			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	0.75	0.75	0.75	0.75
$M_{\text{estiércol}}$ (g SV)	0.19	0.38	0.56	0.75
$M_{\text{estiércol húmedo}}$ (g)	1.5	3.1	4.6	6.2
$V_{\text{estiércol}}$ (mL)	1.5	3.0	4.5	6.0
Fracción de lactosuero:	0.25	0.25	0.25	0.25
$M_{\text{lactosuero}}$ (g SV)	0.06	0.1	0.2	0.3
$V_{\text{lactosuero}}$ (mL)	1	2	3	4
$M_{\text{inóculo}}$ (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
$V_{\text{inóculo}}$ (mL)	6	12	19	25
V_{total} (mL)	9	17	26	34
V_{agua} (mL)	31	23	14	6
g NaHCO_3	0.0	0.1	0.1	0.1

Algoritmo de los cálculos para la tabla A.1

- Densidad aparente del estiércol (g/L):

$$\rho_{\text{estiércol}} = \frac{m}{v}$$

Donde:

m = peso del estiércol de 25 mL de estiércol

v = volumen de una muestra de estiércol (25 mL)

- % de humedad del estiércol:

$$\% \text{ humedad} = \frac{P_1 - P_2}{P} * 100$$

Donde:

P_1 = Peso de la capsula + muestra húmeda

P_2 = Peso de la capsula + muestra seca

P = Peso de la muestra

- Masa base seca (gSV):

$$M_{\text{sustrato}} = \text{Fracción del sustrato} * \text{gSV de sustrato a introducir}$$

Sustrato = Estiércol o lactosuero

- Masa base húmeda de estiércol (g):

$$M_{\text{estiércol húmedo}} = \frac{\text{gSV de estiércol}}{\text{relación} \frac{\text{gSV estiércol}}{\text{g estiércol húmedo}}}$$

Para la relación gSV estiércol/g estiércol en base húmeda:

$$\text{relación} \frac{\text{gSV estiércol}}{\text{g estiércol húmedo}} = \frac{\text{Concentración de estiércol} \left[\frac{\text{gSV}}{\text{L}} \right]}{\text{Densidad aparente del estiércol} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}$$

- Volumen de estiércol (mL):

$$V_{\text{estiércol}} = \frac{M_{\text{estiércol húmedo}} [\text{g}] * 1000 \text{ mL/L}}{\text{Solidos en estiércol base húmeda} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}$$

- Volumen de lactosuero (mL):

$$V_{\text{lactosuero}} = \frac{M_{\text{lactosuero}} [\text{gSV}] * 1000 \text{ mL/L}}{\frac{\text{gSV}}{\text{L}} \text{ del lactosuero}}$$

- Masa base seca del inóculo (gSV):

$$M_{\text{inóculo}} = \frac{M_{\text{estiércol}} [\text{gSV}] + M_{\text{lactosuero}} [\text{gSV}]}{\frac{S}{X_0} \left(\frac{\text{gSV}_{\text{sustrato}}}{\text{gSV}_{\text{inóculo}}} \right)}$$

- Volumen del inóculo (mL):

$$V_{inóculo} = M_{inóculo} [gSV] * \left(\frac{1000 \text{ mL/L}}{\frac{gSV}{L} \text{ del inóculo}} \right)$$

- Volumen total (mL)

$$V_{total} = V_{estiércol} + V_{lactosuero} + V_{inóculo}$$

- Volumen de agua (mL)

$$V_{agua} = V_{trabajo} - V_{total}$$

- Masa se NaHCO_3 (g)

$$g_{\text{NaHCO}_3} = gSV_{lactosuero} * 0.5 \frac{g_{\text{NaHCO}_3}}{gSV_{lactosuero}}$$

- Preparación ensayo blanco

- Se calcula el volumen (mL) de la disolución de ác. Acético

$$V_{disolución \text{ de } CH_3COOH} = 40 \text{ mL} - V_{inóculo}$$

- Se calcula el volumen (mL) de CH_3COOH a agregar a 100 mL de agua, de tal manera que se cumpla con la masa (gSV) de sustrato a agregar.

$$V_{CH_3COOH} = \frac{100 \text{ mL} * g_{CH_3COOH}}{V_{disolución \text{ de } CH_3COOH}}$$

- Una vez realizada la disolución se prosigue a neutralizar.
- Por último, se toma el volumen de *disolución de CH_3COOH* para agregar a la botella.

Ejemplo de cálculo

Para el ensayo 75/25 del 1^{er} PBM, partiendo de los gSV que se le adiciona de sustrato e inóculo,

$$S/X_0 = 0.25 gSV_{sustrato} / 0.5 gSV_{inóculo}$$

$$\text{Fracción de estiércol} = 0.75$$

$$\text{Fracción de lactosuero} = 0.25$$

Resultan los siguientes cálculos para ambos sustratos:

- Estiércol
- Densidad aparente del estiércol (g/L):

$$\rho_{estiércol} = \frac{25.66 \text{ g}}{25 \text{ mL}} \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \right)$$

$$\rho_{estiércol} = 1026.4 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Donde:

$$m = 25.66 \text{ g}$$

$$v = 25 \text{ mL}$$

- % de humedad del estiércol:

$$\% \text{ humedad} = \frac{(73.7121 \text{ g}) - 51.7088 \text{ g}}{25.66 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ humedad} = 85.7494 \%$$

Donde:

$$P_1 = 73.7121 \text{ g}$$

$$P_2 = 51.7088 \text{ g}$$

$$P = 25.66 \text{ g}$$

- Masa base seca a adicionar:

$$M_{estiércol} = 0.75 * 0.25 \text{ gSV}$$

$$M_{estiércol} = 0.19 \text{ gSV}$$

- Masa correspondiente base húmeda

$$\text{relación} \frac{\text{gSV estiércol}}{\text{g estiércol húmedo}} = \frac{124.32 \frac{\text{gSV}}{\text{L}}}{1026 \frac{\text{g}}{\text{L}}} = 0.1211 \frac{\text{gSV}}{\text{g estiércol}}$$

$$M_{estiércol \text{ húmedo}} = \frac{0.19 \text{ gSV}}{0.1211 \frac{\text{gSV}}{\text{g estiércol húmedo}}}$$

$$M_{\text{estiércol húmedo}} = 1.5 \text{ g}$$

- Volumen correspondiente de estiércol

$$V_{\text{estiércol}} = \frac{1.5 \text{ g} * 1000}{1026 \frac{\text{g}}{\text{L}}}$$

$$V_{\text{estiércol}} = 1.5 \text{ mL}$$

- Lactosuero
- Masa base seca a adicionar:

$$M_{\text{lactosuero}} = 0.25 * 0.25 \text{ gSV}$$

$$M_{\text{Lactosuero}} = 0.06 \text{ gSV}$$

- Volumen correspondiente del lactosuero (mL)

$$V_{\text{lactosuero}} = \frac{0.06 \text{ gSV} * 1000 \text{ mL/L}}{58.9 \frac{\text{gSV}}{\text{L}}}$$

$$V_{\text{lactosuero}} = 1 \text{ mL}$$

- Inóculo
 - Masa base seca del inóculo (gSV):

$$M_{\text{inóculo}} = \frac{0.19 \text{ gSV} + 0.06 \text{ gSV}}{0.5 \frac{\text{gSV}_{\text{sustrato}}}{\text{gSV}_{\text{inóculo}}}}$$

$$M_{\text{inóculo}} = 0.5 \text{ gSV}$$

- Volumen correspondiente del inóculo (mL)

$$V_{\text{inóculo}} = 0.5 \text{ gSV} * \left(\frac{1000 \text{ mL/L}}{82.6 \frac{\text{gSV}}{\text{L}}} \right)$$

$$V_{\text{inóculo}} = 6 \text{ mL}$$

- Volumen sustratos e inóculo (mL)

$$V_{\text{mezcla}} = 2 \text{ mL} + 1 \text{ mL} + 6 \text{ mL}$$

$$V_{mezcla} = 9 \text{ mL}$$

- Volumen complementario de agua (mL)

$$V_{agua} = 40 \text{ mL} - 9 \text{ mL}$$

$$V_{agua} = 31 \text{ mL}$$

- Masa se NaHCO_3 (g)

$$g\text{NaHCO}_3 = 0.06 \text{ gSV}_{\text{lactosuero}} * 0.5 \text{ gNaHCO}_3 / \text{gSV}_{\text{lactosuero}}$$

$$g\text{NaHCO}_3 = 0.03$$

- Preparación ensayo blanco

- Se calcula el volumen (mL) de la disolución de ác. Acético

$$V_{\text{disolución de } \text{CH}_3\text{COOH}} = 40 \text{ mL} - 6 \text{ mL}$$

$$V_{\text{disolución de } \text{CH}_3\text{COOH}} = 34 \text{ mL}$$

- Se calcula el volumen (mL) de CH_3COOH a agregar a 100 mL de agua, de tal manera que se cumpla con la masa (0.25 gSV) de sustrato a agregar.

$$V_{\text{CH}_3\text{COOH}} = \frac{100 \text{ mL} * 0.25 \text{ gCH}_3\text{COOH}}{34 \text{ mL}}$$

$$V_{\text{CH}_3\text{COOH}} = 0.73 \text{ mL}$$

- Una vez realizada la disolución se prosigue a neutralizar.
- Por último, se toma el volumen de disolución de CH_3COOH para agregar a la botella (34 mL).

Caracterización de los ensayos

a) Determinación de sólidos por gravimetría:

- Sólidos Totales

$$g \frac{ST}{L} = \frac{(P_2[g] - P_1[g])}{\text{Volumen de muestra [L]}}$$

- Sólidos Volátiles

$$g \frac{SV}{L} = \frac{(P_2[g] - P_3[g])}{\text{Volumen de muestra [L]}}$$

- Sólidos Fijos

$$g \frac{SF}{L} = g ST - g SV$$

Donde:

P_1 = Peso constante de la capsula.

P_2 = Peso de la capsula con la muestra después de la estufa.

P_3 = Peso de la capsula con la muestra después de la mufla.

- b) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Determinación espectrofotométrica, a través de longitud de onda

- c) Alcalinidad

$$\text{Alcalinidad} = \frac{(50,000)(N)(V)}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

N = Normalidad del ácido utilizado

V = Cantidad de ácido utilizado en mL para alcanzar un pH de 4.3

- d) Relación alfa de alcalinidad

$$\alpha = \frac{\text{alcalinidad } pH_{5.75}}{\text{alcalinidad } pH_{4.3}}$$

- e) Ácidos grasos volátiles

Análisis por cromatografía con un detector de ionización de flama

- f) Litros normalizados de metano entre kilogramos de sólidos volátiles

$$\frac{L - N CH_4}{kg SV_i} = \left(\frac{\frac{n}{1000} * R * T}{P} \right) * F.C.$$

Donde:

n = mmol de muestra de metano inyectada en 0.5 mL

R = Constante universal de los gases ideales, $0.0821 \frac{atm * L}{mol * K}$

T = Temperatura, 273.15 K

P = Presión en Ciudad Universitaria, 1 atm

kg SV_i = Sólidos Volátiles del sustrato introducidos en el ensayo

F.C. = Factor de Corrección

Obtención de Factor de Corrección:

$$FC = \frac{\text{Volumen de cabeza en botella}}{\text{Volumen inyectado}}$$

$$\text{Volumen de cabeza en botella} = \text{Volumen total} - \text{Volumen líquido de trabajo}$$

Ejemplo de cálculo

Para ensayo de 75/25 para el 1^{er} PBM:

- Sólidos Totales

$$g \frac{ST}{L} = \frac{(49.8352 \text{ g} - 49.6763 \text{ g})}{0.025 \text{ L}}$$

$$g \frac{ST}{L} = 6.36$$

P₁ = 49.6763 g

P₂ = 49.8352 g

P₃ = 49.6956 g

- Sólidos Volátiles

$$g \frac{SV}{L} = \frac{(49.8352 \text{ g} - 49.6956 \text{ g})}{0.025 \text{ L}}$$

$$g \frac{SV}{L} = 5.58$$

- Sólidos Fijos

$$g \frac{SF}{L} = 6.36 \text{ g} - 5.58 \text{ g}$$

$$g \frac{SF}{L} = 0.78$$

- Alcalinidad

$$\text{Alcalinidad} = \frac{(50,000)(0.2 N)(0.3 \text{ mL})}{25 \text{ mL}}$$

- Relación alfa de alcalinidad
-

$$\alpha = \frac{4.5 \text{ mL}}{6 \text{ mL}}$$

$$\alpha = 0.75$$

Litros normalizados de metano entre kilogramos de sólidos volátiles

$$\frac{L - N \text{ CH}_4}{\text{kg SV}_i} = \left(\frac{\frac{0.001499 \text{ mmol}}{1000} * 0.0821 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{K}} * 273.15 \text{ K}}{1 \text{ atm}} \right) \frac{1}{0.000197 \text{ kg SV}} * 420$$

$$\frac{L - N \text{ CH}_4}{\text{kg SV}_i} = 70.2794$$

$n = 0.001499$ mmol de muestra de biogás del ensayo 75/25 al segundo día que se montó.

kg SV = 0.000197 kg SV en el ensayo 75/25.

$$\text{F.C.} = \frac{210}{0.5} = 420$$

Determinación de producción teórica de metano

- Ensayos estiércol y lactosuero

Se parte del potencial de metano para el estiércol y el lactosuero teóricos (ver 1.1.2.1):

- Estiércol: 330 – 550 mL-CH₄/gSV
- Lactosuero: 350 – 850mL-CH₄/gSV

Y de los gSV de estiércol o lactosuero que se ocuparon experimentalmente.

Para calcular:

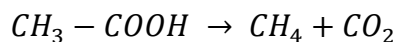
Los mL-CH₄ se emplea la siguiente ecuación:

$$mL - CH_4 = \left(gSV_{Estiércol} * \frac{mL - CH_4}{gSV_{Estiércol}} \right) + \left(gSV_{Lactosuero} * \frac{mL - CH_4}{gSV_{Lactosuero}} \right)$$

$$\frac{L CH_4}{kgSV} = \frac{mL - CH_4}{gSV_{Est} + gSV_{Lac}}$$

- Ensayo control

Partiendo de la reacción:



Y de los siguientes datos:

$$PM_{CH_4} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$PM_{CH_3COOH} = 60.05 \text{ g/mol}$$

$$\rho_{CH_4} = 0.000714 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$\rho_{CH_3COOH} = 1.05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$\frac{L - CH_4}{kgSV} = g_{CH_3COOH} * \left(\frac{1 \text{ mol } CH_3COOH}{60.05 \text{ g } CH_3COOH} \right) * \left(\frac{1 \text{ mol } CH_4}{CH_3COOH} \right) * \left(\frac{16.04 \text{ g } CH_4}{1 \text{ mol } CH_4} \right) * \left(\frac{1 \text{ mL } CH_4}{0.000714 \text{ g } CH_4} \right) * \left(\frac{1}{gSV_{CH_3COOH}} \right)$$

Ejemplo de cálculo:

Para ensayo de 75/25 para el 1^{er} PBM:

$$mL - CH_4 = \left(0.188 \text{ gSV}_{\text{Estiércol}} * 330 \frac{mL - CH_4}{\text{gSV}_{\text{Estiércol}}} \right) + \left(0.063 \text{ gSV}_{\text{Lactosuero}} * 0.063 \frac{mL - CH_4}{\text{gSV}_{\text{Lactosuero}}} \right)$$

$$\frac{L CH_4}{\text{kgSV}} = \frac{83.8 \text{ mL} - CH_4}{0.188 \text{ gSV}_{\text{Est}} + 0.63 \text{ gSV}_{\text{Lac}}}$$

$$335 \frac{L CH_4}{\text{kgSV}}$$

Ensayo control (ácido acético) para el 1^{er} PBM (S/Xo=0.25/05):

$$0.25 \text{ gCH}_3\text{COOH} * \left(\frac{1 \text{ mol CH}_3\text{COOH}}{60.05 \text{ g CH}_3\text{COOH}} \right) * \left(\frac{1 \text{ mol CH}_4}{\text{CH}_3\text{COOH}} \right) * \left(\frac{16.04 \text{ g CH}_4}{1 \text{ mol CH}_4} \right) * \left(\frac{1 \text{ mL CH}_4}{0.000714 \text{ g CH}_4} \right) * \left(\frac{1}{0.25 \text{ gSV CH}_3\text{COOH}} \right)$$

$$371.12 \frac{L - CH_4}{\text{kgSV}}$$

Anexo B

Tablas. Diseño Experimental

4.1. Ensayos 100/0

Tabla B.1. Diseño experimental para los ensayos 100/0 de todos los PBM

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v):	100/0			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	1.00	1.00	1.00	1.00
M _{estiércol} (g SV) =	0.25	0.50	0.75	1.00
M _{estiércol} (g) =	2.1	4.1	6.2	8.3
V _{estiércol} (mL)	2	4	6	8
Fracción de lactosuero:	0.0	0.0	0.0	0.0
M _{lactosuero} (g SV) =	0.0	0.0	0.0	0.0
V _{lactosuero} (mL) =	0.0	0.0	0.0	0.0
M _{inóculo} (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
V _{inóculo} (mL) =	6	12	19	25
V _{total} (mL) =	8	16	24	32
V _{agua} (mL) =	32	24	16	8
g NaHCO ₃	0	0	0	0

4.2. Ensayos 75/25

Tabla B.2. Diseño experimental para los ensayos 75/25 de todos los PBM

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v):	75/25			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	0.75	0.75	0.75	0.75
M _{estiércol} (g SV) =	0.19	0.38	0.56	0.75
M _{estiércol} (g) =	1.5	3.1	4.6	6.2
V _{estiércol} (mL)	2	3	5	6
Fracción de lactosuero:	0.3	0.3	0.3	0.3
M _{lactosuero} (g SV) =	0.1	0.1	0.2	0.3
V _{lactosuero} (mL) =	1.1	2.1	3.2	4.2
M _{inóculo} (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
V _{inóculo} (mL) =	6	12	19	25
V _{total} (mL) =	9	17	26	34
V _{agua} (mL) =	31	23	14	6
g NaHCO ₃	0	0	0	0

4.3. Ensayos 50/50

Tabla B.3. Diseño experimental para los ensayos 50/50 de todos los PBM

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v):	50/50			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	0.50	0.50	0.50	0.50
M _{estiércol} (g SV) =	0.13	0.25	0.38	0.50
M _{estiércol} (g) =	1.0	2.1	3.1	4.1
V _{estiércol} (mL)	1	2	3	4
Fracción de lactosuero:	0.5	0.5	0.5	0.5
M _{lactosuero} (g SV) =	0.1	0.3	0.4	0.5
V _{lactosuero} (mL) =	2.1	4.2	6.4	8.5
M _{inóculo} (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
V _{inóculo} (mL) =	6	12	19	25
V _{total} (mL) =	9	18	28	37
V _{agua} (mL) =	31	22	12	3
g NaHCO ₃	0	0	0	0

4.4. Ensayos 25/75

Tabla B.4. Diseño experimental para los ensayos 25/75 de todos los PBM

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v):	25/75			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	0.25	0.25	0.25	0.25
M _{estiércol} (g SV) =	0.06	0.13	0.19	0.25
M _{estiércol} (g) =	0.5	1.0	1.5	2.1
V _{estiércol} (mL)	1	1	2	2
Fracción de lactosuero:	0.8	0.8	0.8	0.8
M _{lactosuero} (g SV) =	0.2	0.4	0.6	0.8
V _{lactosuero} (mL) =	3.2	6.4	9.6	12.7
M _{inóculo} (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
V _{inóculo} (mL) =	6	12	19	25
V _{total} (mL) =	10	19	29	39
V _{agua} (mL) =	30	21	11	1
g NaHCO ₃	0	0	0	0

4.5. Ensayos 0/100

Tabla B.5. Diseño experimental para los ensayos 0/100 de todos los PBM

Proporción estiércol/lactosuero (% v/v):	0/100			
Masa de sustrato (g SV):	0.25	0.50	0.75	1.00
Fracción de estiércol:	0.00	0.00	0.00	0.00
M _{estiércol} (g SV) =	0.00	0.00	0.00	0.00
M _{estiércol} (g) =	0.0	0.0	0.0	0.0
V _{estiércol} (mL)	0	0	0	0
Fracción de lactosuero:	1.0	1.0	1.0	1.0
M _{lactosuero} (g SV) =	0.3	0.5	0.8	1.0
V _{lactosuero} (mL) =	4.2	8.5	12.7	17.0
M _{inóculo} (g SV) =	0.5	1.0	1.5	2.0
V _{inóculo} (mL) =	6	12	19	25
V _{total} (mL) =	10	21	31	41
V _{agua} (mL) =	30	19	9	-1
g NaHCO ₃	0	0	0	1

Anexo C

Gráficas de duplicados

1^{er} Potencial Bioquímico de Metano

Figura C.1. 1^{er} PBM. Producción de CH₄, 100/0 vs Blanco.

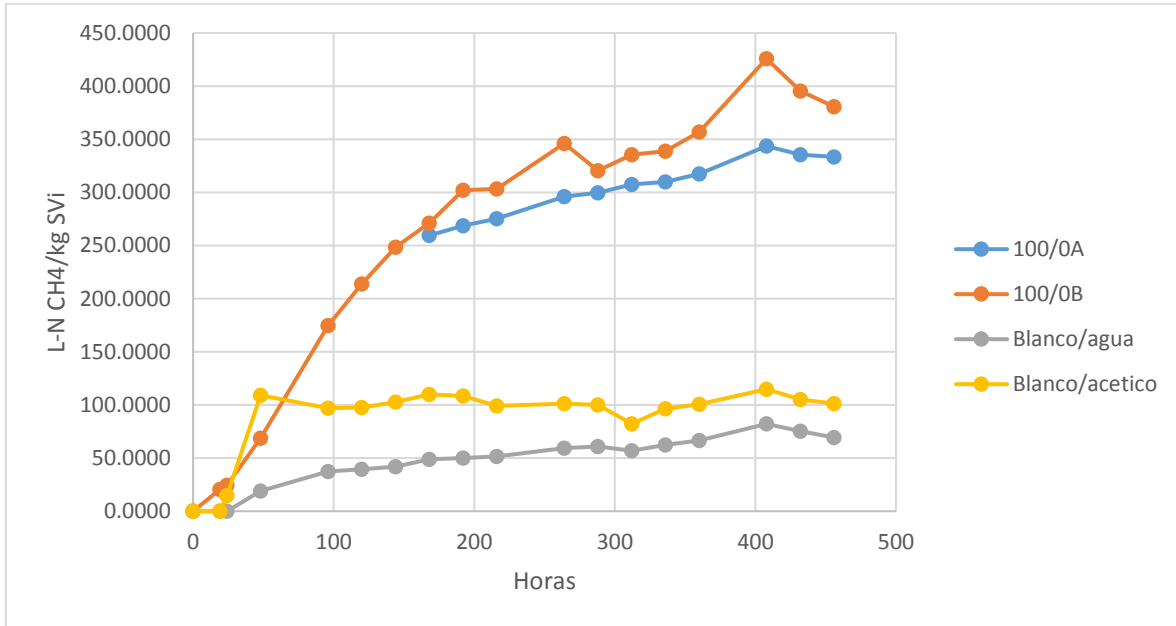


Figura C.2. 1^{er} PBM. Producción de CH₄, 75/25 vs Blanco.

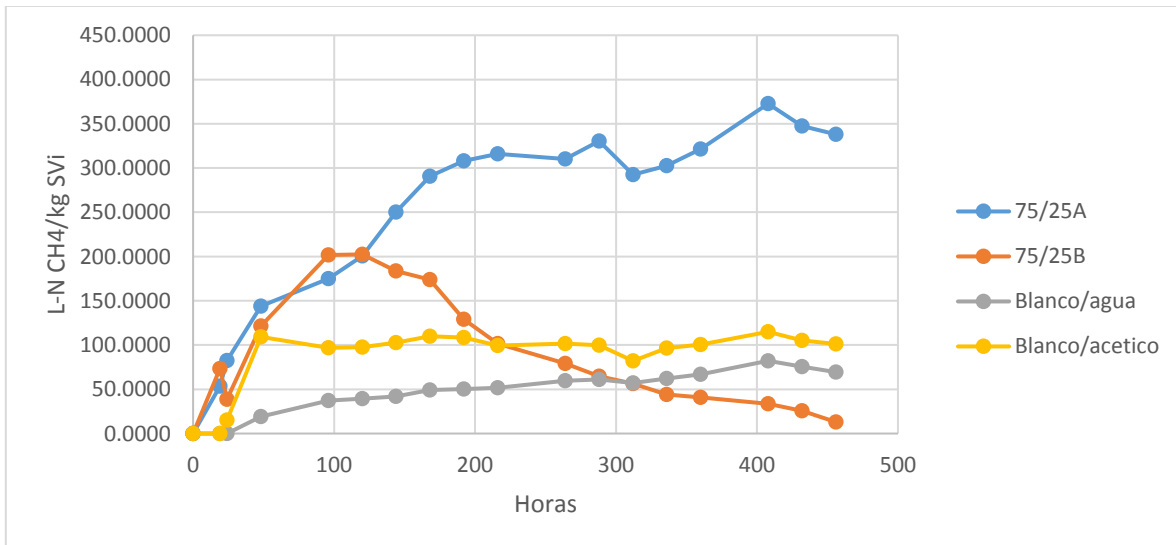


Figura C.3. 1er PBM. Producción de CH₄, 50/50 vs Blanco.

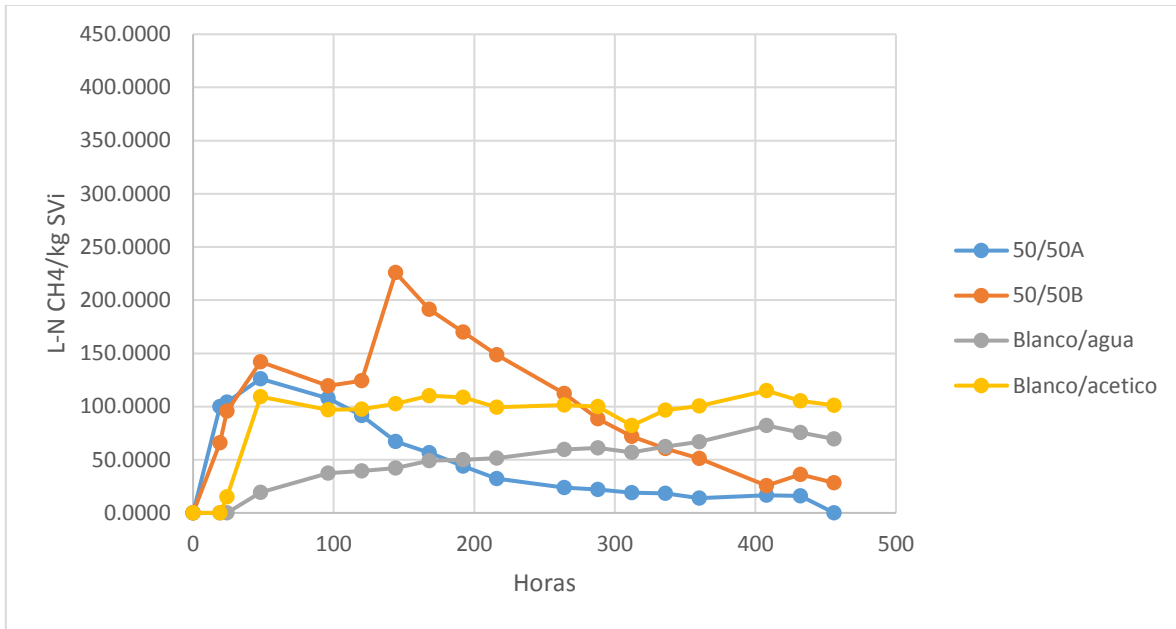


Figura C.4. 1er PBM. Producción de CH₄, 25/75 vs Blanco.

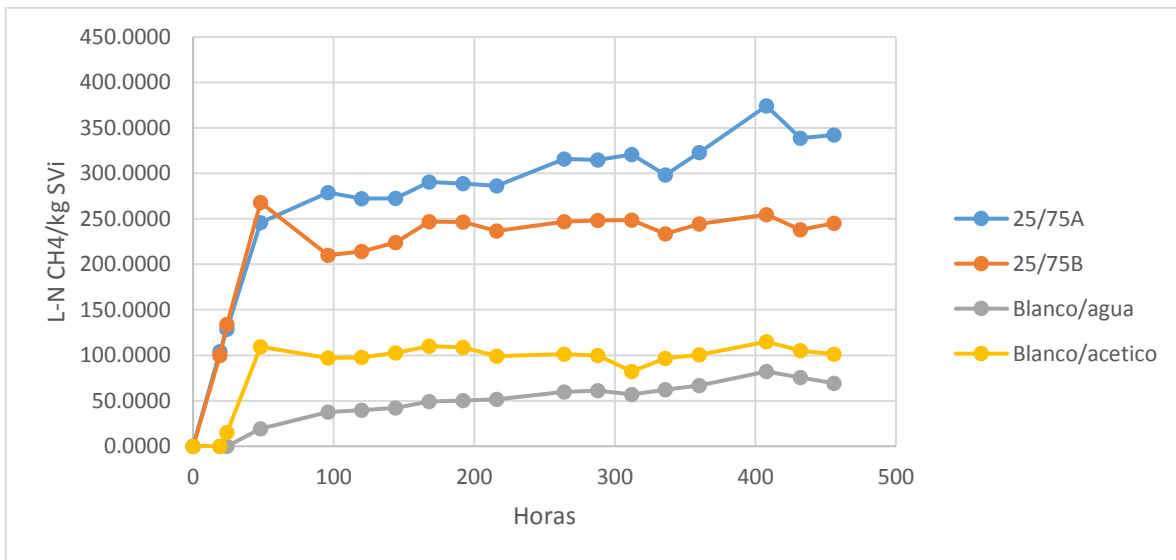
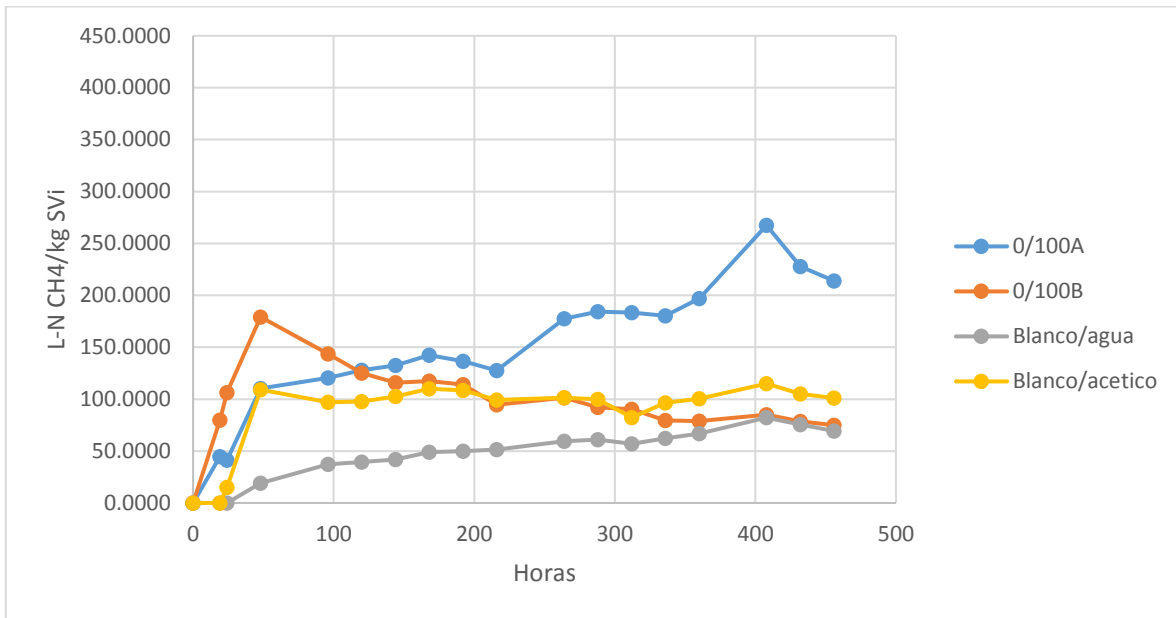


Figura C.5. 1^{er} PBM. Producción de CH₄, 0/100 vs Blanco.



2^{do} Potencial Bioquímico de Metano

Figura C.6. 2^{do} PBM. Producción de CH₄, 100/0 vs Blanco.

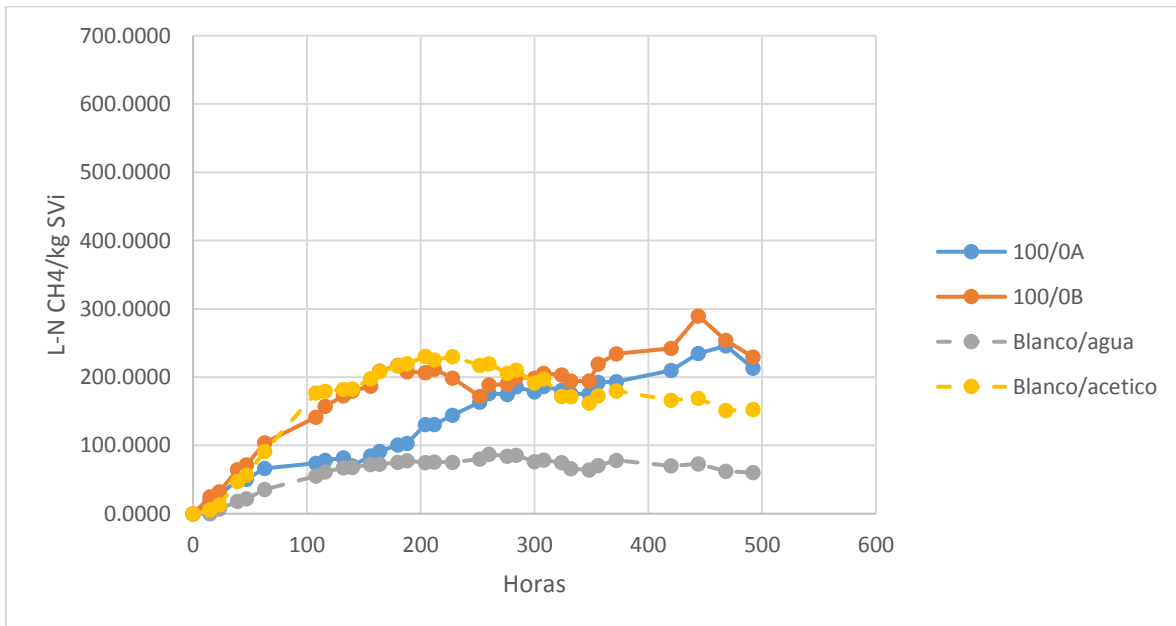


Figura C.7. 2^{do} PBM. Producción de CH₄, 75/25 vs Blanco.

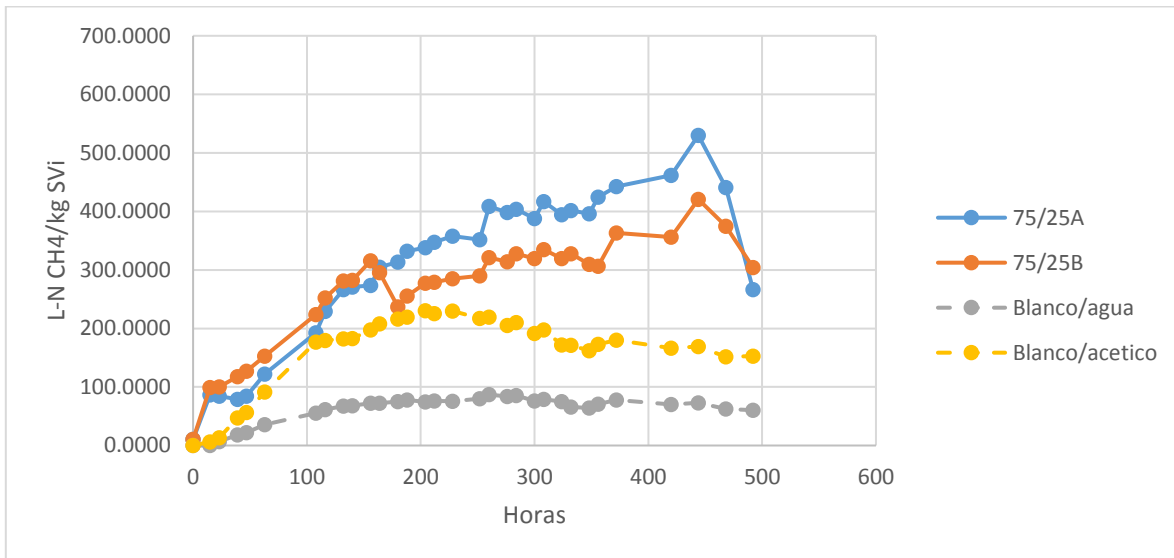


Figura C.8. 2^{do} PBM. Producción de CH₄, 50/50 vs Blanco.

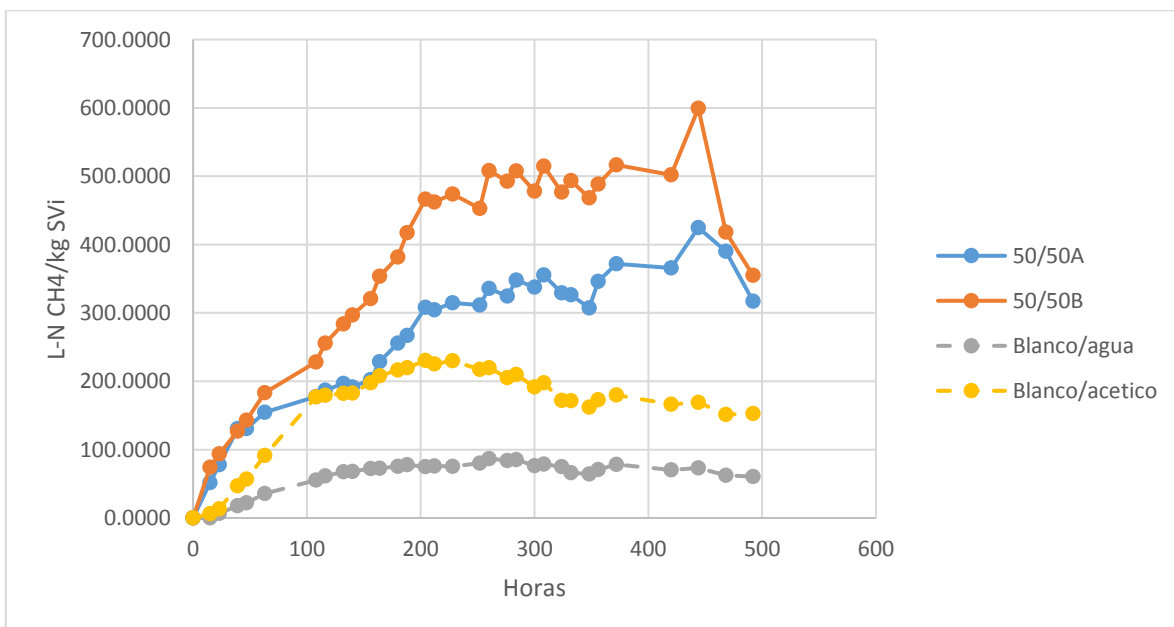


Figura C.9. 2^{do} PBM. Producción de CH₄, 25/75 vs Blanco.

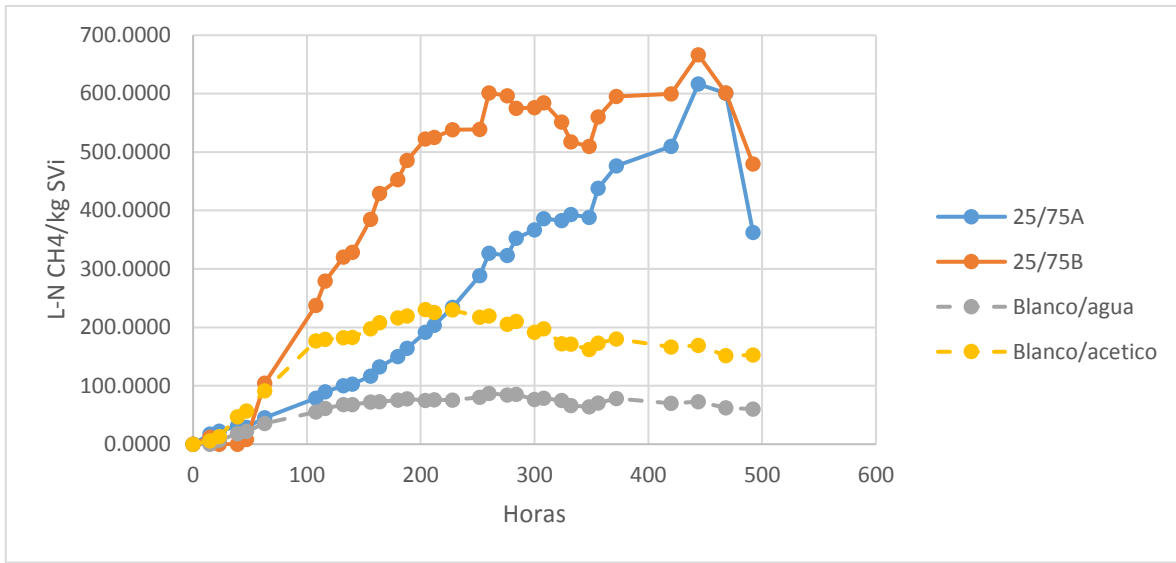
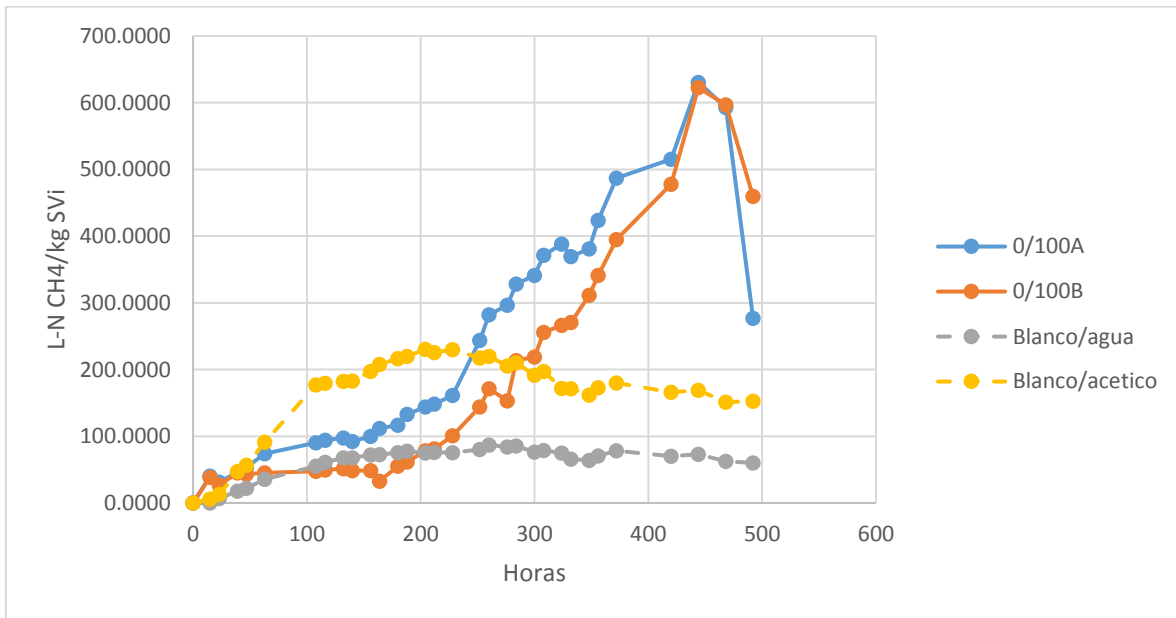


Figura C.10. 2^{do} PBM. Producción de CH₄, 0/100 vs Blanco.



3^{er} Potencial Bioquímico de Metano

Figura C.11. 3^{er} PBM. Producción de CH₄, 100/0 vs Blanco.

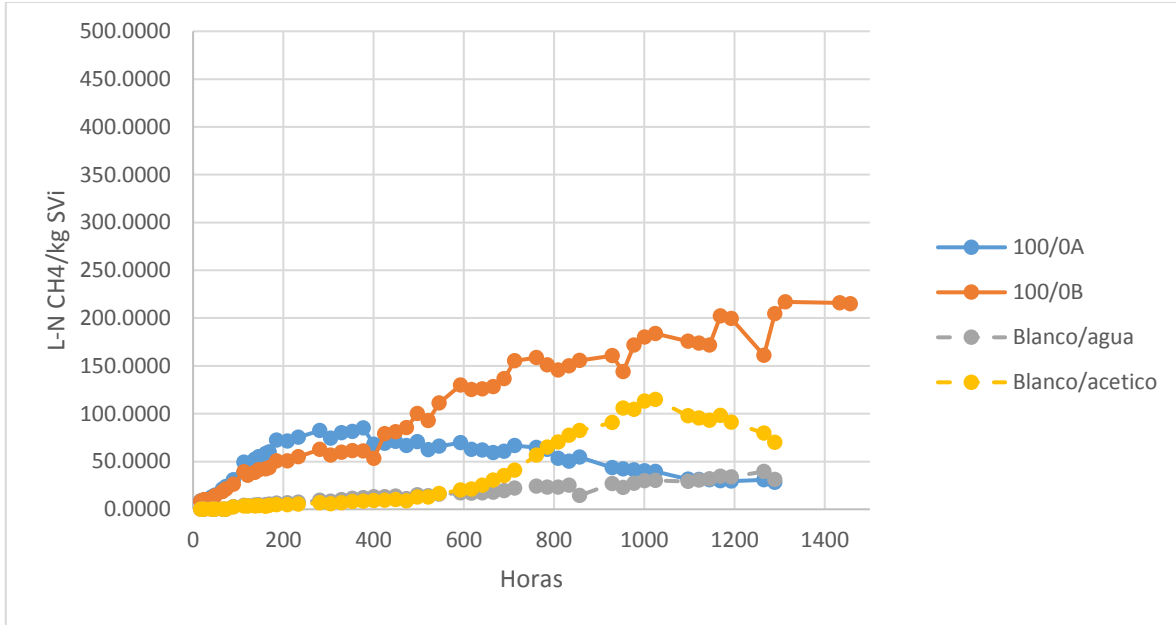


Figura C.12. 3^{er} PBM. Producción de CH₄, 75/25 vs Blanco.

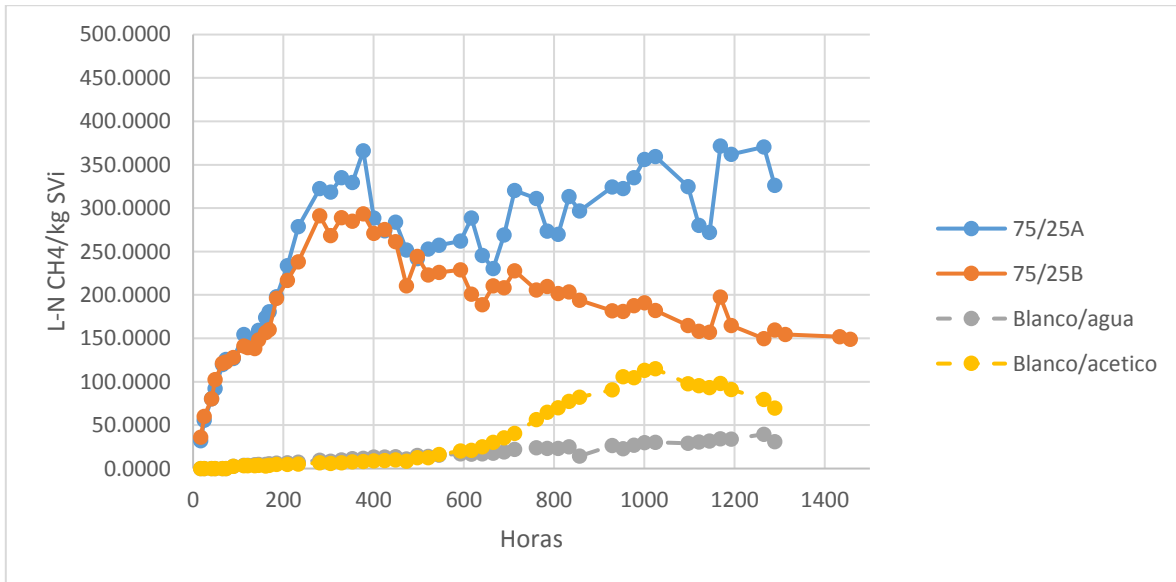


Figura C.13. 3^{er} PBM. Producción de CH₄, 50/50 vs Blanco.

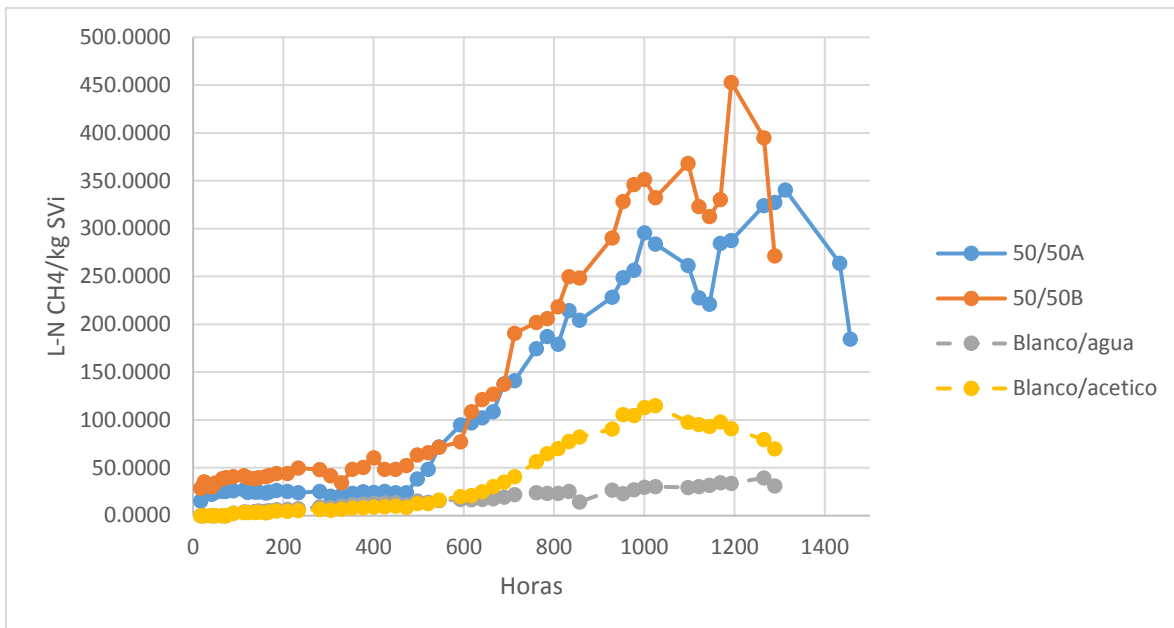


Figura C.14. 3^{er} PBM. Producción de CH₄, 25/75 vs Blanco.

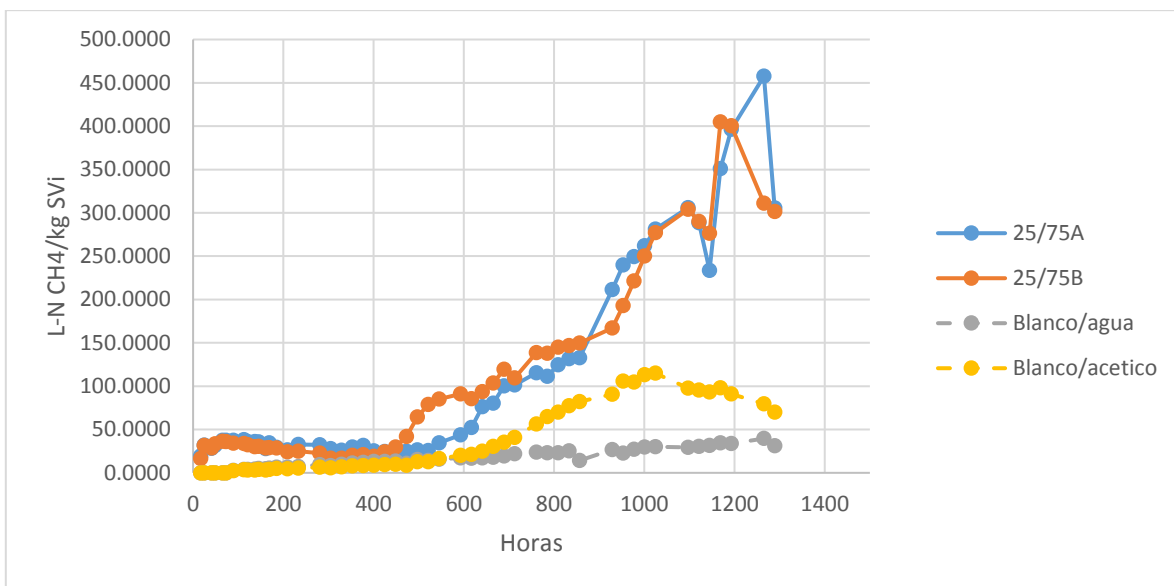
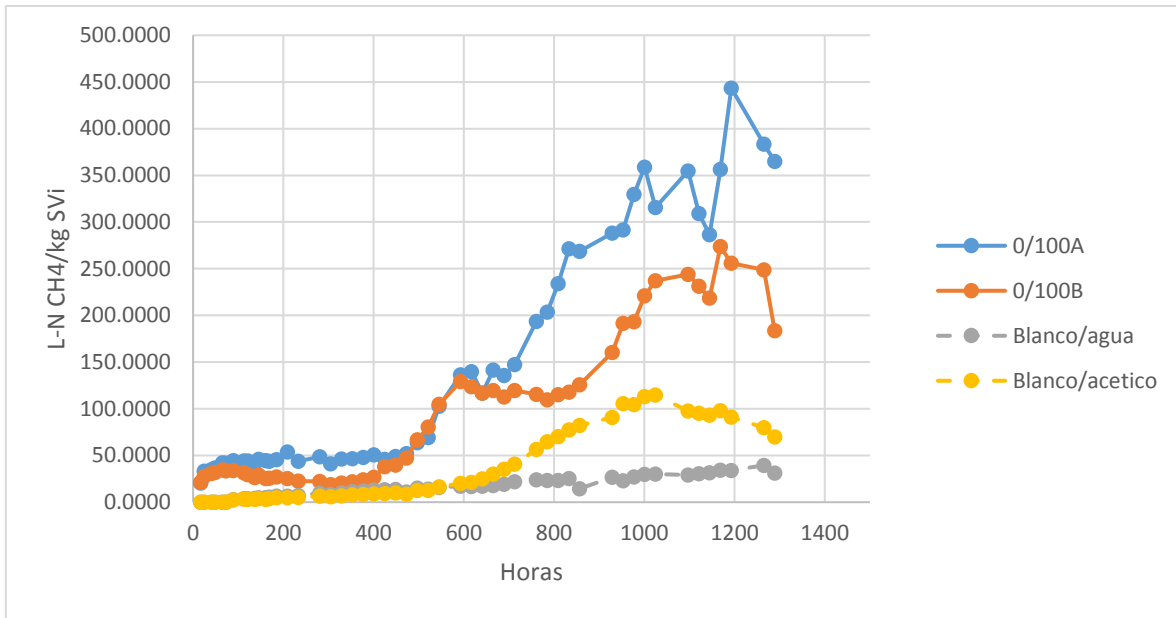


Figura C.15. 3^{er} PBM. Producción de CH₄, 0/100 vs Blanco.



4^{to} Potencial Bioquímico de Metano

Figura C.16. 4^{to} PBM. Producción de CH₄, 100/0 vs Blanco.

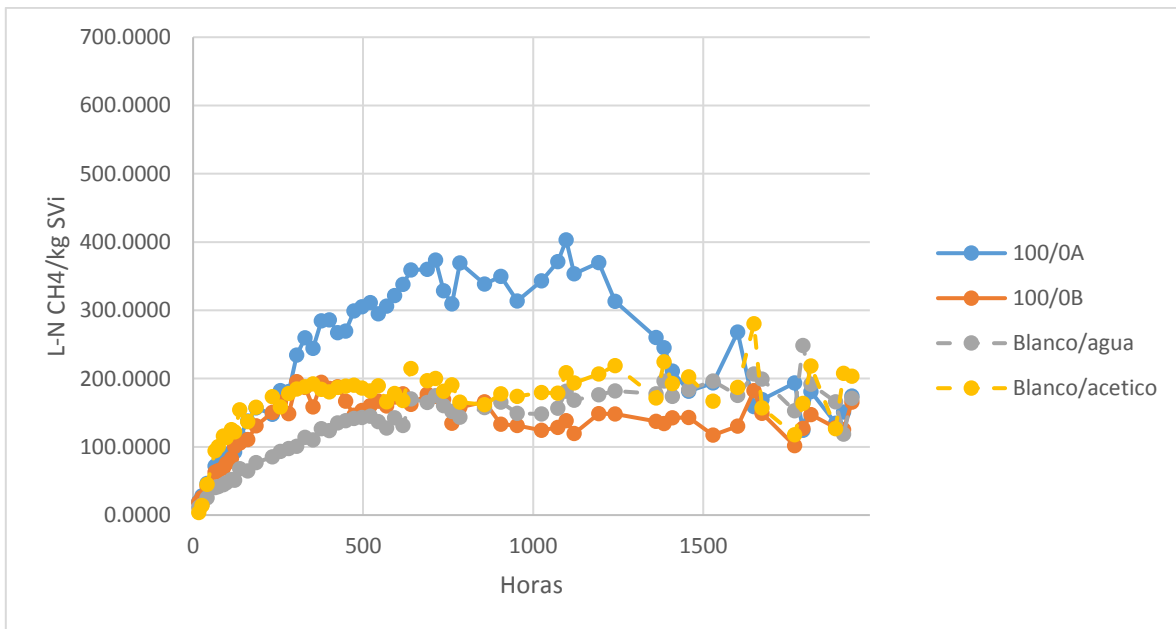


Figura C.17. 4^o PBM. Producción de CH₄, 75/25 vs Blanco.

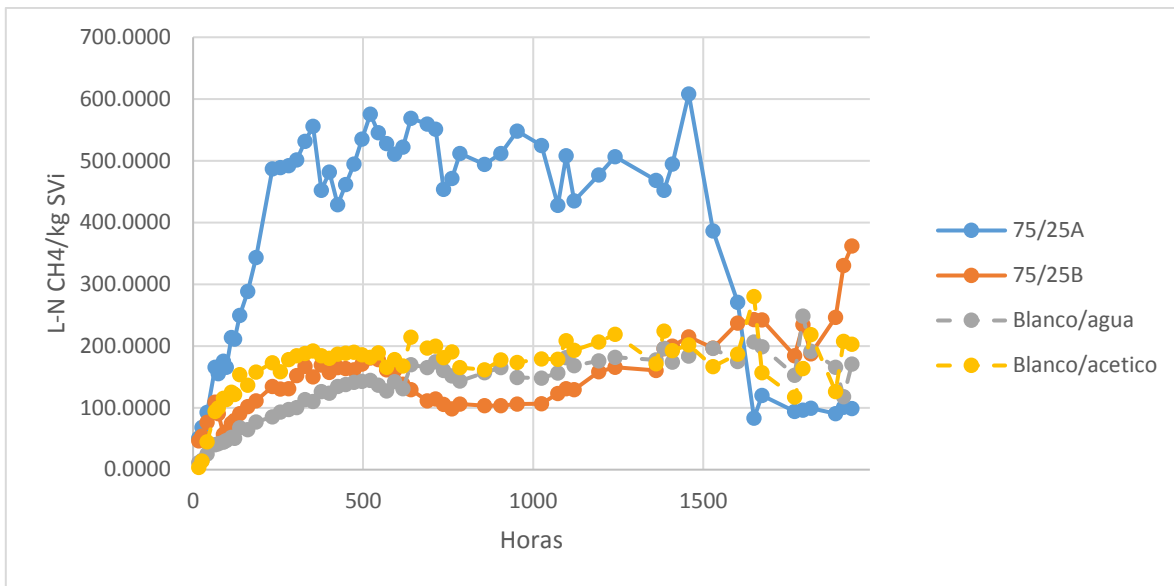
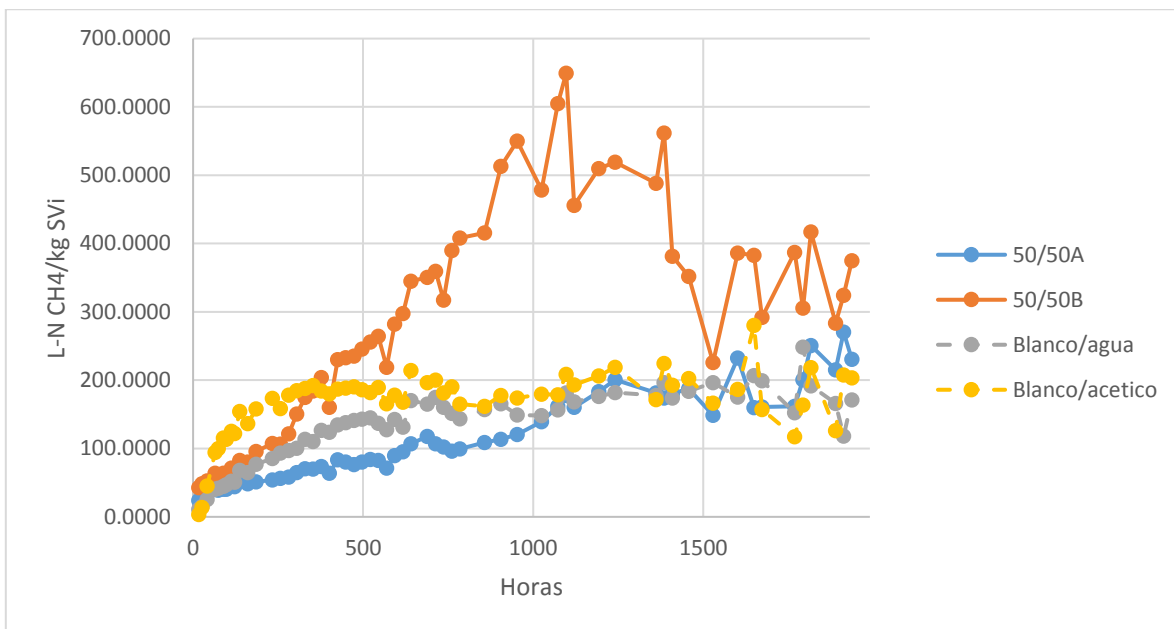


Figura C.18. 4^o PBM. Producción de CH₄, 50/50 vs Blanco.



FiguraC6.19. 4^{to} PBM. Producción de CH₄, 25/75 vs Blanco.

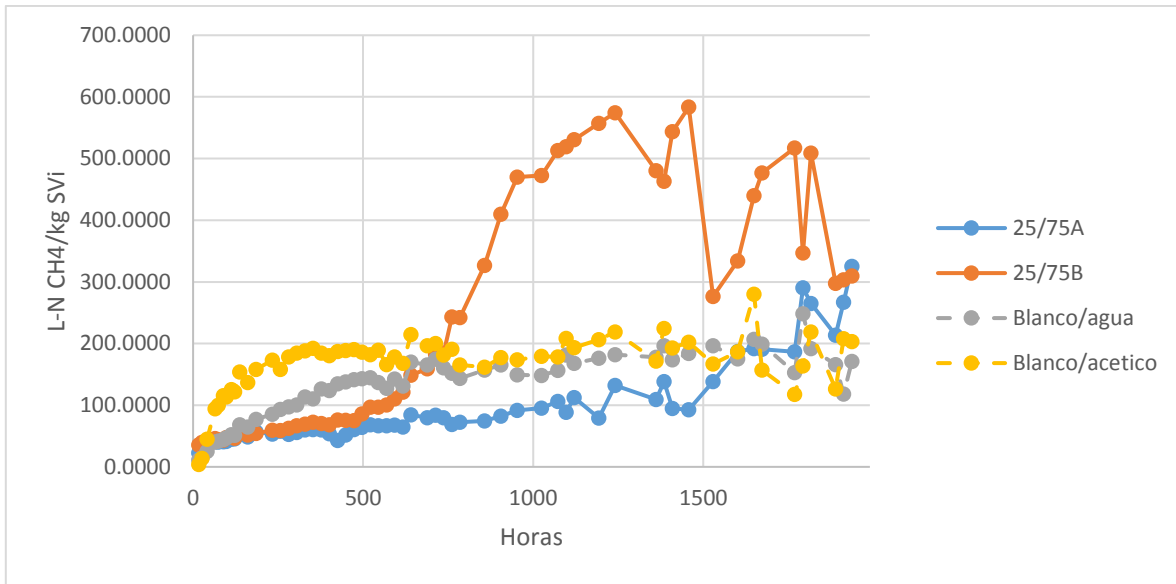
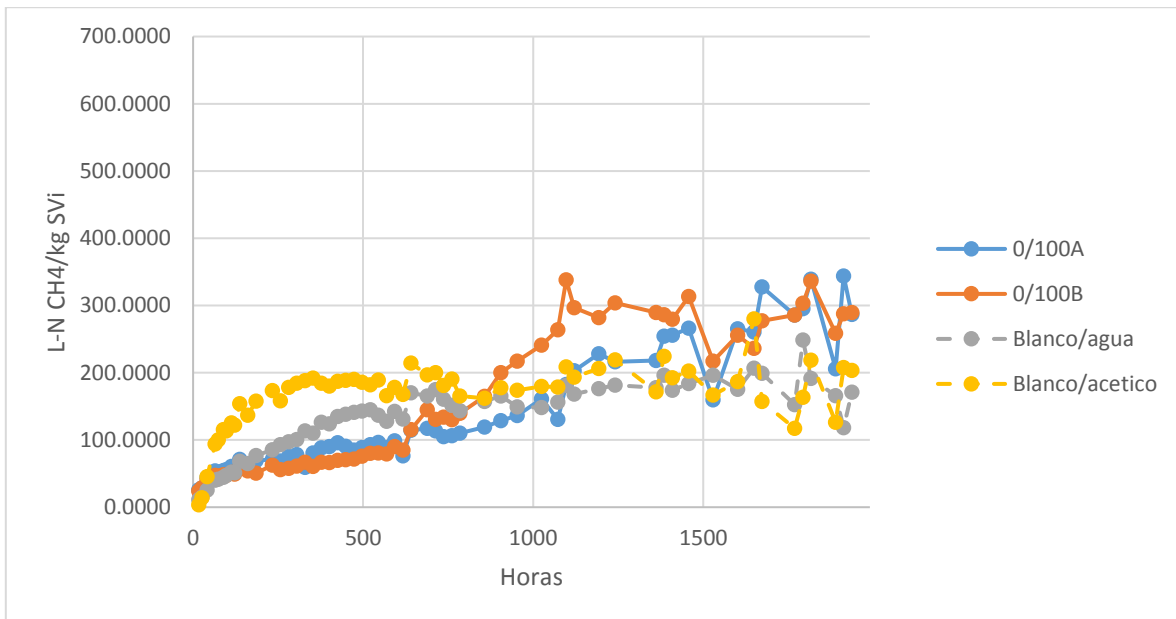


Figura C.20. 4^{to} PBM. Producción de CH₄, 0/100 vs Blanco.



Referencias

- Aarons S.R., O'Connor C.R., Gourley C.J.P. Dung Decomposition in Temperate Dairy Pastures I. Changes in Soil Chemical Properties. *Australian Journal of Soil Research*, volumen 42, 2004: 107-114.
- Angelidaki, I., Borzacconi, L., Kalyuzhnyi, S., Guwy, A. J., van Lier, J. B., Alves, M., ... Jenicek, P. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Bertin, L., Grilli, S., Spagni, A., & Fava, F. (2013). Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology*, 128, 779–783. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.118>
- Carrillo Aguado, J. L. (2006). Tratamiento y reutilización del suero de leche. *Mundo Lácteo y Cárnico*, 27–30.
- Demirel, B., Yenigun, O., & Onay, T. T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review. *Process Biochemistry*, Vol. 40, pp. 2583–2595. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.015>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources* (W.-V. V. G. y C. KGaA., Ed.). Alemania.
- Durán, A., Casas, D., Rojas, U., Vázquez, G., Roa, M., & Alcántara, R. (2014). *Fundamentos de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos* (1era edici). México.
- Ergüder, T. H., Tezel, U., Güven, E., & Demirer, G. N. (2001). Anaerobic Biotransformation and Methane Generation Potential of Cheese Whey in Batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21, 643–650.
- Escalante, H., Castro, L., Amaya, M. P., Jaimes, L., & Jaimes-Estévez, J. (2018). Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the

- dairy sector in developing countries. *Waste Management*, 71, 711–718.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.026>
- FOA. (2015). *Food Losses and Waste in Latin America and the Caribbean. The countries of the region are progressing towards a future with less Food Losses and Waste* (Bulletin 2).
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. New Jersey, Canada.
- Kavacik, B., & Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1321–1329.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.006>
- Mancillas, S., Rodríguez, J. A., & Ríos, L. (2012). Bioestimulación de la digestión anaerobia. *Revista Científica de La Universidad Autónoma de Coahuila*, 4(8), 56–59. Retrieved from <http://www.postgradoeinvestigacion.uadec.mx/divulgacionAQM.html>
- Martí, J., Pino, M., & Joaquín, V. (2017). *Biogás en el sector lechero en Chile*. (Primera Ed; ONUDI, Ed.). Chile.
- Neves, L., Oliveira, R., & Alves, M. M. (2004). Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry*, 39(12), 2019–2024.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.10.002>
- Neves, L., Oliveira, R., & Alves, M. M. (2009). Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat. *Bioresource Technology*, 100(6), 1957–1962.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.030>
- Noyola, A., Morgan, J., & Güereca, L. (2013). *SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES. GUÍA DE APOYO PARA CIUDADES PEQUEÑAS Y MEDIANAS*. (1ra edición). México.
- Parkin, G. F., & Owen, W. F. (2008). Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. *Journal of Environmental Engineering*, 112(5), 867–920.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1986\)112:5\(867\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1986)112:5(867))

Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>

Rubio Loza, L. A. (2004). *Producción de biosólidos clase “A” mediante digestión anaerobia en dos fases a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. 102.

Schunurer, A., & Jarvis, A. (2010). Microbiological Handbook for Biogas Plants. In *Avfall Sverige Development*.

SIAP-SAGARPA. (2017). *Panorama de la leche en México*. <https://doi.org/10.1080/09537280600875273>

Soler, N. (2015). *Valorización de Residuos de la Industria Agroalimentaria. Codigestión de estiércol de vacuno lechero y suero de quesería*.

Valencia, E., & Ramírez, M. L. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos*, 73, 27–31. Retrieved from <http://www.elementos.buap.mx/num73/pdf/27.pdf>

Vera, I., Martínez, J., Estrada, M., & Ortiz, A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 429–436. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70352-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70352-x)

Vernero. (2011). *Manual del biogás*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>